

TEXTE

19/2018

Kennzahlen und Indikatoren für die Beurteilung der Ressourceneffizienz von Rechenzentren und Prüfung der praktischen Anwendbarkeit

Abschlussbericht

TEXTE 19/2018

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Forschungskennzahl 3715 31 601 0
UBA-FB 002590

Kennzahlen und Indikatoren für die Beurteilung der Ressourceneffizienz von Rechenzentren und Prüfung der praktischen Anwendbarkeit

von

Björn Schödwell, Prof. Dr. Rüdiger Zarnekow
Business Engineering Institute St. Gallen, Singen

In Zusammenarbeit mit

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

Marc Wilkens
proRZ Rechenzentrumsbau GmbH, Wallmenroth

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:

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

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

Business Engineering Institute St. Gallen
Maggistraße 5
78224 Singen

Abschlussdatum:

Oktober 2017

Redaktion:

Beratungsstelle nachhaltige Informations- und Kommunikationstechnik (Green-IT)
Marina Köhn

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Februar 2018

Das diesem Bericht zu Grunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit unter der Forschungskennzahl 3715 31 601 0 finanziert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung

Das in diesem Bericht beschriebene Forschungsvorhaben untersucht Kennzahlen für die ökologische Beurteilung von Rechenzentren. Im Fokus des Vorhabens steht die Entwicklung, Überprüfung und Verbreitung eines praktikablen Kennzahlensystems zur ganzheitlichen und richtungssicheren Bewertung der Ressourceneffizienz und Umweltwirkungen von Rechenzentren. Hierzu wird ein Kennzahlensystem hergeleitet und erprobt, das nicht nur die Energieeffizienz ausgewählter Teilbereiche von Rechenzentren in der Nutzungsphase bewertet, sondern die von Rechenzentren erbrachte IT-Leistung ins Verhältnis zur Inanspruchnahme von natürlichen Ressourcen über den gesamten Lebensweg setzt.

Im ersten Schritt wird der Istzustand zu den Kennzahlen für die Bewertung der Ressourceneffizienz und der Umweltwirkungen von Rechenzentren untersucht, in Form von Kennzahlensteckbriefen und grafischen Übersichten dargestellt und der aktuelle Stand der Normung herausgearbeitet. Zum einen werden die Ansätze identifiziert, die dem Forschungsvorhaben als Ausgangspunkt für die weitere Entwicklung dienen, und zum anderen die Forschungslücken bestimmt, die mit dem Vorhaben vorrangig adressiert werden sollen. Weiterhin werden die existierenden Methoden und Wirkungsindikatoren der Ökobilanzierung auf ihre Eignung zur Bewertung der Ressourceninanspruchnahme und der Umweltwirkungen von Rechenzentren über den Lebensweg überprüft.

Im zweiten Schritt wird der Einfluss der Merkmale von Rechenzentren auf die Anwendbarkeit und Ausprägung von Kennzahlen diskutiert, um die Notwendigkeit zur Differenzierung des Kennzahlensystems nach unterschiedlichen Arten von Rechenzentren zu bestimmen. Davon ausgehend werden die Leistungs- und Aufwandsindikatoren entwickelt. Die Spezifikation der IT-Leistungsindikatoren stützt sich unter anderem auf Benchmark-Daten der Standard Performance Evaluation Council. Die ganzheitliche Erfassung der Ressourceninanspruchnahme und der Umweltwirkungen erfordert weitreichende Modellierungsarbeiten unter Zuhilfenahme der Lebenszyklus-Datenbanken ProBas und ecoinvent. Um die jeweiligen Teilergebnisse zusammenzuführen, wird ein MS EXCEL-basiertes Berechnungswerkzeug (KPI4DCE-Tool) entwickelt, das die Kennzahlen mittels standardisierter Eingaben der Betreiber von Rechenzentren automatisiert berechnet und zudem weitere Detailauswertungen ermöglicht.

Die Untersuchung der Herausforderungen der praktischen Anwendbarkeit des entwickelten Kennzahlensystems und des KPI4DCE-Tools steht im Fokus des dritten Arbeitsschrittes. Zur Überprüfung der Anwendbarkeit in der Praxis werden exemplarisch in drei Produktivrechenzentren die zur Berechnung der Kennzahlen notwendigen Informationen erhoben und die Ergebnisse vergleichend gegenübergestellt. Darüber hinaus werden mittels der erfassten Messdaten partiell Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um die Auswirkungen von Modellierungsentscheidungen und der systembedingten Wechselwirkungen zu analysieren und die Robustheit und die Richtungssicherheit der Kennzahlen bewerten zu können.

Basierend auf den Ergebnissen des Praxistests schließt der Forschungsbericht mit Empfehlungen für die Weiterentwicklung des Umweltzeichens Blauer Engel für energieeffizienten Rechenzentrumsbetrieb (RAL-UZ 161) und gibt Hinweise zu möglichen zukünftigen Aktivitäten der Normung von Kennzahlen für Rechenzentren. Darüber hinaus wird der Forschungsbedarf formuliert, den zukünftige Vorhaben adressieren sollten.

Abstract

Within the framework of the research project described in this report, key performance indicators (KPI) for the ecological assessment of data centers are investigated. The focus of the research project is the development, review and dissemination of a practical KPI system for the holistic and reliable assessment of the resource efficiency and environmental impacts of data centers. In particular, a KPI system is developed and tested, that not only evaluates the energy efficiency of selected subsystems of data centers in the use stage. Rather, a KPI system is designed to reflect the ratio of the IT performance provided by a data center to the use of natural resources over the entire life cycle of that data center.

In the first step the state of the art of KPIs for the assessment of the resource efficiency and the environmental impacts of data centers is explored and presented in the form of profile letters and diagrams, and the current state of international standardization projects is reviewed. On the one hand, the approaches are identified that are used as a starting point for the further development and, on the other hand, the existing research gaps are determined that are addressed primarily by the research project. Furthermore, an overview of the existing methods for the life cycle assessment is prepared and a first selection is made with regard to the indicators most suitable for the purpose of accounting the resource consumption and the environmental impacts of data centers holistically.

In the second step, the influence of the characteristics of data centers on the applicability and comparability of KPIs is discussed in order to determine the necessity of the differentiation of the KPI system according to different types of data centers. Based on the findings, the performance and resource consumption indicators are developed. The specification of the performance indicators is based, among other things, on performance benchmark data from the Standard Performance Evaluation Council. The accounting of the resource consumption requires extensive modeling work with the help of life cycle databases such as ProBas and ecoinvent. Furthermore, the KPI4DCE-Tool is developed, that must be filled with measurement data by data center operators in order to be able to calculate the specified KPIs automatically.

The practical applicability of the developed KPI system and the calculation tool is examined in the third part of the project. For this purpose, the measurement data required for the computation of the KPIs is collected in three real life data centers and the results are compared. In addition, partial sensitivity analyses are conducted in order to analyze the effects of the system-related interactions and modeling-related decisions and to evaluate the robustness and reliability of the developed KPIs.

Based on the results, the research report concludes with recommendations for the further development of the Blue Angel eco-label for energy-efficient data center operation (RAL-UZ 161) and provides information on possible future activities for the standardization of KPIs for data centers. In addition, open research questions are formulated, that shall be addressed by future projects.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich herzlich für die umfangreiche Hilfestellung und die freundliche Unterstützung bei folgenden Personen:

- ▶ Den Teilnehmern am Begleitkreis
- ▶ Den Ansprechpartnern der untersuchten Rechenzentren
- ▶ Marina Köhn und Dr. Hans-Jürgen Baumeister sowie ihren Kolleginnen und Kollegen für die gute Zusammenarbeit.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	11
Tabellenverzeichnis	13
Abkürzungsverzeichnis	17
Symbolverzeichnis	19
Einheiten.....	20
Zusammenfassung.....	21
Summary.....	38
1 Einleitung	53
1.1 Begriffsbestimmungen.....	53
1.2 Hintergrund.....	53
1.3 Marktrelevanz.....	54
1.4 Zielsetzung und Aufgaben	55
1.5 Untersuchungsrahmen	55
1.6 Methodik.....	56
2 Analyse und Bewertung des aktuellen Wissenstandes	57
2.1 Bestandsaufnahme zu Kennzahlen für Rechenzentren.....	58
2.1.1 Anforderungen an Kennzahlen und Kennzahlensysteme	58
2.1.2 Steckbrief für Kennzahlen	59
2.1.3 Wichtige Organisationen und richtungsweisende Ansätze	60
2.1.4 Stand der Normung von Kennzahlen für Rechenzentren	62
2.1.4.1 EN 50600: Einrichtungen und Infrastrukturen von Rechenzentren	62
2.1.4.2 ISO 30134: Leistungskennzahlen für Rechenzentren	64
2.1.4.3 ISO 30133: Guidelines for resource efficient Data Centres	71
2.1.4.4 ISO 21836: Server Energy Effectiveness Metric	71
2.1.5 Zusammenfassende Bewertung des Istzustandes	73
2.2 Bewertung des Rohstoffverbrauchs in der Ökobilanzierung.....	75
2.2.1 Rohstoffverbrauch in Ökobilanzen.....	75
2.2.2 Methoden für die Bewertung des abiotischen Rohstoffverbrauchs.....	77
2.2.2.1 CML: Methode des Centrum voor Milieukunde	78
2.2.2.2 Ökobilanz nach ILCD-Handbuch	79
2.2.2.3 AADP nach ESSENZ-Methode	80
2.2.2.4 Eco-Indicator 99	80
2.2.2.5 ReCiPe-Methode	81
2.2.2.6 EPS 2000: Environmental Priority Strategies	82

2.2.2.7	IMPACT 2002+: Life Cycle Impact Assessment Methodology	82
2.2.2.8	EDIP97 und EDIP2003: Environmental Development of Industrial Products	83
2.2.2.9	KRA: Kumulierter Rohstoffaufwand nach UBA-Methode	83
2.2.2.10	KRA: Kumulierter Rohstoffaufwand nach VDI 4800 Blatt 1 und Blatt 2	84
2.2.2.11	TRACI: Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts	84
2.2.2.12	LUCAS: A New LCIA Method Used for a Canadian-Specific Context	84
2.2.2.13	LIME: Life Cycle Impact Assessment Method based on Endpoint Modeling	84
2.2.3	Zusammenfassung zu den dargestellten Methoden.....	85
3	Entwicklung des Kennzahlensystems	91
3.1	Einfluss der Merkmale von Rechenzentren auf Kennzahlen	91
3.2	Quantifizierung der Ressourceneffizienz von Rechenzentren.....	96
3.3	Ermittlung der IT-Leistung eines Rechenzentrums.....	98
3.3.1	Nutzen der Server: Rechenleistung.....	103
3.3.2	Nutzen der Datenspeicher: Datenspeicherleistung	107
3.3.3	Nutzen der Netzwerke: Datenübertragungsleistung	111
3.3.4	Eingabegrößen für die Bewertung der IT-Leistung	113
3.4	Ermittlung abiotischer Rohstoffverbrauch und Umweltauswirkungen.....	113
3.4.1	Systemgrenze der Ökobilanz.....	113
3.4.2	Betrachtete Umweltaspekte	116
3.4.2.1	Abiotischer Rohstoffverbrauch	116
3.4.2.2	Kumulierter Energieaufwand	117
3.4.2.3	Treibhausgaspotenzial	117
3.4.2.4	Wasserverbrauch	117
3.4.2.5	Für die Modellierung verwendete Software	117
3.4.3	Bezugsgröße der Bilanz	117
3.4.4	Modellierung der Herstellungsphase.....	118
3.4.4.1	Auf Komponentenebene: Prozessoren	118
3.4.4.2	Auf Komponentenebene: Integrierte Schaltkreise	120
3.4.4.3	Auf Komponentenebene: Unbestückte Leiterplatte	122
3.4.4.4	Auf Komponentenebene: Hard Disk Drive	123
3.4.4.5	Auf Komponentenebene: Solid State Drive	125
3.4.4.6	Auf Produktebene: Server	126
3.4.4.7	Auf Produktebene: Datenspeichersysteme	135
3.4.4.8	Auf Produktebene: Netzwerk-Switches	137
3.4.4.9	Auf Produktebene: USV-Anlagen und Batterien	140

3.4.4.10	Modellierung des Transports der Komponenten nach der Endmontage	142
3.4.5	Modellierung der Distribution der Produkte von der Endmontage bis zum Rechenzentrum.....	142
3.4.6	Modellierung der Nutzungsphase	145
3.4.6.1	Stromverbrauch	145
3.4.6.2	Wasserverbrauch	146
3.4.6.3	Kältemittelverbrauch	147
3.4.7	Modellierung der Entsorgungsphase	148
3.4.7.1	Informationstechnik	148
3.4.7.2	USV-Anlagen und Batterien	152
3.4.8	Zusammenfassung der von den RZ-Betreibern anzugebenden Parameter	152
3.5	Zusammenführung der Teilergebnisse	154
3.5.1	Zusammenführung der Nutzen und Aufwandsindikatoren	154
3.5.2	Prototypische Implementierung eines Berechnungswerkzeuges.....	155
4	Überprüfung des Kennzahlensystems	156
4.1	Anwendbarkeit in der Praxis.....	156
4.1.1	Fallstudie RZ1	156
4.1.1.1	Inventar	156
4.1.1.2	Energiebedarf	158
4.1.1.3	IT-Performance und Auslastungen	158
4.1.1.4	Erfolgsfaktoren und Herausforderungen der Datenerhebung	159
4.1.2	Fallstudie RZ2	159
4.1.2.1	Inventar	160
4.1.2.2	Energiebedarf	160
4.1.2.3	Auslastungen	160
4.1.2.4	IT-Performanz	161
4.1.2.5	Erfolgsfaktoren und Herausforderungen bei der Datenerhebung:	161
4.1.3	Fallstudie RZ3	164
4.1.3.1	Inventar	165
4.1.3.2	Energiebedarf	165
4.1.3.3	Auslastungen	166
4.1.3.4	IT-Performanz	166
4.1.3.5	Erfolgsfaktoren und Herausforderungen der Datenerhebung	166
4.1.4	Gegenüberstellung der Ergebnisse der drei Fallstudien	168
4.1.5	Zusammenfassende Bewertung der Anwendbarkeit.....	174
4.2	Bewertung der Richtungssicherheit und Robustheit des Kennzahlensystems	175

4.2.1	Unsicherheiten der Modellierung und Berechnung der IT-Leistung	175
4.2.1.1	Rechenleistung der Server	175
4.2.1.2	Speicherleistung der Datenspeicher	176
4.2.1.3	Übertragungsleistung der Netzwerke	177
4.2.2	Unsicherheiten der Modellierung und Berechnung des Ressourcenaufwands.....	177
4.2.2.1	Speicherchips	177
4.2.2.2	Prozessoren	178
4.2.2.3	Leiterplatten	178
4.2.2.4	Hard Disk Drive	180
4.2.2.5	Solid State Drive	181
4.2.2.6	Netzwerkgeräte	182
4.2.3	Interpretation der Ergebnisse für die Berechnung des Ressourcenaufwands	182
4.2.3.1	Ergebnisvergleich auf Produktebene anhand des Untersuchungsgegenstands in der EuP Lot 9-Studie und der JRC-Studie	182
4.2.3.2	Ergebnisvergleich auf Komponentenebene mit der JRC-Studie	183
4.2.3.3	Ergebnisvergleich auf Komponentenebene mit der Studie von [Teehan und Kandlikar 2013b]	185
4.2.4	Robustheit und Richtungssicherheit des Kennzahlensystems.....	186
4.2.5	Bewertung der Erfüllung der Anforderungen an Kennzahlensysteme	187
5	Empfehlungen zur Verwendung der Ergebnisse	188
5.1	Empfehlungen für den Blauen Engel RAL UZ 161	188
5.2	Empfehlungen für die Normung	190
5.3	Empfehlungen für weitere Forschungsarbeiten	192
6	Ausblick.....	194
7	Quellenverzeichnis.....	195
8	Anhang.....	205
8.1	Kennzahlensteckbriefe.....	205
8.2	Charakterisierungsfaktoren	235
8.3	„Die“-Fläche der Serverprozessoren nach technischen Parametern	242
8.4	ProBas-Datensätze.....	247
8.5	Annahmen über die geplante Lebensdauern	257
8.6	Daten aus den Fallstudien	257

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Ressourceneffizienz der Gebäudetechnik der Rechenzentren	28
Abbildung 2:	Ressourceneffizienz der Server der Rechenzentren.....	29
Abbildung 3:	Ressourceneffizienz der Datenspeichersysteme der Rechenzentren	29
Abbildung 4:	Relative Verteilung der Umweltwirkungen der Rechenzentren nach Subsystemen.....	30
Abbildung 5:	Verteilung der Umweltwirkungen der Rechenzentren nach Lebenszyklusphasen	31
Abbildung 6:	Untersuchungsgegenstand und Vordefinition der Systemgrenzen	56
Abbildung 7:	Relevante EN-Normen: EN 50600.....	62
Abbildung 8:	Relevante ISO-Normen: ISO 30134, ISO 21836 und ISO 30133.....	65
Abbildung 9:	Ergebnisse der Lückenanalyse zu den Kennzahlen nach Systemebenen	74
Abbildung 10:	Ergebnisse der Lückenanalyse zu den Kennzahlen nach Lebenszyklusphasen	75
Abbildung 11:	Kategorisierung der natürlichen Ressourcen I.....	77
Abbildung 12:	Kategorisierung der natürlichen Ressourcen II.....	77
Abbildung 13:	Methodisches Prinzip des Eco-Indicators 99	81
Abbildung 14:	Ebenen der IT-Leistung	98
Abbildung 15:	Aggregation der Teilnutzen der IT-Subsysteme	102
Abbildung 16:	Bestimmung der Serverleistung differenziert nach Arbeitslastklassen.....	104
Abbildung 17:	Korrelation der CPU-spezifischen SPECint_rate- und SPECfp_rate-Leistungswerte.....	107
Abbildung 18:	Zusammenhang zwischen Transaktionsrate und Latenz von Datenspeichersystemen	110
Abbildung 19:	Leistungsaufnahme von Netzwerk-Switches in Abhängigkeit von der Anzahl und der Übertragungsrate der aktivierten Ports	112
Abbildung 20:	Schematische Darstellung der Systemgrenzen.....	114
Abbildung 21:	Betrachtete RZ-Ausrüstung	114
Abbildung 22:	Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools: Herstellung der CPUs.....	120
Abbildung 23:	Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools: Herstellung der Speicherchips.....	122
Abbildung 24:	Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools: Herstellung der Leiterplatte	123
Abbildung 25:	Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools: Herstellung der HDD.....	125
Abbildung 26:	Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools: Herstellung einer SSD	126
Abbildung 27:	Häufig verwendete Serverformfaktoren	127
Abbildung 28:	Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools: Herstellung der Rack Server	131

Abbildung 29:	Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools: Herstellung der Blade Server Module.....	134
Abbildung 30:	Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools: Herstellung der Blade System Gehäuse	135
Abbildung 31:	Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools: Herstellung der Datenspeichersysteme	137
Abbildung 32:	Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools: Herstellung der Switches	140
Abbildung 33:	Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools: Herstellung der USV-Anlagen und Batterien	142
Abbildung 34:	Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools: Distribution	145
Abbildung 35:	Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools: Stromverbrauch in der Nutzungsphase	146
Abbildung 36:	Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools: Wasserverbrauch in der Nutzungsphase	146
Abbildung 37:	Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools: Kältemittelverbrauch.....	148
Abbildung 38:	Transaktionsrate und Durchsatz eines Datenspeichersystems	161
Abbildung 39:	Ein- und ausgehender Datenverkehr des Router T01 für 30 Tage	162
Abbildung 40:	Ein- und ausgehender Datenverkehr des Router T02 für 30 Tage	162
Abbildung 41:	Ein- und ausgehender Datenverkehr über einen Messzeitraum von 24 Stunden.....	163
Abbildung 42:	Ressourceneffizienz der Gebäudetechnik der Rechenzentren	169
Abbildung 43:	Rechenkapazität, CPU-Auslastung und Rechenleistung der Server der Rechenzentren.....	170
Abbildung 44:	Ressourceneffizienz der Server der Rechenzentren.....	170
Abbildung 45:	Speicherplatzkapazität sowie relative und absolute Speicherplatzbelegung der Datenspeichersysteme der Rechenzentren.....	171
Abbildung 46:	Ressourceneffizienz der Datenspeichersysteme der Rechenzentren	172
Abbildung 47:	Relative Verteilung der Umweltwirkungen der Rechenzentren nach Subsystemen.....	173
Abbildung 48:	Relative Verteilung der Umweltwirkungen der Rechenzentren nach Lebenszyklusphasen	174

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Eingabegrößen zur Erfassung der IT-Leistung eines Rechenzentrums.....	24
Tabelle 2:	Quellen für die Charakterisierungsfaktoren der ILCD-Methode	25
Tabelle 3:	Eingabegrößen zur Bilanzierung der Ressourceninanspruchnahme und der Umweltwirkungen eines Rechenzentrums	26
Tabelle 4:	Steckbrief für Kennzahlen.....	59
Tabelle 5:	Messkategorien der PUE nach ISO 30134	66
Tabelle 6:	Methoden abiotischer Ressourcenverbrauch nach ILCD-Handbuch.....	79
Tabelle 7:	Seltene Erden nach ILCD-Handbuch	80
Tabelle 8:	Quellen für Charakterisierungsfaktoren der ILCD-Methode	85
Tabelle 9:	Überblick Auswertungsmethoden abiotischer Rohstoffverbrauch.....	86
Tabelle 10:	Betriebsmodelle von Rechenzentren	91
Tabelle 11:	Verantwortungsbereiche in Rechenzentren.....	92
Tabelle 12:	Verantwortungsbereiche in Rechenzentren nach Betriebsmodell	92
Tabelle 13:	Einfluss der Merkmale von Rechenzentren auf Kennzahlen	95
Tabelle 14:	Berechnungsbeispiel für die DCiRE und die DCiRE _{Colo}	97
Tabelle 15:	Indikatoren zur Erfassung der IT-Leistung von Rechenzentren.....	99
Tabelle 16:	Vor- und Nachteile ausgewählter Indikatoren für die IT-Leistung	101
Tabelle 17:	Umfang der Datensätze der Benchmarks für Server.....	105
Tabelle 18:	Umfang der Datensätze der Leistungsbenchmarks für Server.....	106
Tabelle 19:	Typische Zugriffsmuster unterschiedlicher Speicheranwendungen	108
Tabelle 20:	Datenspeichersystemklassen nach Zugriffsmuster und MaxTTFD.....	108
Tabelle 21:	Eingabegrößen für die Bewertung der IT-Leistung.....	113
Tabelle 22:	Ergebnisse einer Ökobilanz für ein Rechenzentrum in Großbritannien.....	115
Tabelle 23:	Vorgabewerte für die „Die“-Fläche der CPU nach Anzahl der Kerne	120
Tabelle 24:	Spezifikation der Speicherchips	120
Tabelle 25:	Repräsentativität des Leiterplatten-Datensatzes	122
Tabelle 26:	Standardformfaktoren für Motherboards von Servern.....	123
Tabelle 27:	Repräsentativität des 3,5"-HDD-Datensatzes.....	124
Tabelle 28:	Komponenten einer SSD.....	125
Tabelle 29:	Komponenten eines Rack Servers	128
Tabelle 30:	Materialienzusammensetzung eines Rack Servers.....	128
Tabelle 31:	Komponenten eines Blade Systems mit acht Blade Server Modulen	131
Tabelle 32:	Materialienzusammensetzung eines Blade System Gehäuses und Quellen der für die Modellierung verwendeten Datensätze	132

Tabelle 33:	Materialienzusammensetzung eines Blade Server Moduls und Quellen der für die Modellierung verwendeten Datensätze	133
Tabelle 34:	Materialienzusammensetzung und Anteil des Controller Enclosures.....	135
Tabelle 35:	Materialienzusammensetzung und Anteil der Disc Array Enclosures.....	136
Tabelle 36:	Komponentenzusammensetzung eines Switches	138
Tabelle 37:	Materialienzusammensetzung und Datenquellen für die Modellierung der Herstellung eines Switches.....	139
Tabelle 38:	Gewicht und Verpackung von USV-Anlagen.....	140
Tabelle 39:	Materialienzusammensetzung von USV-Anlagen	141
Tabelle 40:	Materialzusammensetzung von Batterien	141
Tabelle 41:	Literaturwerte für die Distribution der Server, Datenspeichersysteme und USV-Anlagen.....	143
Tabelle 42:	Modellierung der Distribution	144
Tabelle 43:	Chemische Zusammensetzung der in Rechenzentren verwendeten Kältemittel	147
Tabelle 44:	Modellierung der Entsorgung der IT und ihr THG-Anteil am Gesamtergebnis nach verschiedenen Literaturquellen.....	149
Tabelle 45:	Entsorgung der IT und Quellen der zur Modellierung verwendeten Datensätze	151
Tabelle 46:	Aufteilung der Komponenten für die Modellierung der Entsorgung der IT nach Gewichtsanteil	151
Tabelle 47:	Modellierung der Entsorgung der USV-Anlagen	152
Tabelle 48:	Modellierung des Entsorgung der Batterien	152
Tabelle 49:	Überblick über die von den RZ-Betreibern anzugebenden Parameter zur Bilanzierung des Ressourcenaufwands.....	153
Tabelle 50:	Überblick über die entwickelten Ressourceneffizienzkennzahlen	154
Tabelle 51:	Übersicht RZ-Kategorien für die Fallbeispiele	156
Tabelle 52:	Verteilung des IT-Strombedarfes des RZ1 in der Nutzungsphase auf die IT-Subsysteme.....	158
Tabelle 53:	Verteilung des IT-Strombedarfes des RZ2 in der Nutzungsphase auf die IT-Subsysteme.....	160
Tabelle 54:	Verteilung des IT-Strombedarfes des RZ3 in der Nutzungsphase auf die IT-Subsysteme.....	166
Tabelle 55:	Übersicht der Eingabeparameter mit Verfügbarkeit der Daten für die Fallbeispiele	168
Tabelle 56:	Vergleich der Fläche und Gewichtanteil der Hauptplatine in Literaturen	179
Tabelle 57:	Einfluss auf das THG-Ergebnis nach der Variierung der Anzahl und Fläche der Hauptplatine in der Modellierung	179

Tabelle 58:	THG-Werte nach verschiedener Lagenzahl der Leiterplatte	180
Tabelle 59	Zusammenstellung der aus der Herstellungsphase resultierenden Umweltindikatoren bezogen auf eine SSD, variiert nach „Die“-Fläche.....	181
Tabelle 60:	Zusammenstellung der KEA-und THG-Ergebnisse in der Herstellungsphase	182
Tabelle 61:	THG-Werte von Rack Servern in der Herstellungsphase	183
Tabelle 62:	Beitrag der im KPI4DCE-Tool berechneten Umweltaspekte in der Herstellungsphase anhand des Untersuchungsgegenstands in der EuP Lot 9 Studie	184
Tabelle 63:	THG- und ADP-Beitrag der wichtigsten Komponenten eines Rack Servers in der Herstellungsphase	184
Tabelle 64:	Vergleich der Prozessoren in verschiedenen Literaturen hinsichtlich des THG-Wertes.....	185
Tabelle 65:	Beitrag der wichtigsten Komponenten von Rack Servern zum THG-Wert der Herstellungsphase.....	185
Tabelle 66:	Messgrößen für Kennzahlensteckbriefe.....	205
Tabelle 67:	Indizes der Messgrößen für Kennzahlensteckbriefe	205
Tabelle 68:	Indizes der Messgrößen für Kennzahlensteckbriefe	206
Tabelle 69:	Kennzahlenverzeichnis	206
Tabelle 70:	43 Charakterisierungsfaktoren für ADP nach der CML-Methode	235
Tabelle 71:	19 Charakterisierungsfaktoren nach ILCD-Handbuch	237
Tabelle 72:	Charakterisierungsfaktoren AADP.....	237
Tabelle 73:	Charakterisierungsfaktoren Ressourcenverbrauch nach Eco-Indicator 99	238
Tabelle 74:	Charakterisierungsfaktoren Metal Depletion nach ReCiPe 2008.....	239
Tabelle 75:	Charakterisierungsfaktoren Fossil depletion nach ReCiPe 2008.....	240
Tabelle 76:	Wirkungsindikatoren hinsichtlich ADP nach ESP 2000.....	241
Tabelle 77:	Intel Serverprozessoren.....	242
Tabelle 78:	AMD Serverprozessoren [Fischer 2016]	242
Tabelle 79:	Zusammenfassung der „Die“-Fläche der Intel-Prozessoren nach technischen Parametern.....	243
Tabelle 80:	Zusammenfassung der „Die“-Fläche der AMD-Prozessoren nach technischen Parametern.....	246
Tabelle 81:	Eingabe- und Ausgabedaten für die Herstellung des Front-End-Prozesses des Prozessors.....	247
Tabelle 82:	Eingabe- und Ausgabedaten für die Herstellung des Back-End-Prozesses des Prozessors.....	248
Tabelle 83:	Eingabe- und Ausgabedaten für den Datensatz „IC-Fertigung-Front End Prozess“good die out“ (direkte Emissionen)	249

Tabelle 84:	Eingabe- und Ausgabedaten für Datensatz „IC-Fertigung-Back End Prozess“ (direkte Emissionen)	250
Tabelle 85:	Produktionsverteilung der Front-End-Prozesse für die IC-Herstellung nach Ländern	250
Tabelle 86:	Produktionsverteilung der Back-End-Prozesse nach Ländern.....	251
Tabelle 87:	Eingabe- und Ausgabedaten für den Datensatz „Herstellung Leiterplatte“	251
Tabelle 88:	Eingabe- und Ausgabedaten für den Datensatz „Herstellung\interne 3,5"-Festplatte“	252
Tabelle 89:	Materialienzusammensetzung eines glasbasierten Mediums für 2,5"-HDD	254
Tabelle 90:	Eingabe- und Ausgabedaten für die Herstellung der 2,5"-HDD	255
Tabelle 91:	Geplante Lebensdauer der IT und Gebäudetechnik.....	257
Tabelle 92:	Daten der Fallstudien: Server	257
Tabelle 93:	Daten der Fallstudien: Datenspeichersysteme.....	258
Tabelle 94:	Daten der Fallstudien: Netzwerkgeräte.....	258
Tabelle 95:	Daten der Fallstudien: Gebäudetechnik.....	259
Tabelle 96:	Daten der Fallstudien: Effektive Nutzungsdauer der Anlagen	259
Tabelle 97:	Daten der Fallstudien: Betriebsmittel	259

Abkürzungsverzeichnis

AADP	Anthropogenic stock extended Abiotic Depletion Potential
ADP	Abiotic Resource Depletion Potential
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers
BHKW	Blockheizkraftwerke
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BSI	Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik
bspw.	Beispielsweise
bzw.	Beziehungsweise
ca.	Circa
CADE	Corporate Average Data Center Efficiency
CML	Centrum voor Milieukunde
CF	Charakterisierungsfaktor
CMDB	Configuration Management Database
COP	Coefficient of Performance
CO₂	Kohlenstoffdioxid
CPU	Central Processing Unit
DAE	Disk Array Enclosure
DCiE	Data Center infrastructure Efficiency
DCIM	Data Center Infrastructure Management
DIS	Draft International Standard
DCIM	Data Center Infrastructure Management
ELU	Environmental Load Unit
engl.	Englisch
EPS	Environmental Priority Strategies
ERF	Energy Reuse Factor
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EU CoC DC	European Union Code of Conduct for Data Centers
EUE	Energy Usage Effectiveness
FDIS	Final Draft International Standard
FDP	Fossil Depletion Potential
ggfs.	Gegebenenfalls
GITPC	Green IT Promotion Council

GLT	Gebäudeleittechnik
GWP	Global Warming Potential (siehe THG)
HDD	Hard Disk Drive
HLK	Heizungs-, Lüftungs-, Kühl- und Klimatechnik
IDC	International Data Corporation
i. d. R.	in der Regel
ISO	International Organization for Standardization
IT	Informationstechnik
ITEE	Information Technology Equipment Energy Efficiency
ITIL	IT Infrastructure Library
ITEU	Information Technology Equipment Utilization
JRC	Joint Research Centre
k.A.	keine Angaben
KPI	Key Performance Indikator
KS	Kühlsystem
LAN	Local Area Network
LBNL	Lawrence Berkeley National Laboratory
Lkw	Lastkraftwagen
MDP	Metal Depletion Potential
Mio.	Millionen
Mrd.	Milliarde
MSP	Managed Service Provider
MSR	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik
NEA	Netzersatzanlagen
NWIP	New Work Item Proposal
OECD	Organization for Economic Cooperation and Development
PDTR	Proposed Draft Technical Report
PEF	Product Environmental Footprint
ProBas	Prozessorientierte Datenbank für Basisdaten
PUE	Power Usage Effectiveness
PV	Photovoltaik
RAM	Random Access Memory
REF	Renewable Energy Factor
RZ	Rechenzentrum / Rechenzentren
SAN	Storage Area Network

SEEM	Server Energy Effectiveness Metric
SEER	Seasonal Energy Efficiency Ratio
SERT	Server Efficiency Rating Tool
SNIA	Storage Networking Industry Association
SO₂	Schwefeldioxid
SPEC	Standard Performance Evaluation Corporation
SPC	Storage Performance Council
SSD	Solid State Drive
SV	Stromversorgung
THG	Treibhausgaspotenzial
TPC	Transaction Processing Performance Council
TR	Technical Report
TRACI	Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impact
UBA	Umweltbundesamt
US EPA	United States Environmental Protection Agency
USGS	United States Geological Survey
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WAN	Wide Area Network
WD	Working Draft
WG	Working Group
WTP	willingness-to-pay
z. B.	zum Beispiel
SUT	System Under Test

Symbolverzeichnis

E	Energie
P	Leistung
A	Auslastung
S	(IT)-Performanz

Einheiten

a	Jahr
A	Ampere
h	Stunde
J	Joule
V	Volt
°C	Grad Celsius
m	Meter
m²	Quadratmeter
m³	Kubikmeter
mm²	Quadratmillimeter
kg	Kilogramm
€	Euro
kW	Kilowatt
MW	Megawatt
kWh	Kilowattstunde
HE	Höheneinheit
Ops	Operationen pro Sekunde
Opa	Operationen pro Jahr
CO₂-eq.	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente
SO₂-eq.	Schwefeldioxid-Äquivalente
Sb-eq.	Antimon-Äquivalente
Fe-eq.	Eisen-Äquivalente
Oil-eq.	Rohöl-Äquivalente
W	Watt

Zusammenfassung

Hintergrund und Ziele des Forschungsvorhabens

Immer neue Trends der IT-Branche wie das Cloud Computing, das Internet der Dinge oder die Industrie 4.0 erhöhen stetig den Bedarf an zentraler Bereitstellung von Daten und Rechenleistung. Die Wachstumsdynamik der Rechenzentren schlägt sich in einer steigenden Inanspruchnahme natürlicher Ressourcen nieder. Denn mehr Geräte verbrauchen mehr Energie und ihre Herstellung belastet die Umwelt und verbraucht Rohstoffe.

Viele Betreiber konzentrieren sich auf die Verfügbarkeit, Sicherheit und Performanz ihrer Rechenzentren. Dabei ist der verantwortungsbewusste und effiziente Umgang mit natürlichen Ressourcen bei stark wachsenden Branchen besonders wichtig. In Rechenzentren gibt es viele Möglichkeiten, die ökologische Bilanz zu verbessern. Der erste Schritt ist, den aktuellen Zustand zu erfassen und zu bewerten. Einige Kennzahlen und Indikatoren gibt es bereits, teilweise sind sie in der Praxis schon etabliert. Die bisherigen Ansätze berücksichtigen aber nur die Nutzungsphase. Die Herstellung und Entsorgung der IT und der Gebäudetechnik werden nicht erfasst. Viele der Kennzahlen sind zudem nicht Outputorientiert, d. h. sie nehmen keinen Bezug auf die geleistete Arbeit des Rechenzentrums. Ihre Aussagekraft ist daher beschränkt. Auch sind die Messmethoden und Datengrundlagen oft noch unausgereift.

Aus diesem Grund arbeiten viele Akteure daran, bestehende Kennzahlen und Indikatoren zu vereinheitlichen und weiterzuentwickeln. Das Forschungsvorhaben *Key Performance Indicators for Data Center Efficiency* (KPI4DCE) unterstützt diese Bemühungen und adressiert vor allem die Ganzheitlichkeit der ökologischen Bewertung. Das Ziel ist es, ein praktikables Kennzahlensystem zur richtungssicheren Beurteilung der Ressourceneffizienz und der Umweltwirkungen von Rechenzentren zu entwickeln, die Anwendbarkeit zu erproben und die Ergebnisse in der Wissenschaft und in der Praxis zu verbreiten.

Textbox 1: Aufgabenschwerpunkte des Forschungsvorhabens im Überblick

Aufgabenschwerpunkte des Forschungsvorhabens KPI4DCE

Das Forschungsvorhaben KPI4DCE umfasste die folgende Aufgabenschwerpunkte:

- ▶ Bestandsaufnahme und Bewertung vorhandener Kennzahlen, Indikatoren und Methoden
- ▶ Entwicklung eines Kennzahlensystems im Sinne der Zielstellung des Forschungsvorhabens
- ▶ Überprüfung des Kennzahlensystems anhand einiger praktischer Beispiele
- ▶ Platzierung der Ergebnisse in Harmonisierungs- und Normungsaktivitäten
- ▶ Empfehlungen für die Weiterentwicklung des Umweltzeichens Blauer Engel für Rechenzentren

Analyse und Bewertung des aktuellen Wissenstandes

Wissenschaftliche Literatur zu Kennzahlen für Rechenzentren

Im ersten Schritt des Forschungsvorhabens wurde der Istzustand zu den Kennzahlen für die Bewertung der Ressourceneffizienz und der Umweltwirkungen von Rechenzentren erfasst. Das Ziel war es, durch eine systematische Analyse wissenschaftlicher Literatur die Ansätze zu identifizieren, die als Ausgangspunkte für die Entwicklung eines praktikablen und richtungssicheren Kennzahlensystems geeignet sind, und die Forschungslücken zu bestimmen, die mit dem Forschungsvorhaben vorrangig adressiert werden sollten. Zur Dokumentation der wesentlichen Eigenschaften der identifizierten Kennzahlen wurde das Steckbriefformat gewählt und zur Bewertung der Kennzahlen allgemeingültige Anforderungen definiert. Die Kennzahlen wurden jeweils in Hinblick auf die adressierte Systemebene (Gesamtsystem, Funktionales Hauptsystem, Funktionales System, Funktionales Subsystem und Technisches System, siehe Abschnitt 2.1.5), Lebenszyklusphase (Herstellung, Nutzung und Entsorgung)

und Umweltwirkung (Energieverbrauch, Rohstoffverbrauch, Treibhausgaspotenzial, Sonstiges) klassifiziert. Die Ergebnisse der Bestandsaufnahme können wie folgt zusammengefasst werden:

- ▶ Kennzahlen für die Energieeffizienz der Gebäudetechnik in der Nutzungsphase sind gut erforscht, auch wenn teilweise noch eindeutige Berechnungsvorschriften und Datenerhebungskonzepte fehlen.
- ▶ Für die Bewertung der Energieeffizienz der IT in der Nutzungsphase existieren erste Vorschläge. Forschungsbedarf besteht in Bezug auf vergleichbare Nutzenindikatoren für die IT-Subsysteme Server, Datenspeichersysteme und Netzwerke und das IT-Gesamtsystem (Hardware und Software).
- ▶ Für die Nutzungsphase existieren Ansätze zur Bewertung des Treibhausgaspotenzials (THG), des Einsatzes von Wasser, der Nutzung erneuerbarer Energien und der Verwertung der Abwärme.
- ▶ Der ökologische Fußabdruck der Herstellung, der Distribution (Transport) und der Entsorgung der IT-Geräte und Gebäudetechnik wird mit den bestehenden Kennzahlen noch nicht erfasst.
- ▶ Aufwandsindikatoren für die eingesetzten Rohstoffe existieren nicht. Aussagen über die Rohstoffeffizienz können derzeit nur indirekt über Auslastungen und Lebensdauern getroffen werden.

Stand der Normung von Kennzahlen für Rechenzentren:

Mit dem Teil 4 der Norm EN 50600 über die Einrichtungen und die Infrastrukturen von Rechenzentren gibt es seit Juni 2017 einen europäischen Standard für Leistungskennzahlen im Bereich der Rechenzentren. Die europäische Normung betrachtet dabei ausschließlich die Effizienz der Gebäudetechnik. Die IT-Geräte und die Software sind nicht Gegenstand der EN 50600. Bisher wurden in der EN 50600-4 die erforderliche Messung, Berechnung und Dokumentation der Kennzahlen *Power Usage Effectiveness* (PUE) und *Renewable Energy Factor* (REF) definiert. Im Rahmen des Forschungsvorhabens dient die EN 50600-4 der standardisierten Erfassung der Energieverbräuche der Gebäudetechnik und der IT-Geräte eines Rechenzentrums in der Nutzungsphase. Die EN 50600-4 konkretisiert diesbezüglich die allgemeinen Anforderungen an die Energiemessungen in den Rechenzentren (Messkonzepte) aus den Teilen EN 50600-2-1 bis EN 50600-3.

Parallel dazu werden auch im Rahmen der in Kürze veröffentlichten internationalen Norm ISO 30134 Leistungskennzahlen für Rechenzentren entwickelt. Der Fokus der ISO 30134 ist breiter – die Effizienz der IT wird mit betrachtet. Für das Forschungsvorhaben sind vor allem die Ansätze zu den Leistungskennzahlen für die IT von Interesse. Zur Bestimmung der Energieeffizienz der Server sollen die Kennzahlen *IT Equipment Energy Efficiency for Servers* (ITEE_{sv}) und *IT Equipment Utilization for Servers* (ITEU_{sv}) zum Einsatz kommen. Zudem existiert auf der ISO-Ebene seit dem Jahr 2017 der Normungsvorschlag *ISO 21836 - Server Energy Effectiveness Metric* (SEEM). Mit diesem Normungsvorschlag gibt es einen ersten Ansatz zur standardisierten Erfassung der Energieeffizienz von Servern in Anlehnung an den *SPEC_{Power}_ssj2008*-Benchmark. Die ISO 21836 ist im Bereich der Produktnormen eingeordnet und hat daher (noch) keinen direkten Bezug zum Betrieb eines Rechenzentrums.

Normungsvorschläge zur standardisierten Erfassung der Leistungen der Datenspeichersysteme und der Netzwerke eines Rechenzentrums existieren bisher nicht. Auch die Erfassung der Rohstoffeffizienz von Rechenzentren wird in der aktuellen Normung bisher nur sehr eingeschränkt betrachtet. Hier besteht sowohl für die Gebäudetechnik, als auch für die IT-Geräte ein hoher Bedarf an Standardisierung.

Entwicklung des Kennzahlensystems

Bei der Entwicklung eines Kennzahlensystems für Rechenzentren müssen die spezifischen Merkmale von Rechenzentren berücksichtigt werden, damit die Kennzahlen in der Praxis anwendbar und vergleichbar sind. Daher wurden folgende Festlegungen getroffen:

- ▶ Die Ressourceneffizienz eines Rechenzentrums wurde als das Verhältnis der IT-Leistung (Nutzen) zur Inanspruchnahme natürlicher Ressourcen über den gesamten Lebensweg (Aufwand) definiert.

- ▶ Aufgrund der in der Praxis üblichen Betriebsformen (Colocation-Anbieter, Colocation-Kunde) und der gängigen Aufteilung der Verantwortungsbereiche (Gebäudemanagement vs. IT-Management) sollte mit dem Kennzahlensystem eine Differenzierung der Ressourceneffizienz des Rechenzentrums nach der Ressourceneffizienz der Gebäudetechnik und der Ressourceneffizienz der IT möglich sein.
- ▶ Die Ressourceneffizienz der Gebäudetechnik wurde in Anlehnung an die Energieeffizienzkennzahl *Data Center infrastructure Efficiency* (DCiE) als das Verhältnis der Ressourceninanspruchnahme der IT zu der Ressourceninanspruchnahme des Rechenzentrums über den Lebensweg definiert. Aufgrund nicht zur Verfügung stehender Informationen zum IT-Bestand wurde für Colocation-Anbieter eine Berechnungsvorschrift festgelegt, bei der an Stelle der Ressourceninanspruchnahme der IT über den Lebensweg ausschließlich der Energiebedarf der IT in der Nutzungsphase bilanziert wird.
- ▶ Für die Mischform aus Colocation und Eigenbetrieb wurden zur Bestimmung der Ressourceneffizienz des Eigenbetriebes Allokationsregeln festgelegt: Der anteilige Energiebedarf am Rechenzentrum in der Nutzungsphase wurde über die *Power Usage Effectiveness* (PUE) und dem Energiebedarf der eigenbetriebenen IT bestimmt. Die für den Eigenbetrieb anteilig anzurechnende Ressourceninanspruchnahme der Herstellung, Distribution und Entsorgung der Gebäudetechnik sowie des Wasser- und Kältemittelverbrauchs in der Nutzungsphase wurde jeweils über den Umlagefaktor „anteiliger Energiebedarf am Rechenzentrum zum Gesamtenergiebedarf des Rechenzentrums“ ermittelt.

Definition der Nutzenindikatoren

Die IT-Leistung eines Rechenzentrums kann auf verschiedenen Ebenen (Infrastruktur, Applikationen, Dienste) erfasst werden. Eine Vergleichbarkeit der IT-Leistung auf Dienst- oder Applikationsebene ist aufgrund fehlender Standards und Referenzarchitekturen in Verbindung mit einer nach wie vor hohen Individualität und Variabilität des Leistungsangebotes von Rechenzentren aktuell noch nicht möglich. Dies könnte sich in Zukunft mit weiterer Verbreitung des Cloud Computing als vereinheitlichende und konsolidierende Kraft der Branche ändern.

Für das Forschungsvorhaben wurden vergleichbare Leistungsindikatoren auf Ebene der physischen Infrastruktur bestimmt. Das heißt, es wurden Indikatoren definiert, die die von den IT-Geräten erbrachte Datenverarbeitungsleistung quantifizieren. Ein einzelner Indikator, der den Gesamtnutzen der gesamten IT-Infrastruktur aggregiert, wurde nicht festgelegt. Die Teilnutzen der Server, Datenspeichersysteme und Netzwerke sind heterogen und müssten zunächst über Normierungsfaktoren angeglichen werden. Damit verbundenen ist der Verlust an Transparenz und Objektivität. Daher wurde für das Forschungsvorhaben auf die Definition von Regeln zur Aggregation der Teilnutzen der Server, Datenspeichersysteme und Netzwerke verzichtet. Die drei Dimensionen Rechen-, Datenspeicher- und Datenübertragungsleistung wurden jeweils mit separaten Indikatoren abgebildet:

- ▶ Die *Rechenleistung* wurde erfasst, indem die Leistungsfähigkeit der Hauptprozessoren (CPU) der Server bestimmt und mit deren Auslastung im Betrieb multipliziert wird. Die Leistungsfähigkeit von 750 CPU wurde typenspezifisch durch frei verfügbare Testwerte des SPECint_rate-Benchmarks der *Standard Performance Evaluation Council* ermittelt. Im Rahmen statistischer Untersuchungen wurde gezeigt, dass es für das relative Ergebnis aufgrund geringer Abweichungen unerheblich ist, welcher der im Forschungsvorhaben untersuchten Performance-Benchmarks für die Bewertung der Leistungsfähigkeit der CPU letztlich zu Grunde gelegt wird. Der SPECint_rate-Benchmark wurde deshalb ausgewählt, weil für diesen Benchmark mit großem Abstand die meisten Testergebnisse vorliegen.
- ▶ Die *Datenspeicherleistung* eines Rechenzentrums wurde mit drei Indikatoren charakterisiert: die Anzahl und der Datendurchsatz der Lese- und Schreibvorgänge und der belegte Speicherplatz. Bei der Erfassung der Datenspeicherleistung wurde sich auf Hard Disk Drives (HDD) und Solid State Drives (SSD) basierende Datenspeichersysteme beschränkt, die einen unmittelbaren (sofortigen) Zugriff auf die gespeicherten (aktiven) Daten erlauben. Auf Magnetbändern (Tapes) und optische Medien (z. B. Blue Ray) basierende Datenspeichersysteme, die ausschließlich für die Sicherung (Backup) und Archivierung von Daten eingesetzt werden, gewähren i. d. R. keinen unmittelbaren Zugriff auf die gespeich-

cherten Daten. Diese Datenspeichersysteme haben einen vergleichsweise geringen Marktanteil, zudem einen vergleichsweise sehr geringen Stromverbrauch in der Nutzungsphase und somit keinen nennenswerten Einfluss auf die Ressourceninanspruchnahme eines Rechenzentrums. Daher wurden diese Datenspeichersysteme im Forschungsvorhaben nicht in die Betrachtung mit einbezogen.

► Für die Ermittlung der *Datenübertragungsleistung* der Netzwerke kommen grundsätzlich die Transferrate und die Latenz in Frage. Die Latenz im Netzwerk muss für Punkt zu Punkt Verbindungen gemessen werden. Davon existieren in Rechenzentren beliebig viele. Daher wurde als Indikator der Datenübertragungsleistung ausschließlich die Menge der von den Netzwerkgeräten innerhalb eines Jahres gesendeten und empfangenen Daten festgelegt. Zur weiteren Begrenzung des Messaufwandes wurde zudem bestimmt, dass nur das mit der Außenwelt über das Intranet und Internet ausgetauschte (empfangene/gesendete) Datenvolumen erfasst werden sollte.

Tabelle 1 fasst die von den RZ-Betreibern für die Ermittlung der IT-Leistung zu messenden und anzugebenden Parameter zusammen.

Tabelle 1: Eingabegrößen zur Erfassung der IT-Leistung eines Rechenzentrums

IT-Subsystem	Bezugsgröße	Eingabegrößen
Server	CPU	Modellbezeichnung
	CPU	Anzahl (-)
	CPU	Auslastung (%)
Datenspeichersystem	Gerät	Anzahl Lese- und Schreibvorgänge (Transaktionsrate) (IO/s)
	Gerät	Datendurchsatz Lese- und Schreibvorgänge (GB/s)
	Gerät	Speicherplatz belegt (GB)
Netzwerkgerät	Gerät	gesendete / empfangene Bits (extern) (Gb/s)

Eigene.

Definition der Aufwandsindikatoren

Natürliche Ressourcen dienen als Quelle für die Herstellung von Produkten oder als Senke zur Aufnahme von Emissionen. Unterteilt werden die natürlichen Ressourcen üblicherweise in die abiotischen und biotischen Rohstoffe sowie die Landnutzung. Bei Ökobilanzen wird die Inanspruchnahme der natürlichen Ressourcen durch eingabebezogene (z. B. Rohstoffverbrauch, Wasserverbrauch, Landnutzung) und ausgabebezogene (z. B. Ökotoxizität) Wirkungskategorien erfasst. Keine der existierenden Methoden der Ökobilanzierung deckt alle natürlichen Ressourcen ab.

Die aktuelle wissenschaftliche Methodik zur Bewertung der Umweltwirkungen unterscheidet in sogenannte *Midpoint*- und *Endpoint*-Methoden. Die Midpoint-Methoden bewerten die potentiellen Umweltwirkungen einer bestimmten Wirkungskategorie (z. B. abiotischer Rohstoffverbrauch (ADP), THG, Ozonzerstörungspotenzial) jeweils mit spezifischen Einheiten. Die Endpoint-Methoden bewerten die Schäden an zu definierenden Schutzgütern (z. B. an der menschlichen Gesundheit, Artenvielfalt, Schutz von Ökosystemen). Die Teilergebnisse in den Wirkungskategorien werden den Schutzgütern zugeordnet und die Umweltwirkung über Gewichtungsfaktoren und Aggregation quantifiziert. Für das Forschungsvorhaben werden nur Midpoint-Methoden verwendet, da die Gewichtungsschritte der Endpoint-Methoden auf Werthaltungen und politischen Absichtserklärungen beruhen und nicht wissenschaftlich begründet sind.

Aufgrund der Zielstellung des Forschungsvorhabens ist die Erfassung des ADP für die vorliegende Studie von besonderem Interesse. Die Indikatoren für die Bewertung der Inanspruchnahme abiotischer Rohstoffe beinhalten Mineralien und fossile Rohstoffe. Für die vorliegende Studie wurde für die Be-

rechnung des ADP die Methode des *International Reference Life Cycle Data System* (ILCD)-Handbuchs¹ ausgewählt, die auf der Methode des niederländischen *Centrum voor Milieukunde* (CML)² basiert. Die Gründe für die Auswahl sind folgende:

- ▶ Das Grundmodell für die Ermittlung der Charakterisierungsfaktoren³ basiert auf der CML-Methode, die auf einem Konsens in der Wissenschaft der Ökobilanzierung beruht und vom ILCD-Handbuch und *Product Environmental Footprint* (PEF) empfohlen wird.
- ▶ Die CML-Methode berücksichtigt die Verfügbarkeit der abiotischen Ressourcen.
- ▶ Die ILCD-Methode verwendet die aktuellsten Charakterisierungsfaktoren aus der CML-Methode (V4.7, Januar 2016).
- ▶ Die ILCD-Methode bewertet die größte Anzahl an Rohstoffen, da sie neben den 43 Charakterisierungsfaktoren der CML-Methode Charakterisierungsfaktoren für 35 weitere Rohstoffe umfasst.

Tabelle 2: Quellen für die Charakterisierungsfaktoren der ILCD-Methode

Methode	Bewertete Ressource	Charakterisierungsfaktoren
CML-Methode (V4.7, Jan.2016)	43 Rohstoffe	siehe Tabelle 70 im Anhang – CF nach förderbaren Reserven
ILCD-Handbuch (v. 1.0.10, August 2016)	16 Seltene Erden	5,69E-04 kg Sb-eq./kg _{Seltene Erden}
ILCD-Handbuch (v. 1.0.10, August 2016)	zusätzlich 19 Rohstoffe	siehe Tabelle 71 im Anhang

Eigene.

Im Rahmen der Wirkungsabschätzung dieser Studie werden folgende Wirkungskategorien betrachtet:

- ▶ Abiotischer Rohstoffverbrauch (ADP)
- ▶ Kumulierter Energieaufwand (KEA)
- ▶ Treibhausgaspotenzial (THG)
- ▶ Wasserverbrauch

Die in den Lebenszyklusphasen betrachteten Komponenten und Ressourceninanspruchnahmen sind:

- ▶ Herstellung: IT (Server, Datenspeicher und Netzwerkgeräte), Anlagen zur unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) und Batterien
- ▶ Distribution: IT, USV-Anlagen und Batterien
- ▶ Nutzung: Energie-, Kältemittel- und Wasserverbrauch des Rechenzentrums
- ▶ Entsorgung: IT, USV-Anlagen und Batterien

Als zeitliche Bezugsgröße der Bilanz ist die Nutzung eines Rechenzentrums über den Zeitraum eines Jahres definiert. Das bedeutet, die Ergebnisse zu der Ressourceninanspruchnahmen und Umweltwirkungen werden auf ein einzelnes Nutzungsjahr bezogen. Der Aufwand eines Gerätes für die Herstellung, Distribution und Entsorgung wird dazu auf die Jahre der Nutzungsdauer aufgeteilt.

Tabelle 3 fasst die von den RZ-Betreibern zur Bilanzierung des Ressourcenaufwands und der Umweltwirkungen anzugebenden Parameter zusammen.

¹ Um die Durchführung von Ökobilanzen zu vereinheitlichen, wurde im Auftrag des Joint Research Centers (JRC) der Europäischen Kommission das ILCD-Handbuch entwickelt.

² Die CML-Methode unterscheidet sich von anderen Methoden zur Ökobilanzierung durch eine breite und aktuelle Datengrundlage im Bereich der Umweltwirkungsabschätzung.

³ Mit Hilfe der Charakterisierungsfaktoren werden die zugeordneten Sachbilanzergebnisse zu einem spezifischen Wirkungsindikator aggregiert. Z. B. ist CO₂ die Referenzgröße für den Treibhauseffekt. Über die Charakterisierungsfaktoren werden jeweils die Wirkungen der betreffenden Sachbilanzergebnisse im Verhältnis zu den Referenzgrößen berechnet.

Tabelle 3: Eingabegrößen zur Bilanzierung der Ressourceninanspruchnahme und der Umweltwirkungen eines Rechenzentrums

Ausrüstung	Komponenten	Eingabegrößen	Bezugsgröße
Rack Server/ Blade Server Module	CPU	Anzahl, Modell: z. B. 1 x Intel Xeon E5420	„Die“-Fläche: z. B. 214 mm ²
	RAM	Anzahl RAM-Module (Annahme: 9 Speicherchips auf einem RAM-Modul)	Anzahl
	3,5"-HDD	Anzahl	Anzahl
	2,5"-HDD	Anzahl	Anzahl
	SSD	Anzahl	Anzahl
	Leiterplatte	Höheneinheiten der Rack Server Anzahl der Blade Server Module	Fläche
	Server	Anzahl, Gewicht	Anzahl, Gewicht
	Server	Anschaffungsdatum, Bilanzdatum ⁴	Effektive Nutzungsdauer
Blade System Gehäuse	Gehäuse	Anzahl, Gewicht	Anzahl, Gewicht
	Gehäuse	Anschaffungsdatum, Bilanzdatum	Effektive Nutzungsdauer
Datenspeichersystem	Controller Enclosure	Anzahl, Gewicht	Gewicht
	Disk Array Enclosure (DAE)	Anzahl, Gewicht	Gewicht
	3,5"-HDD	Anzahl	Anzahl
	2,5"-HDD	Anzahl	Anzahl
	SSD	Anzahl	Anzahl
	Datenspeichersystem	Anschaffungsdatum, Bilanzdatum	Effektive Nutzungsdauer
Netzwerk-Switches	Gerät	Gewicht, Anzahl	Gewicht
	Gerät	Anschaffungsdatum, Bilanzdatum	Effektive Nutzungsdauer
USV-Anlagen (≤10 kVA)	USV-Anlage	Gewicht, Anzahl	Gewicht
	USV-Anlage	Anschaffungsdatum, Bilanzdatum	Effektive Nutzungsdauer
USV-Anlagen (>10 kVA)	USV-Anlage	Gewicht, Anzahl	Gewicht
	USV-Anlage	Anschaffungsdatum, Bilanzdatum	Effektive Nutzungsdauer
USV-Batterie	Batterie	Gewicht, Anzahl	Gewicht
	Batterie	Anschaffungsdatum, Bilanzdatum	Effektive Nutzungsdauer

⁴ Das Bilanzdatum definiert den Zeitpunkt, zu dem die Bilanzierung erfolgt.

Energieversorgung: Netzstrom	Strom	Server: Stromverbrauch in kWh _{el} /a	zungsdauer kWh _{el} Strom- mix DE
		Datenspeicher: Stromverbrauch in kWh _{el} /a	
		Netzwerk: Stromverbrauch in kWh/a	
		Gebäudeinfrastruktur: Stromverbrauch in kWh _{el} /a	
Energieversorgung: Selbsterzeugung	Diesel	Jährliche Verbrauchsmenge	Liter
	Erdgas	Jährliche Verbrauchsmenge	m ³
Kältemittel	Kältemittelverluste	Typ Kältemittel	kg
		Bestandmenge	
		Typ Kälteanlage	
Wasser	Wasser	Jährlicher Wasserverbrauch	Liter

Eigene.

Zusammenführung der Indikatoren

Die Berechnung der verschiedenen Nutzen- und Aufwandsindikatoren wurden mit Hilfe des Tabellenkalkulationsprogramms MS EXCEL realisiert. In das prototypisch implementierte KPI4DCE-Tool müssen Betreiber von Rechenzentren die Informationen zum Gerätebestand, zum Energie-, Wasser-, Kältemittelverbrauch und zur IT-Leistung des Bilanzjahres in standardisierter Form eingeben. Das KPI4DCE-Tool verknüpft die Messwerte aus den Produktivrechenzentren über die entsprechenden Berechnungsvorschriften mit den Hintergrunddaten wie den Leistungswerten von 750 CPU oder den Charakterisierungsfaktoren der verschiedenen Wirkungskategorien, so dass im Ergebnis die Ressourceneffizienz Kennzahlen automatisiert berechnet werden. Mit dem KPI4DCE-Tool können die Betreiber von Rechenzentren zudem die Verteilung der Ressourceninanspruchnahme auf die einzelnen Subsysteme eines Rechenzentrums (Gebäudetechnik, Server, Datenspeicher und Netzwerke) und die Phasen des Lebenszyklus (Herstellung, Distribution, Nutzung und Entsorgung) im Detail analysieren.

Überprüfung des Kennzahlensystems und des KPI4DCE-Tool

Beurteilung der Anwendbarkeit und Ergebnisse der Fallstudien

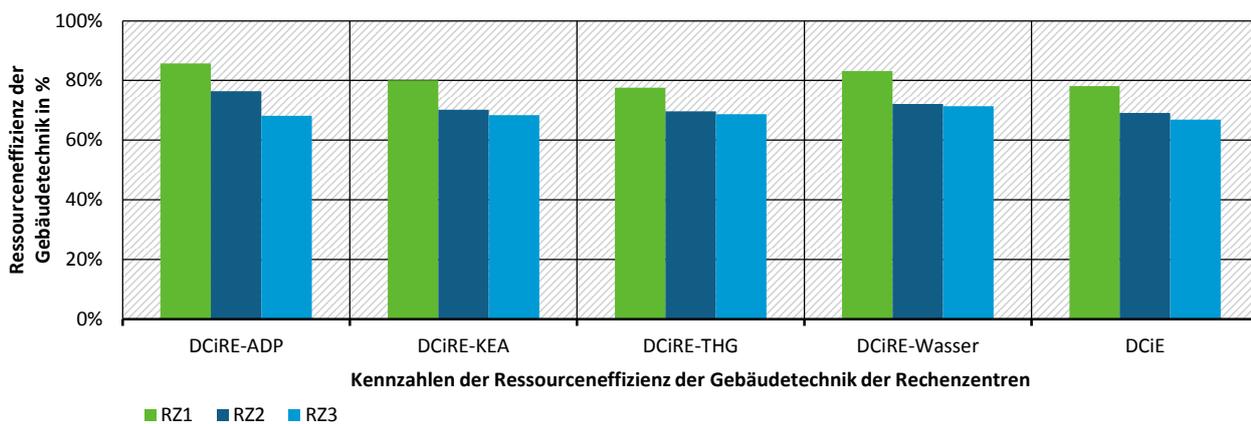
Die Anwendbarkeit des Kennzahlensystems und des KPI4DCE-Tools wurde am Beispiel von drei Rechenzentren unterschiedlicher Betreiber überprüft. Die drei Fallstudien ergaben, dass für keines der Rechenzentren alle zur Berechnung der Kennzahlen erforderlichen Messwerte zur Verfügung standen. Die vorausgesetzten Daten zum IT-Bestand (Anzahl, Modellbezeichnung, Gewicht, Datum der Inbetriebnahme etc.), zur Auslastung, zur IT-Leistung und zum Energiebedarf waren in keinem der Rechenzentren vollumfänglich in der erwarteten Granularität verfügbar. Eine für die Berechnung der Output-orientierten Kennzahlen notwendige kontinuierliche Erfassung und Speicherung der Leistungsdaten der IT-Subsysteme ist in den Rechenzentren nicht üblich. Auch die vollständige Inventarisierung aller im Rechenzentrum installierten IT-Geräte mittels Konfigurationsdatenbanken (engl.: configuration management databases, CMDB) und der Einsatz von mit verschiedensten Monitoring-Systemen vernetzten Data Center Infrastructure Management (DCIM)-Lösungen ist nicht Standard. Im

Ergebnis konnten vor allem zur Berechnung der für die Datenspeichersysteme und Datennetzwerke entwickelten Kennzahlen nur sehr wenige Bestands- und Leistungsdaten ermittelt werden.⁵

Dabei wäre die Erfassung der fehlenden Daten in jedem der Rechenzentren möglich gewesen, hätte aber die manuelle Auswertung, Vereinheitlichung und Zusammenführung von Informationen aus vielen unterschiedlichen Quellen erfordert. Dies war für die Betreiber im Rahmen des Forschungsvorhabens organisatorisch und technisch zu aufwändig. Die bestehenden Datenlücken konnten aber größtenteils über eigene Recherchen in Datenblättern und Analogiebildung geschlossen werden. Für die flächendeckende Anwendbarkeit des Kennzahlensystems in der Praxis stellen die Datenanforderungen trotz sorgfältiger Auswahl und der Beschränkung auf ein erforderliches Mindestmaß jedoch eine zentrale Herausforderung dar.

Mit Einschränkungen konnten durch die erhobenen Daten einige grundlegende Erkenntnisse gewonnen und konnten die für die Gebäudetechnik (siehe Abbildung 1), für die Server (siehe Abbildung 2) und teilweise auch für die Datenspeichersysteme (siehe Abbildung 3) entwickelten Kennzahlen berechnet werden. Die für die Rechenzentren jeweils ermittelten Kennzahlenwerte sind nicht in vollem Maße repräsentativ, da nicht nur gemessene Daten zugrunde liegen, sondern punktuell Daten über Annahmen ergänzt werden mussten, die von den tatsächlichen Gegebenheiten abweichen können. Die Annahmen wurden stets konservativ und für alle Rechenzentren möglichst einheitlich getroffen, so dass die errechneten Kennzahlenwerte trotzdem erste Anhaltspunkte bieten, in welchen Bereichen sich mögliche Benchmarks bewegen könnten.

Abbildung 1: Ressourceneffizienz der Gebäudetechnik der Rechenzentren



Eigene.

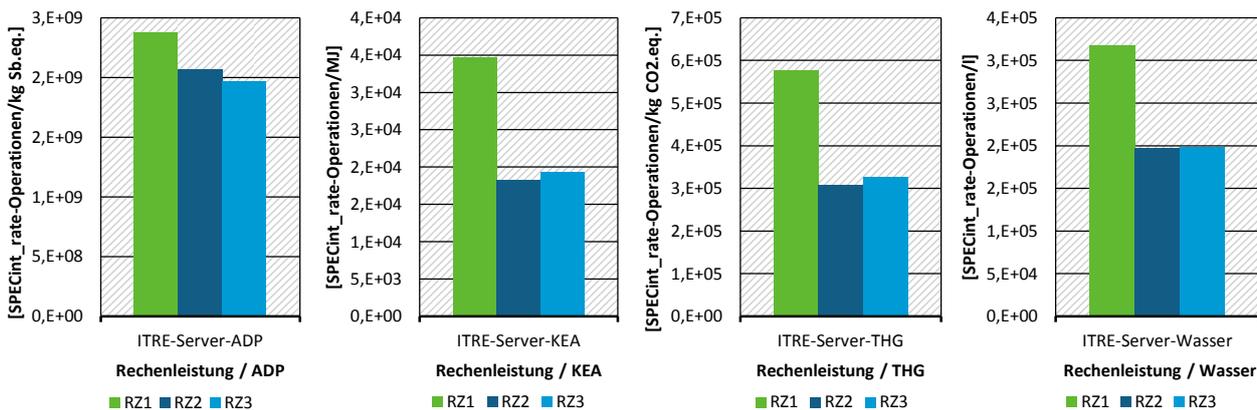
Abbildung 1 stellt die Ausprägungen der Kennzahlen zur Bewertung der Ressourceneffizienz der Gebäudetechnik von Rechenzentren über den Lebensweg und die in der Praxis etablierte DCiE zur Bewertung der Energieeffizienz der Gebäudetechnik von Rechenzentren in der Nutzungsphase für die drei Rechenzentren dar. Die vier Ressourceneffizienzkennzahlen sind jeweils definiert als Verhältnis der Ressourceninanspruchnahme der IT zur Ressourceninanspruchnahme des Rechenzentrums. Je geringer die Ressourceninanspruchnahme der Gebäudetechnik eines Rechenzentrums ausfällt, desto größer werden die Kennzahlenwerte. Ideal sind Werte von 100 Prozent. In diesem Fall nimmt die Gebäudetechnik eines Rechenzentrums keine Ressourcen in Anspruch bzw. die für ein Rechenzentrum bilanzierte Ressourceninanspruchnahme entfällt vollständig auf die IT. Deutlich wird in Abbildung 1, dass die Gebäudetechnik des RZ1 im Vergleich zu RZ2 und RZ3 in allen betrachteten Umweltwir-

⁵ Leistungsdaten der Datenspeichersysteme, wie die Anzahl und der Datendurchsatz der Lese- und Schreiboperationen, und Netzwerkgeräte, wie die Datenübertragungsraten, sind verfügbar, aber überprüfen die Betreiber bisher meist nur dann, wenn es zu besonderen Ereignissen und unplanmäßigen Engpässen kommt, die die Verfügbarkeit beeinträchtigen.

kungskategorien die höchste Ressourceneffizienz aufweist. Ersichtlich ist auch, dass die DCiE stets einen geringeren Wert als die anderen Ressourceneffizienzkennzahlen aufweist.

Abbildung 2 stellt die Ausprägungen der vier Kennzahlen zur Bewertung der Ressourceneffizienz der Server über den Lebensweg für die Rechenzentren dar. Die vier Ressourceneffizienzkennzahlen sind jeweils definiert als das Verhältnis der im Betrieb von den CPU der Server erbrachten Rechenleistung und der Ressourceninanspruchnahme der Server über den gesamten Lebensweg. Je größer die Kennzahlenwerte ausfallen, desto besser ist die Ressourceneffizienz in Bezug auf die im Rechenzentrum betriebenen Server. Die Server des RZ1 weisen in den vier betrachteten Wirkungskategorien jeweils die höchste Ressourceneffizienz auf, wohingegen RZ2 und RZ3 vergleichbare Werte erreichen.

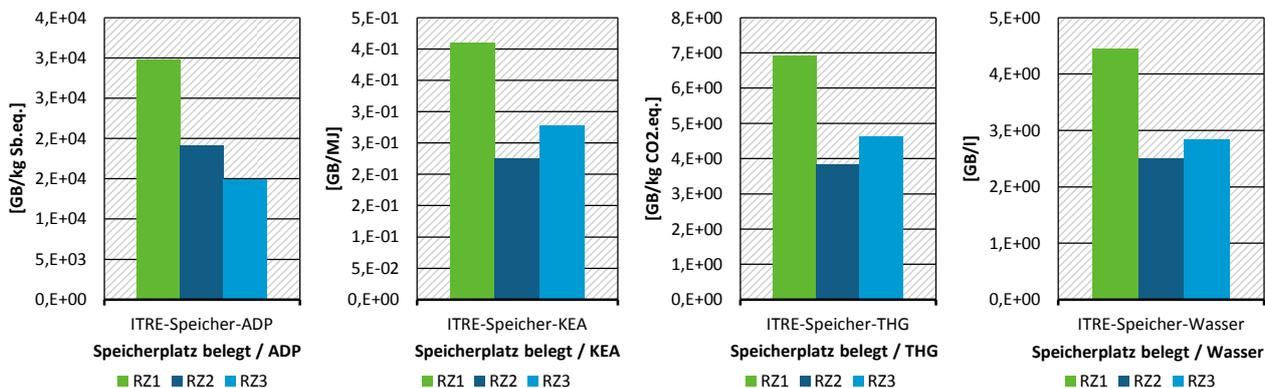
Abbildung 2: Ressourceneffizienz der Server der Rechenzentren



Eigene.

Aufgrund fehlender Informationen zu der Anzahl und zum Datenvolumen der Lese- und Schreibvorgänge der Datenspeichersysteme und der Unmöglichkeit, diesbezüglich ohne Anhaltspunkte plausible Annahmen zu treffen, konnten für den IT-Leistungsbereich Datenspeicherung nur Ressourceneffizienzkennzahlen in Hinblick auf den belegten Speicherplatz berechnet werden. Abbildung 3 zeigt die Ausprägungen der vier entwickelten Kennzahlen zur Bewertung der Ressourceneffizienz der Datenspeicher in Bezug auf den belegten Speicherplatz für die drei untersuchten Rechenzentren. Die Ressourceneffizienzkennzahlen sind jeweils definiert als das Verhältnis des belegten Speicherplatzes im Rechenzentrum zur Ressourceninanspruchnahme der Datenspeicher über den Lebensweg. Auch hier erreicht das RZ1 gegenüber RZ2 und RZ3 die höchsten (und damit besten) Werte. Dies liegt daran, dass für das RZ1 überwiegend kapazitätsoptimierte Festplatten bilanziert wurden, die einen geringeren Strombedarf und eine höhere Speicherkapazität pro Festplatte haben.

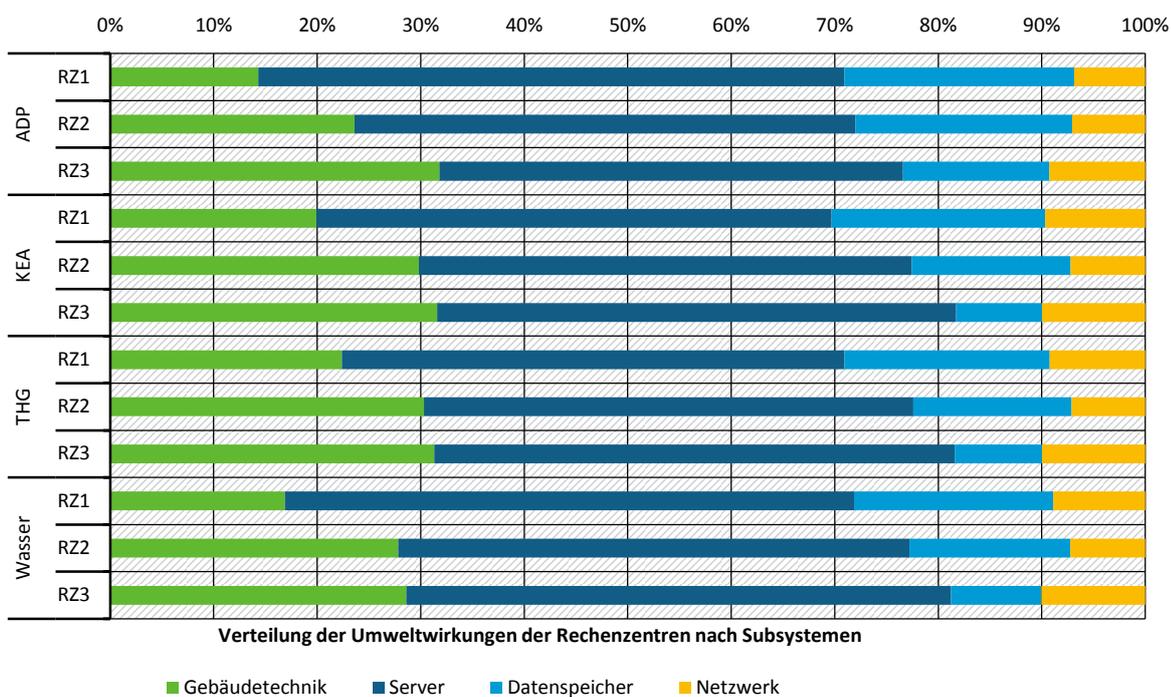
Abbildung 3: Ressourceneffizienz der Datenspeichersysteme der Rechenzentren



Eigene.

Neben den Ressourceneffizienzkennzahlen errechnet das KPI4DCE-Tool die Verteilungen der Ressourceninanspruchnahme eines Rechenzentrums nach Subsystemen und Lebenszyklusphasen. Abbildung 4 zeigt die relative Verteilung der Ressourceninanspruchnahme auf die Subsysteme der Rechenzentren. Während bei allen Rechenzentren in allen Wirkungskategorien die Server die meisten und die Netzwerke die wenigsten Ressourcen in Anspruch nehmen, ergibt sich bei der Gebäudetechnik und den Datenspeichersystemen ein heterogenes Bild. Hier ist entscheidend, welches Rechenzentrum und welche Wirkungskategorie betrachtet werden.

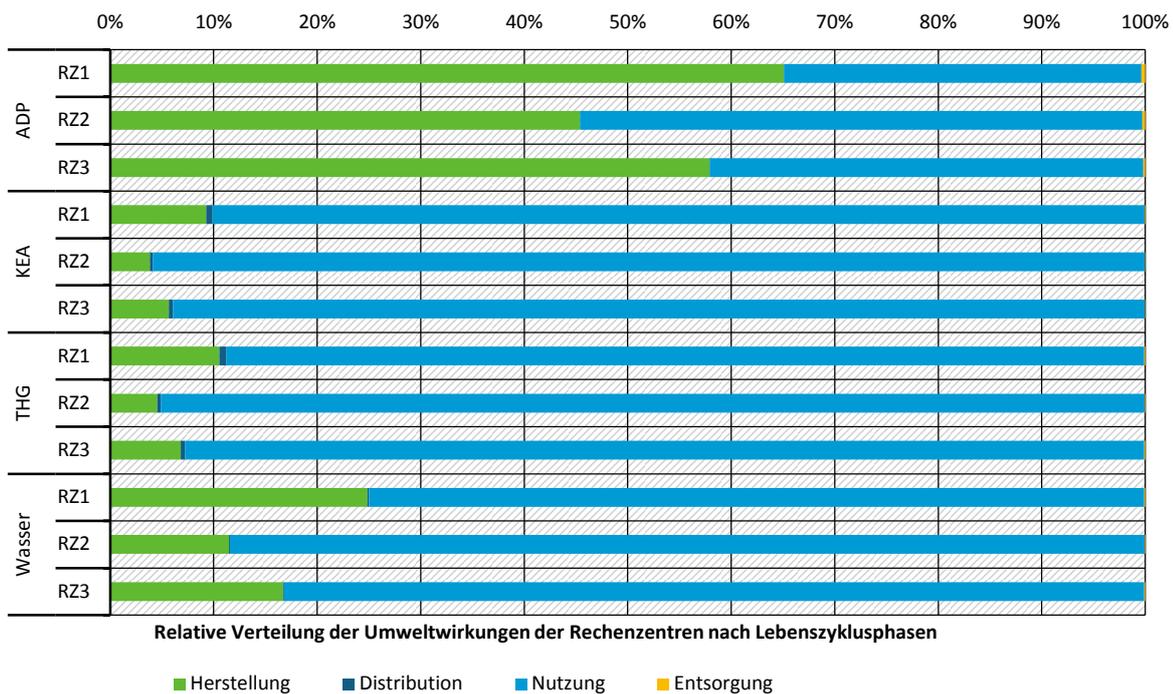
Abbildung 4: Relative Verteilung der Umweltwirkungen der Rechenzentren nach Subsystemen



Eigene.

Abbildung 5 stellt die relative Verteilung der Ressourceninanspruchnahme der drei Rechenzentren nach den Lebenszyklusphasen dar. Deutlich wird, dass die Ressourceninanspruchnahmen der Distribution und Entsorgung im Vergleich zur Herstellung und Nutzung keinen relevanten Einfluss haben und vernachlässigbar sind. Die Berechnungsvorschriften der Kennzahlen und das KPI4DCE-Tool kann dahingehend vereinfacht werden. Die Herstellung hat bei üblichen Nutzungsdauern der IT (drei bis fünf Jahre) den größten Anteil am ADP. Steigende Lebensdauern führen zu einem abnehmenden, verringerte Lebensdauern zu einem höheren Anteil der Ressourceninanspruchnahme der Herstellung. Im Gegenzug hat die Nutzungsphase bei den drei Rechenzentren einen Anteil am KEA und THG von jeweils über 90 Prozent. Die Herstellung spielt für den KEA und das THG bei üblichen Nutzungsdauern eine untergeordnete Rolle. Steigende Lebensdauern führen zu einem höheren Anteil, verringerte Lebensdauern zu einem geringeren Anteil der Nutzungsphase am KEA und THG. Beim Wasserverbrauch (Wasser) dominiert ebenfalls die Nutzungsphase gegenüber der Herstellungsphase mit Werten zwischen 75 Prozent und 88 Prozent. Da keines der Rechenzentren Adiabate Kühlung betreibt, ist der Wasserverbrauch der Rechenzentren in der Nutzungsphase ausschließlich auf die Erzeugung des zum Betrieb der Rechenzentren erforderlichen Stroms zurückzuführen. Die Wasserverbräuche der Distributions- und Entsorgungsphase sind vernachlässigbar.

Abbildung 5: Verteilung der Umweltwirkungen der Rechenzentren nach Lebenszyklusphasen



Eigene.

Keines der Rechenzentren betreibt eigene Anlagen zur dauerhaften Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien oder mittels Erdgas oder Diesel. Daher gleichen sich die relativen Verteilungen des KEA und des THG der drei Rechenzentren in Abbildung 4 und Abbildung 5.

Beurteilung der Richtungssicherheit und Robustheit der Kennzahlen

Durch die drei Fallbeispiele waren Aussagen über die Richtungssicherheit und die Robustheit des Kennzahlensystems nur eingeschränkt möglich. Diesbezüglich könnte eine Folgestudie mit der Erfassung von Daten für eine Vielzahl an Rechenzentren unterschiedlicher Größe und mit verschiedenen Ausstattungsvarianten und Betriebsmodellen für weitere Klarheit sorgen. Basierend auf den zur Verfügung stehenden Datensätzen wurden aber einige zentrale Aspekte wie verschiedene Auslastungen und Lebensdauern von IT-Geräten simuliert, die die Ressourceneffizienz bzw. die Ausprägung der Kennzahlen unterschiedlich beeinflussen. Hierbei zeigten sich die folgenden Wirkungsketten:

- ▶ Höhere Auslastungen des IT-Bestandes (CPU, Speicherplatz) führen immer zu einer höheren Ressourceneffizienz der Rechenzentren, da eine höhere IT-Auslastung gleichbedeutend mit einer höheren IT-Leistung ist und der IT-Energieverbrauch in der Nutzungsphase aufgrund des hohen statischen Stromverbrauchs in Relation zur Auslastung stets geringfügiger ansteigt. Durch die ganzheitliche Betrachtung der Ressourceninanspruchnahme über den Lebensweg wirken sich daher große Überkapazitäten negativer aus, als wenn nur der Energieverbrauch in der Nutzungsphase betrachtet wird.
- ▶ Eine verlängerte Lebensdauer der IT-Geräte führt gegenüber kürzeren Erneuerungszyklen in der Gesamtbilanz i. d. R. zu einer höheren Rohstoffeffizienz (geringerer ADP). Der Verbrauch fossiler Brennstoffe für die Energiebereitstellung in der Nutzungsphase geht in die Berechnung des ADP mit ein. Daher kann es zur Verbesserung der Rohstoffeffizienz aber unter Umständen doch auch sinnvoll sein, sehr (alte) ineffiziente Geräte durch (neuere) sehr energieeffiziente IT-Geräte zu ersetzen.
- ▶ Für den KEA und das THG ist vor allem der Stromverbrauch in der Nutzungsphase entscheidend. Kürzere Erneuerungszyklen der IT-Geräte wirken sich daher positiv auf den KEA und das THG aus,

sofern eine Mindestlebensdauer nicht unterschritten wird, die Verbesserung der Energieeffizienz neuer Generationen von IT-Geräten wie bisher auf hohem Niveau bleibt und die IT-Geräte in den Rechenzentren weiterhin rund um die Uhr betrieben werden. Verbesserungen der energetischen Wirkungsgrade gebäudetechnischer Anlagen fallen von Generation zu Generation hingegen vergleichsweise gering aus, so dass hier möglichst hohe Lebensdauern anzustreben sind.

Kritische Würdigung der Leistungsindikatoren

In Bezug auf die Richtungssicherheit und Robustheit der definierten Leistungsindikatoren, die den Nutzen des Rechenzentrums beschreiben, lassen sich folgende Kernaussagen treffen:

- ▶ Leistungsindikator für Server: Das *Rechenleistungsvermögen* der Server kann über die mit dem SPECint_rate-Benchmark modellierten Leistungswerte für über 750 CPU-Typen sehr gut erfasst werden. Mit dieser Anzahl an CPU-Typen wird eine hohe Marktabdeckung erreicht. In Verbindung mit der im Betrieb gemessenen Auslastung der CPUs kann die Rechenleistung der Server in einem vergleichbaren Maßstab bestimmt werden. Rechenleistungen, die andere Komponenten (z. B. Co-Prozessoren auf Grafikkarten) erbringen, können mit dem bestehenden Ansatz noch nicht ermittelt werden. Dies spielt für die meisten Rechenzentren keine Rolle. Im Bereich des High Performance Computing (HPC) wird die Leistungserweiterung über Co-Prozessoren aber zunehmend wichtiger. Daher sollte der Ansatz für diesen Anwendungsbereich ggfs. weiterentwickelt werden.
- ▶ Leistungsindikatoren für Datenspeichersysteme: Die Indikatoren zur Bemessung der *Datenspeicherleistung* sollten jeweils pro Datenspeichersystem erfasst werden, um entscheiden zu können, inwiefern eine aggregierte Betrachtung der Datenspeichersysteme ausreichend oder ob eine Differenzierung nach Anwendungsbereich ratsam ist. Mangels Messwerten konnten diesbezüglich keine Aussagen getroffen werden. Weiterhin berücksichtigen die Leistungsindikatoren nicht alle Eigenschaften von Datenspeichersystemen: Die lange Nutzbarkeit der Speichermedien, die schnelle Wiederherstellbarkeit von Daten oder die Schutzmechanismen gegen Datenverlust werden mit den Indikatoren nicht erfasst. Datenspeicherleistungen, die von den Servern erbracht werden, werden ebenfalls nicht abgebildet. Tatsächlich sind Server und Datenspeichersysteme in der Praxis oft schwer voneinander abgrenzbar, so dass eine eindeutige Definition (z. B. auf der Basis einer Mindestanzahl von Speichermedien) getroffen oder die Datenspeicherleistung der Server grundsätzlich mit erfasst werden muss.
- ▶ Leistungsindikator für Netzwerke: Um die *Datenübertragungsleistung* der Netzwerke zu bewerten, sollte der Datenaustausch mit IT-Systemen außerhalb des betrachteten Rechenzentrums und seiner unmittelbaren Infrastruktur gemessen werden. Der rechenzentrumsinterne Datenverkehr zwischen den Servern und den Datenspeichersystemen und den Netzwerkgeräten selbst wird dabei nicht erfasst. Für Netzwerke bestimmter Rechenzentren, die nur sehr wenige Daten mit der Außenwelt austauschen, aber im Gegenzug einen sehr hohen internen Datenverkehr haben, kann dieser Leistungsindikator daher wenig aussagekräftig sein.
- ▶ Leistungsindikatoren allgemein: Die definierten Leistungsindikatoren unterscheiden nicht zwischen der IT-Leistung und der „nützlichen“ IT-Leistung. Jede Rechenoperation einer CPU, jede gespeicherte Datei und jedes mit der Außenwelt ausgetauschte Bit wird als „nützlich“ interpretiert und beeinflusst die Ausprägung der Kennzahlen positiv. Tatsächlich werden in Rechenzentren aus verschiedenen Gründen Daten ungewollt doppelt abgelegt, Rechenoperationen wiederholt ausgeführt und die gleichen Daten nochmals übertragen, ohne einen zusätzlichen Nutzen zu stiften. Die Indikatoren messen demnach, wieviel Leistung die IT-Geräte erbringen, nicht aber inwiefern die erbrachte Leistung der IT-Geräte aus Anwendersicht nützlich ist.

Kritische Würdigung der Ressourcenaufwandsindikatoren

In Bezug auf die Richtungssicherheit und Robustheit der definierten Aufwandsindikatoren, die den Aufwand zur Herstellung, Distribution und Entsorgung sowie zum Betrieb des Rechenzentrums beschreiben, lassen sich folgende Kernaussagen treffen:

- ▶ Die Berechnung des Aufwands zur Herstellung, Distribution und Entsorgung der IT-Geräte wurde bewusst einfach gehalten, damit die Anwender des KPI4DCE-Tools (i. d. R. die Betreiber der Rechenzentren) nur wenige Daten liefern müssen und diese im Optimalfall direkt aus ihrer CMDB exportieren können. Solche Daten sind bspw. die Anzahl und Gewicht von Komponenten, Speicherkapazitäten oder CPU-Typen. Diese Vereinfachungen erfolgten auf Kosten der Vollständigkeit und Genauigkeit der Berechnungsergebnisse. Die überschlägige Berechnung des Ressourcenaufwandes kann daher eine vollständige Ökobilanz nicht ersetzen.
- ▶ Die verwendeten Datensätze stellen jeweils einen statischen Stand der Fertigungstechnik dar. Es wird nicht nach veralteten und modernen Fertigungstechniken unterschieden. Bspw. wird der Herstellungsaufwand von CPUs über deren Siliziumfläche („Die“-Fläche) approximiert, ohne das Herstellungsjahr zu berücksichtigen. Aufgrund der Verfügbarkeit können außerdem i. d. R. nur ältere Datensätze zu Fertigungstechnologien und Herstellungsprozessen berücksichtigt werden (bspw. SSD-Fertigung aus dem Jahr 2011). Dies führt wegen zwischenzeitlich stattgefundenener Effizienzsteigerungen zu einer regelmäßigen Überbewertung des Ressourcenaufwandes der Herstellung.
- ▶ Der Ressourcenaufwand zur Herstellung, Distribution und Entsorgung bezieht sich nur auf die aus Ressourcensicht relevantesten Komponenten im Rechenzentrum. Dies sind die IT-Geräte sowie die USV-Anlagen inklusive der Batterien. Komponenten mit einer untergeordneten (kleiner zehn Prozent) Bedeutung für die Gesamtbilanz, wie die übrige Gebäudetechnik, gehen nicht in die Bilanz ein.
- ▶ Anders als beim Ressourcenaufwand zur Herstellung, Distribution und Entsorgung sieht es bei der Nutzungsphase des Rechenzentrums aus. Hier gehen der Energie-, Wasser- und Kältemittelverbrauch des gesamten Rechenzentrums in die Bilanzierung ein. Beim Energie- und Wasserverbrauch handelt es sich um tatsächliche Messwerte des Betreibers, beim Kältemittelverbrauch um eine Abschätzung auf Grundlage der gemessenen Kältemittelfüllmenge. Die Nutzungsphase wird dadurch sehr genau bilanziert und führt zu robusten Ergebnissen.
- ▶ Die Ergebnisse der Ressourceninanspruchnahme und der Umweltwirkungen der untersuchten Rechenzentren nach Lebenszyklusphase (siehe Abbildung 5) machen deutlich, dass zumindest bei den Indikatoren KEA, THG und Wasser die Nutzungsphase den überwiegenden Einfluss auf das Gesamtergebnis hat. Für die Genauigkeit der Ergebnisse bedeutet dies, dass Ungenauigkeiten in den übrigen Lebenszyklusphasen (Herstellung, Distribution und Entsorgung) nur einen geringen Einfluss auf das Gesamtergebnis haben. Bei den Ergebnissen des ADP sind die Ungenauigkeiten jedoch relevant und sollten zukünftig weiter reduziert werden.
- ▶ Für die Aufwandsindikatoren kann zusammenfassend ausgesagt werden, dass sie in ihrer quantitativen Größe noch mit gewissen Unsicherheiten behaftet sind (insbesondere ADP). Die Ergebnisse sind aber richtungssicher, d. h. sie eignen sich dazu, Aussagen darüber zu treffen, welche Teilbereiche des Rechenzentrums in welchem Umfang zum Ressourcenverbrauch beitragen.

Empfehlungen zur Verwendung der Ergebnisse

Empfehlungen für die Normung

Für die Betrachtung des *Ressourcenaufwandes* können der ADP, der KEA und das THG für die weitere Verwendung in der internationalen Normung empfohlen werden. Der ADP scheint gut geeignet, um noch nicht abgedeckte Bereiche des Ressourcenaufwandes zu adressieren. Denn bisher wird die Aufwandseite in der Normung nur über den Strombedarf des Rechenzentrums abgebildet. Der ADP erfüllt bereits fast alle Voraussetzungen für die Standardisierung. Die allgemeine Berechnungsvorschrift für

den ADP ist in der ISO 14040 dargestellt und müsste für Rechenzentren angepasst bzw. erweitert werden. Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens bilden dafür eine gute Grundlage. Die technische Machbarkeit und die Methodik wurden anhand von drei Rechenzentren ebenfalls nachgewiesen. Es müsste noch geprüft werden, ob die im Forschungsvorhaben genutzten Datenbanken (ecoinvent, ProBas) die Anforderungen an die Normung erfüllen können.

Auch für das THG sollte die spezifische Ausrichtung auf den Betrieb von Rechenzentren herausgearbeitet werden, um den Indikator gegenüber dem allgemeinen Normungsansatz des „Carbon Footprinting“ abzugrenzen. Für die Betrachtung der CO₂-Emissionen gibt es in der Normung mit der *Carbon Usage Effectiveness* (CUE) bereits einen Ansatz, der sich aber auf den Strombedarf eines Rechenzentrums beschränkt. Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens verdeutlichen, dass das THG über die tatsächliche Lebensdauer die Umweltwirkungen eines Rechenzentrums besser darstellt.

Im Bereich der *Leistungsindikatoren* existiert auf internationaler Ebene schon ein Ansatz zur standardisierten Erfassung der Leistung der Server im Rechenzentrum. Der aktuelle Ansatz der ISO 30134 mit den Kennwerten ITEE_{SV} und ITEU_{SV} in Verbindung mit der ISO 21836 (SEEM) findet breiten Zuspruch unter Normungsexperten. Die Messmethoden und Berechnungsvorschriften sind über den *SPECPower_ssj2008*-Benchmark erprobt und anerkannt. Der Vorteil in der praktischen Anwendung ist, dass die Messungen von den Betreibern und Herstellern mit der gleichen Messmethode durchgeführt werden können. Der Nachteil ist, dass mit dieser Methode keine kontinuierliche Messung der erbrachten Serverleistung möglich ist. Hier könnte der entwickelte Ansatz zur Bestimmung des Rechenleistungsvermögens der Server über CPU-spezifische *SPECint_rate*-Werte in Verbindung mit der kontinuierlichen Messung der CPU-Auslastung einen Mehrwert bieten. Dafür müsste für die Messung der CPU-Auslastung aber eine allgemeingültige Vergleichbarkeit nach einem definierten Standard erreicht werden. Für die praktische Umsetzung und damit die Normungsrelevanz könnte der große Aufwand der Datenerfassung nachteilig sein. Damit der entwickelte Ansatz in die ISO 30134/ISO 21836 eingebunden werden kann, müsste zunächst ein deutlicher Mehrwert für den Betreiber nachgewiesen werden, der den größeren Aufwand der Datenerfassung rechtfertigt. Zum aktuellen Stand könnte der entwickelte Ansatz als Ergänzung/Variante innerhalb des ITEU_{SV} bzw. ITEE_{SV} vorgeschlagen werden. Ein Vorschlag als Einzelindikator erscheint aufgrund großer inhaltlicher Überschneidungen mit der ISO 31034 wenig aussichtsreich.

Für den vorgeschlagenen *Gesamtansatz* eines Kennwertes, der den Aufwand über die Ressourceninanspruchnahme und den Nutzen über die Leistungsindikatoren verbindet, ist der aktuelle Stand der Technik noch nicht ausreichend erprobt. Es fehlen an vielen Stellen noch wesentliche Voraussetzungen für die Standardisierung. Insbesondere die Erprobung der hier wissenschaftlich beschriebenen Methode für die Einzelmessungen im Betrieb eines Rechenzentrums über einen längeren Zeitraum fehlt noch. Auch die Untersuchung der wesentlichen Einflussfaktoren mit ihren Wechselwirkungen sollte über eine detaillierte Sensitivitätsanalyse anhand realer Betriebsdaten von Rechenzentren durchgeführt werden. Auf der anderen Seite erscheint auch der aktuelle Stand der Normung noch nicht reif für eine solche übergeordnete Kennzahl.

Zusammenfassend kann als Empfehlung für die Normung formuliert werden:

Im Rahmen der ersten Ergebnisverwertung wurden die hier untersuchten Indikatoren ADP, KEA und THG bereits für die EU-weite Normung dem *TC 215 CENELC* für die EN 50600-4 bzw. EN 50600-99 vorgeschlagen; der Vorschlag wurde auch grundsätzlich angenommen. Anschließend sollten diese Indikatoren im Rahmen der ISO 30134 vorgeschlagen werden. Dieses Vorgehen hat sich bei der EN 50600 bewährt. Der Vorteil liegt in der kürzeren Umsetzungszeit im Rahmen der EU-Normung im Vergleich zur weltweiten ISO-Normung. Wenn die Standards für die Indikatoren zum Ressourcenaufwand und für die Leistungsindikatoren abgestimmt und konsensfähig sind, könnte der hier betrachtete Ansatz zur Gesamteffizienz auch für die internationale Normung als übergeordneter Kennwert als Kombination abgestimmter, standardisierter und erprobter Indikatoren vorgeschlagen werden.

Empfehlungen für den Blauer Engel

Das KPI4DCE-Tool zur Anwendung der Ressourceneffizienz-Methodik wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens als wissenschaftlicher Prototyp entwickelt. Damit es im Rahmen eines Umweltzeichens durch die Betreiber von Rechenzentren genutzt werden kann, sollte das KPI4DCE-Tool zu einem Ressourcen-Monitoring-Tool weiterentwickelt werden. Die Weiterentwicklung des bestehenden KPI4DCE-Tools sollte mindestens die folgenden Punkte umfassen:

- ▶ Einfachere Bedienbarkeit: Schutz vor Fehlbedienung, Hinterlegung von Vorgabewerten, Vorgabe verschiedener Rechenzentrumskonzepte, Plausibilitätsprüfungen bei der Eingabe.
- ▶ Optimierte Struktur: Modularer Aufbau, Erweiterungsmöglichkeit von Datensätzen und Infrastrukturkomponenten, transparentere Datenverknüpfungen, Einbezug anwendereigener Datensätze.
- ▶ Möglichkeiten zur Pflege der enthaltenen Datenbasis (z. B. Kenndaten zu Prozessoren usw.)
- ▶ Ausbau der Auswertungsmöglichkeiten (z. B. auf IT-Anwendungsebene) und Optimierungswerkzeuge (z. B. Sensitivitätsanalysen), grafische Ergebnisdarstellung, Export von Berichten.
- ▶ Kompatibilität zu anderen Monitoring-Instrumenten: Datenimport aus CMDB, Möglichkeiten zum Datenexport, Harmonisierung mit Systemen zur Planung nachhaltiger Bauwerke (z. B. Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude).
- ▶ Erstellung eines Handbuchs für die Anwendung des Ressourcen-Monitoring-Werkzeugs.

Zusammenfassend kann als Empfehlung für das Umweltzeichen Blauer Engel formuliert werden:

- ▶ Weiterentwicklung des KPI4DCE-Tool zu einem Ressourcen-Monitoring-Tool
- ▶ Einführung eines verbindlichen Ressourcen-Monitorings beim Umweltzeichen
- ▶ Berechnung von Ressourceneffizienzkennzahlen für die beteiligten Rechenzentren
- ▶ Bereitstellung dieser Daten an das Umweltbundesamt zur Weiterentwicklung der Berechnungsmethodik und des Umweltzeichens, ggf. verpflichtende Veröffentlichung ausgewählter Kennzahlen durch den Nutzer des Umweltzeichens

Forschungsbedarf

Weiterentwicklung der Hintergrundmodelle für die Erfassung des Ressourcenaufwands

Bei der Modellierung der Ressourceninanspruchnahme durch das RZ wurden Annahmen getroffen. Die Annahmen beeinflussen die Ergebnisse und können Ausstattungsvarianten von RZ benachteiligen. Als Beispiel sei die Modellierung der Blade Systeme angeführt, bei denen für alle Blade Server Module eine einheitliche Größe der Leiterplatte angenommen wurde. In der Realität existieren verschiedene Größenklassen, so dass für ein RZ mit Blade Server Modulen eines kleineren Formfaktors eine zu große Inanspruchnahme von Ressourcen bilanziert wird. Ziel eines Forschungsvorhabens sollte es sein, eine verbesserte Datengrundlage für die IT-Geräte, Gebäudetechnik, Ökobilanz-Datensätze, Performance-Benchmarks, RZ-Architekturen, Auslastungsdaten und Vorgabewerte zu schaffen. Im Ergebnis sollten alle getroffenen Annahmen überprüft, das Ressourcenaufwandsmodell verfeinert und ggfs. um bisher nicht betrachtete Komponenten der Gebäudetechnik erweitert werden.

Weiterentwicklung der Indikatoren zur Erfassung der Leistung der Datenspeichersysteme

Das Kennzahlensystem erfasst die Leistung der Datenspeichersysteme mit drei Indikatoren, die jeweils der Ressourceninanspruchnahme der gesamten Datenspeichersysteme gegenübergestellt werden. Da durch die Fallstudien keine verlässlichen Daten zur vertiefenden Analyse zur Verfügung standen, sollte sich ein Forschungsvorhaben im Detail mit der Erfassung der Ressourceneffizienz der Datenspeichersysteme befassen. Basierend auf einer trennscharfen Definition des Begriffs Datenspeichersysteme und einer feingranularen Erfassung der Leistungsindikatoren für abgrenzbare Anwendungsbereiche sollte untersucht werden, ob die Anzahl der Indikatoren reduziert werden kann oder es

notwendig ist, den Ansatz nach Anwendungsbereich der Datenspeichersysteme zu differenzieren. Auch sollte untersucht werden, wie die Latenz der Datenspeichersysteme in die Leistungsindikatoren Anzahl und Datendurchsatz der Lese- und Schreiboperationen einfließen kann und wie der Leistungsindikator belegter Speicherplatz die Anwendung von ressourcenschonenden Mechanismen zur Reduktion der Menge insgesamt gespeicherter Daten (Stichwort: Deduplizierung) abbilden kann.

Anpassung des KPI4DCE-Indikatorensatzes für HPC-Systeme

Für das HPC konstruierte IT-Systeme dienen der performanten Abarbeitung komplexer Rechenaufgaben. Hierbei kommt es auf das optimale Zusammenspiel der über ein extrem schnelles Netzwerk miteinander verbundenen Rechen- und Speicherknoten an. Da HPC-Systeme für die Gesamtheit der Rechenzentren eine untergeordnete Rolle spielen, wurden sie in diesem Forschungsvorhaben nicht gesondert betrachtet. In Hinblick auf die Richtungssicherheit des Indikatorensatzes sollte die Ressourceneffizienz der HPC-Systeme nicht für einzelne IT-Subsysteme, sondern auf Ebene des Gesamtsystems z. B. mit dem *LINPACK*-Benchmark bewertet werden. Zudem kommen zusätzliche Management-Komponenten und Hardwarebeschleuniger (z. B. Grafikprozessoren) zum Einsatz, die mit dem Modell zur Erfassung der Ressourceninanspruchnahme nicht abgebildet werden. Da HPC-Systeme in Zukunft sehr wahrscheinlich eine größere Verbreitung finden werden, ist eine diesbezügliche Anpassung des KPI4DCE-Indikatorensatzes und Erprobung der Methodik an realen HPC-Systemen empfehlenswert.

Erweiterung des KPI4DCE-Indikatorensatzes um Kosteneffizienz

Der KPI4DCE-Indikatorensatz fokussiert derzeit ausschließlich die Bewertung der Effizienz der Inanspruchnahme natürlicher Ressourcen. In der Praxis interessieren Betreiber von Rechenzentren vor allem auch finanzielle Aspekte, wie Kosten und Gewinn. Während der Gewinn von den Preisen der angebotenen Dienste abhängt, die je nach Wettbewerb und Zusatzdiensten variieren können, könnte ein zukünftiges Forschungsvorhaben den KPI4DCE-Indikatorensatz auf Basis eines Modells zur Erfassung der Lebenszykluskosten um Kennzahlen zur Erfassung der Kosteneffizienz erweitern. Aus umweltwissenschaftlicher Sicht ist vor allem interessant, ob und wie die verschiedenen Dimensionen der Effizienz zueinander in Beziehung stehen. Das heißt eine hohe Kosteneffizienz sollte idealerweise mit einer geringen Inanspruchnahme von Rohstoffen und einer hohen Energieeffizienz einhergehen.

Durchführung einer Feldstudie zur Generierung von Benchmarks für die Kennzahlen

Die untersuchten Rechenzentren haben gezeigt, dass die Messung der Indikatoren möglich ist, die flächendeckende Erhebung aller erforderlichen Daten für die Rechenzentren aber eine Herausforderung darstellt. Daher mussten zur Vervollständigung der Datensätze Annahmen getroffen und Abschätzungen vorgenommen werden. Trotzdem konnten nicht alle spezifizierten Kennzahlen berechnet werden. Unabhängig davon sind drei Fallbeispiele nicht ausreichend, um Benchmarks für den Blauen Engel zu bestimmen. Somit ist es erforderlich, den Indikatorensatz für weitere Rechenzentren möglichst vollständig zu erheben. Die Rechenzentren sollten sich in Größe und Kernaufgaben voneinander unterscheiden. Idealerweise setzen die in einer solchen Feldstudie betrachteten Rechenzentren jeweils eine technische oder prozedurale Innovation zur Steigerung der Ressourceneffizienz um, so dass die Wirkungen von Best Practices auf die Ausprägung der Kennzahlen untersucht werden können.

Entwicklung einer Methode zur Bewertung der Ressourceneffizienz von Public Cloud Diensten

Die in diesem Vorhaben entwickelten Kennzahlen erfassen die Ressourceneffizienz der IT auf Ebene der physischen Infrastruktur. Sie erlauben eine Bewertung, ob die IT-Geräte ressourceneffizient arbeiten. Inwiefern die Applikationen und Dienste mit den IT-Geräten ressourcenschonend bereitgestellt werden, kann mit dem Indikatorensatz nicht beurteilt werden. Hierzu müsste nicht die IT-Leistung der Server, Datenspeicher und Netzwerke auf Infrastrukturebene erfasst werden, sondern die Menge der bereitgestellten Instanzen der IT-Dienste. IT-Dienste aus Public Clouds mit hohen Volumina und hohem Grad an Standardisierung bieten eine Möglichkeit, die Methodik dahingehend weiterzuentwi-

ckeln. Ziel eines Forschungsvorhabens könnte es sein, Berechnungsvorschriften und Allokationsregeln zu definieren, mit denen in standardisierter Form die Inanspruchnahme von Ressourcen pro Instanz eines IT-Dienstes ermittelt werden kann. Die Methodik könnte beispielhaft auf ausgewählte Cloud Dienste verschiedener Anbieter angewendet werden und idealerweise die Ressourceneffizienz vergleichbarer Cloud Dienste gegenübergestellt werden.

Summary

Background and objectives of the research project

New trends in the IT industry, such as Cloud Computing, the Internet of Things, Big Data and Industry 4.0, are continually increasing the need for centralized provision of data and computing performance. The growth dynamics are reflected in the increasing consumption of natural resources and higher environmental impacts of data centers. Because more devices consume more energy and their production pollutes the environment and consumes raw materials.

Many operators still focus on the availability, security, and performance of their data centers. However, the responsible and efficient handling of natural resources is particularly important in strongly growing industries. In data centers, there are many ways to improve the ecological balance. The first step is to assess the current state. Some key performance indicators (KPIs) already exist; some are already established in practice. But the existing approaches only take into account the use stage. The manufacturing and disposal of the IT equipment and building infrastructure are not covered yet. Moreover, many KPIs are not output-oriented. They do not refer to the work done by the data center. Their meaning is therefore limited. Also the measurement methods and data basis are often unclear.

For this reason, many stakeholders are working to unify and further develop existing KPIs for data centers. The research project *Key Performance Indicators for Data Center Efficiency* (KPI4DCE) supports the efforts and addresses the holistic nature of the ecological assessment. The aim of the research project is the development, testing and dissemination of a practical KPI system for the reliable assessment of the ecological efficiency of data centers.

Textbox 1: Main tasks of the research project

Main tasks of the project

The research project KPI4DCE included the following main tasks:

- ▶ Identification and analysis of the strength and weaknesses of existing KPI
- ▶ Development of a KPI system in the sense of the target position
- ▶ Verification of the usability of the KPI system in practice
- ▶ Placement of results in harmonization and standardization activities
- ▶ Recommendations for further development of the Blue Angel for data centers

Analysis of current knowledge

Scientific literature:

In the first step of the research project the state of the art was investigated by systematically analyzing scientific literature. The aim was to identify the approaches suitable as starting points for the development of an applicable and reliable KPI system, as well as to identify the research gaps that should be addressed by the project. In order to document the essential characteristics of the existing KPIs, a profile letter template was designed and general requirements for the valuation of the KPIs were defined. The KPIs were also classified according to the targeted life cycle stage (manufacturing, use and disposal) and level of aggregation (total system, functional main system, functional system, functional subsystem and technical system) and with regard to the respective object of the assessment (energy consumption, raw material consumption, greenhouse gas emissions and other). The main results of the literature analysis can be summarized as follows:

- ▶ KPIs for the assessment of the energy efficiency of the building infrastructure in the use stage are well researched. In some cases clear calculation rules and data collection concepts are still missing.
- ▶ There are some proposals for the assessment of the energy efficiency of the IT in the use stage. However, there is a strong need for research on comparable KPIs for servers, data storage systems and data center networks, and the overall IT system (hardware and software).
- ▶ For the use stage, approaches exist to assess the greenhouse gas emissions as well as the efficiency of water consumption, renewable energies usage and the reuse of waste heat.
- ▶ The ecological footprint of the manufacturing, distribution and disposal of the IT equipment and building infrastructure is not covered by the existing KPIs.
- ▶ KPIs rating the efficiency of using raw materials do not yet exist. Raw material efficiency currently only can be measured indirectly through utilization and lifetime of infrastructure components.

Standardization of KPIs for data centers

With Part 4 of the EN 50600 a European standard for KPIs for data centers has been established in the field of data centers. The EN 50600 exclusively considers the efficiency of data center facilities and building infrastructures. The IT equipment and the software are not covered by the EN 50600. So far, the EN 50600-4 has defined the necessary measurement, calculation and documentation of the KPIs *Power Usage Effectiveness* (PUE) and *Renewable Energy Factor* (REF). Within the framework of the research project the EN 50600-4 primarily is used for the standardized measurement of the energy consumption of the building infrastructure and IT equipment in the use stage. In this regard, the EN 50600-4 specifies the requirements for energy measurements within data centers (measuring concepts) that are described in general by the parts EN 50600-2-1 to EN 50600-3.

KPIs for data centers are also developed within the framework of the international standard ISO 30134. The ISO 30134 also considers KPIs for the IT equipment, and thus is of particular interest for this research project. In order to determine the energy efficiency of servers, the *IT Equipment Energy Efficiency for Servers* (ITEE_{SV}) and *IT Equipment Utilization for Servers* (ITEU_{SV}) are proposed. In addition, the ISO 21836 - Server Energy Effectiveness Metric (SEEM) standard exists since 2017. The ISO 21836 is a first approach to standardize the rating of the energy efficiency of servers based on the *SPEC_{Power}_sj2008*-benchmark. However, the ISO 21836 is classified in the area of product standards and is therefore not (yet) directly related to the operation of a data center.

Standardization proposals for KPIs to assess the efficiency of data storage systems and data center networks do not yet exist. Also, the measurement of the raw material efficiency of data centers is only considered to a very limited extent in current standardization proposals. In this regard, there is a high demand for standardization both for building infrastructure and for the IT equipment.

Development of the KPI system

When developing the KPI system for data centers, the specific characteristics of data centers must be taken into account so that the KPIs can be applied and compared in practice. Therefore the following definitions were made:

- ▶ The resource efficiency of a data center has been defined as the ratio of the IT performance (output) to the consumption of natural resources over the entire life cycle of the data center (input).
- ▶ Due to the typical operating modes of data centers (colocation provider, colocation customer) and the division of the areas of responsibility (facility management vs. IT management), the KPI system should support the assessment of the resource efficiency of the building infrastructure and the IT equipment separately.
- ▶ The resource efficiency of the building infrastructure was defined according to the *Data Center Infrastructure Efficiency* (DCiE) as the ratio of the resource consumption of the IT to the resource con-

sumption of the data center over the entire life cycle. Due to the lack of available information on the IT equipment, a modified calculation rule was specified for colocation providers. Colocation providers can replace the total resource consumption of the IT over the entire life cycle with IT's energy consumption in the use stage.

► Furthermore, allocation rules have been defined for the mixing of colocation and own operation data centers: First, the proportionate energy consumption of the data center in the use stage is determined by the energy consumption of the self-operated IT equipment multiplied by the *Power Usage Effectiveness* (PUE). The consumption of resources for the production, distribution and disposal of the building infrastructure, as well as the consumption of water and refrigerant in the use stage, which was prorated for the company's own operation, was determined by the levy factor "Proportionate energy consumption of the data center to the total energy consumption of the data center".

Definition of indicators for IT performance

The IT performance of a data center can be measured at various levels (e.g. infrastructure, applications, and services). A comparability of the IT performance at the service or application level is currently not possible due to missing standards and reference architectures combined with a high degree of individuality and variability of the offered services and operated applications. This could change in the future with the further spread of cloud computing as the unifying and consolidating force of the data center services industry.

For the present study, comparable performance indicators were determined at the physical infrastructure level. That is, indicators have been defined that quantify the data processing performance provided by the IT equipment. A single indicator that adds up the overall performance of the IT infrastructure has not been defined. The subnets of the servers, data storage and networks are heterogeneous and first must be matched by standardization factors. This entails the loss of transparency and objectivity. Thus, for the present study no rules for the aggregation of the partial benefits were defined. The three performance dimensions computing, data storage and data transmission were each represented by separate indicators:

- The computing performance of the data center was determined adding up the computing capacity of the central processing units (CPU) of the servers multiplying it by the average utilization of the CPUs in productive operation mode. Therefore, the computing capacity of 750 CPUs was determined using publicly available test values of the *SPECint_rate*-benchmark of the *Standard Performance Evaluation Council*. In the context of statistical investigations it was shown that the use of different performance benchmarks for servers leads to minor deviations in regard to the relative results. Finally, the *SPECint_rate*-benchmark was chosen because most test results have been publicly available.
- The data storage performance was characterized by three indicators: the number of read and write operations, the data throughput of read and write operations, and the used storage space. The assessment of data storage performance has been limited to data storage systems based on hard disk drives (HDD) and solid state drives (SSD) that allow immediate access to the stored (active) data. Data storage systems that are based on tapes and optical media (e.g., Blue Ray) and used exclusively for backup and the archiving of data usually provide no immediate access to the stored data. These data storage systems also have a comparatively low market share, in addition very low power consumption in the use stage and thus have no significant influence on the resource consumption of a data center. Therefore, these data storage systems were not included in the present study.
- The transfer rate and the latency usually are considered for determining the performance of data-center networks. The latency must be measured for point-to-point connections. There are as many of these as possible in data centers. Thus, for the present study the performance of the data center networks should be determined by measuring the amount of bits sent and received by the network devices. To limit the effort, data transmitted to and received from devices out of the data center (Intranet, Internet) should be measured only.

Table 1 summarizes the parameters for the assessment of the IT performance:

Table 1: Input variables for the assessment of the IT performance of a data center

IT Subsystem	Reference	Input Variables
server	CPU	model
	CPU	number (-)
	CPU	utilization (%)
data storage systems	device	number of read and write operations (transaction rate) (IO/s)
	device	data throughput of read and write operations (GB/s)
	device	used storage space (GB) (-)
network device	device	sent / received bits (external) (Gb/s)

Own representation.

Definition of indicators for resource consumption

Natural resources serve as a source for the manufacturing of products or as a sink for absorbing emissions. Natural resources are usually categorized in abiotic and biotic resources as well as land use. For life cycle assessment, the use of natural resources is determined by input-related (e.g. raw material consumption, water consumption, land use) and output-related (e.g. ecotoxicity) efficacy categories. None of the existing life cycle assessment methods covers all natural resources.

The scientific methodology for assessing environmental impacts differs in midpoint and endpoint methods. The midpoint methods evaluate the environmental impacts of a particular class of activity (e.g., abiotic raw material consumption, greenhouse potential, ozone depletion potential) with specific units. The endpoint methods evaluate the damage to defined protective goods (e.g. human health, biodiversity, protection of ecosystems). The partial results in the efficacy categories are assigned to the protective goods and the environmental impact is quantified by means of weighting factors and aggregation. Only midpoint methods are used for the present study because the weighting steps of the endpoint methods are based on attitudes and political intentions and are not scientifically justified.

Due to the objective of the present study, the determination of the abiotic resource depletion potential (ADP) is of particular interest. The indicators for the assessment of abiotic resources include minerals and fossil raw materials. For this study, the method of the *International Reference Life Cycle Data System* (ILCD)⁶ manual based on the method of the Dutch *Centrum voor Milieukunde* (CML)⁷ was used to calculate the ADP. The reasons for the selection are as follows:

- ▶ The basic model for determining the characterization factors⁸ is based on the CML method, which is based on a consensus in the science of life cycle assessment and is recommended by the ILCD manual and the *Product Environmental Footprint* (PEF).
- ▶ The CML method considers the availability of abiotic resources.
- ▶ The ILCD method uses the most recent characterization factors (V4.7, January 2016).

⁶ The ILCD has been developed on behalf of the JRC (Joint Research Center) of the European Commission to harmonize the conduct of life cycle assessments.

⁷ The CML method differs from other life cycle assessment methods by a broad and up-to-date data situation in the area of the impact assessment.

⁸ With the help of the characterization factors, the assigned results are aggregated into a specific impact indicator. For example CO₂ is the reference value for the greenhouse gas potential. The effects of the respective balance sheet results are calculated in relation to the reference variables via the characterization factors.

- ▶ The ILCD method evaluates the largest number of raw materials since, in addition to the 43 characterization factors of the CML method; it also includes characterization factors for 35 other raw materials.

Table 2: Sources for the characterization factors of the ILCD method

Method	Rated resources	Characterization factors (CF)
CML-method (V4.7, Jan.2016)	43 raw materials	see Tabelle 70 in the appendix – CF for reserve base
ILCD-handbook (v. 1.0.10, August 2016)	16 rare earth elements	5,69E-04 kg Sb-eq./kg _{rare earth elements}
ILCD-handbook (v. 1.0.10, August 2016)	additional 19 raw materials	see Tabelle 71 in the appendix

Own representation.

Within the scope of the impact assessment of the present study the following efficacy categories are considered:

- ▶ Abiotic resources depletion potential (ADP)
- ▶ Cumulative energy expenditure (KEA)
- ▶ Global warming potential (GWP)
- ▶ Water consumption (Water)

The components and resources considered in the life cycle stages are:

- ▶ Manufacturing: IT (server, data storage and network devices), uninterruptible power supply (UPS) and batteries
- ▶ Distribution: IT, UPS and batteries
- ▶ Use: energy, refrigerant and water consumption of the data center
- ▶ Disposal: IT, UPS and batteries

The use of a data center over the period of one year is defined as the time reference value for this study. This means that the results on the resource consumption and the environmental impacts of the data center are related to a single year of use. The cost of a device for production, distribution and disposal is divided by the years of use.

Table 3 summarizes the parameters to be specified by the data center operators to account for the resource consumption and the environmental impacts of a data center.

Table 3: Input parameters for accounting the resource consumption and the environmental impacts of a data center

Equipment type	Components	Input parameter	Reference
rack server/ blade server modules	CPU	model, number: e.g. Intel Xeon E5420, 1 item	„Die“-area: e.g. 214 mm ²
	RAM	number of RAM-modules (assumption: 9 memory chips per RAM-module)	number
	3,5"-HDD	number	number
	2,5"-HDD	number	number
	SSD	number	number
	circuit board	rack units (RU) of rack server	area

		number of blade server modules	
	server	number, weight	number, weight
	server	date of commissioning and reporting ⁹	effective useful life
blade system enclosure	enclosure	number, weight	number, weight
	enclosure	date of commissioning and reporting	effective useful life
data storage system	controller enclosure	number, weight	weight
	disk array enclosure (DAE)	number, weight	weight
	3,5"-HDD	number	number
	2,5"-HDD	number	number
	SSD	number	number
	data storage system	date of commissioning and reporting	effective useful life
network switches	device	number, weight	weight
	device	date of commissioning and reporting	effective useful life
UPS (≤10 kVA)	UPS	number, weight	weight
	UPS	date of commissioning and reporting	effective useful life
UPS (>10 kVA)	UPS	number, weight	weight
	UPS	date of commissioning and reporting	effective useful life
UPS batteries	batteries	number, weight	weight
	batteries	date of commissioning and reporting	effective useful life
energy supply: grid power	power	servers: power consumption in kWh _{el} /a data storage systems: power consumption in kWh _{el} /a network switches: power consumption in kWh/a building infrastructure: power consumption in kWh _{el} /a	kWh _{el} electricity mix (Germany)
energy supply: own generation	diesel	annual consumption	liter
	natural gas	annual consumption	m ³
refrigerant	loss of refrigerant	type of refrigerant stock quantity type of cooling plant	kg
water	water	annual water consumption	liter

Own representation.

⁹ The date of reporting defines the date to which the accounting relates.

The calculation tool

The performance and resource consumption indicators were calculated and combined using the program MS EXCEL. In the prototypically implemented KPI4DCE-tool, operators of data centers must enter the information on the equipment stock, on the energy, water and refrigerant consumption in the use stage and on the IT performance of the year under review in a standardized manner. The KPI4DCE-tool links the input parameters from the data center via defined calculation rules with modelled background data such as the computing capacity values of 750 CPU and the characterization factors of different efficacy categories so that the defined KPIs can be calculated automatically. The tool also can be used to carry out detailed analyzes of the distribution of the resource consumption and the environmental impacts by subsystems (building infrastructure, servers, data storage systems, network switches) and by life cycle stages (manufacturing, distribution, use, disposal) of the data center.

Practical verification of the KPI system and the KPI4DCE-tool

Applicability of the KPI system and results of the case studies

The applicability of the KPI system and the KPI4DCE-tool in practice was tested within three data centers. The three case studies showed that all the data required calculating the developed KPIs were not available for any of the investigated data centers. The data on the IT inventory (number, model, weight, date of commissioning, etc.), the utilization of the capacity as well as the performance and energy consumption of the IT equipment were not fully available in the expected granularity. A continuous monitoring and central storage of the performance data of the IT subsystems, which is necessary for the calculation of the output-oriented KPIs, is not common in the data centers under investigation. The complete inventory of all the IT equipment installed in the data center using configuration management databases (CMDB) and the use of Data Center Infrastructure Management (DCIM) solutions that are connected to various monitoring systems are not standard. In particular, very few inventory and performance data could be determined for data storage systems and data center networks.¹⁰

However, the subsequent recording of the missing data would have been possible in each of the investigated data centers, but would have required the manual extraction, unification and merge of information from many different sources. This was too complicated for the operators of the data centers in the context of the present study, both organizationally and technically. However, the existing data gaps could largely be closed by means of own research in data sheets and the creation of analogies. However, despite the careful selection and restriction to a minimum of input parameters, the data requirements of the KPI system represent a central challenge for the widespread applicability in practice.

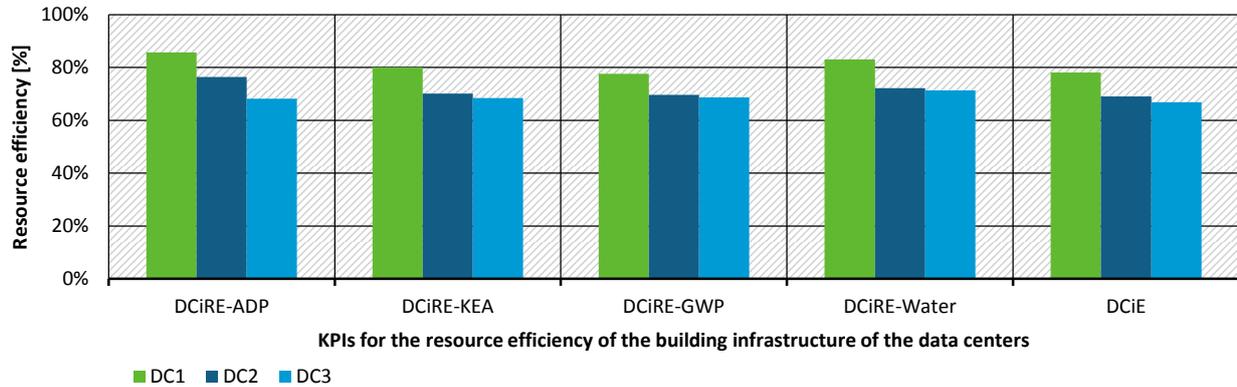
With the limitations of the data obtained, nevertheless basic knowledge was gained and the KPIs for the building infrastructure (see Figure 1), for the servers (see Figure 2) and partly for the data storage systems (see Figure 3) were calculated. The values of the KPI determined for the data centers are not fully representative, since not only measured data was used, but also data based on assumptions that could deviate from the actual situation have been added. However, the assumptions were taken conservatively and uniformly for all data centers, so that the calculated values of the KPIs may give a first clue in what range future benchmarks probably could be established.

Figure 1 shows the characteristics of the KPIs for the assessment of the resource efficiency and environmental impacts of the building infrastructure of the data centers investigated. Each KPI is defined as the ratio of the resource consumption of the IT equipment to the resource consumption of the data center over the entire life cycle. For comparison, Figure 1 also shows the DCiE that rates the energy

¹⁰ Performance data of the storage systems, such as IOPS and data throughput, and of the network devices, such as the data transmission rates, are checked by the operators whenever there are special events and unscheduled bottlenecks that affect the availability and performance.

efficiency of the building infrastructure of data centers in the use stage. The lower the resource consumption of the building infrastructure of a data center, the greater the values of the KPIs. Ideal values are 100 percent. In this case, the building infrastructure does not consume any resources and the resource consumption is entirely attributable to the IT equipment, respectively. It is clear in Figure 1 that the building infrastructure of the first data center (DC1) has the highest resource efficiency in all environmental impact categories compared to the second (DC2) and third (DC3) data center.

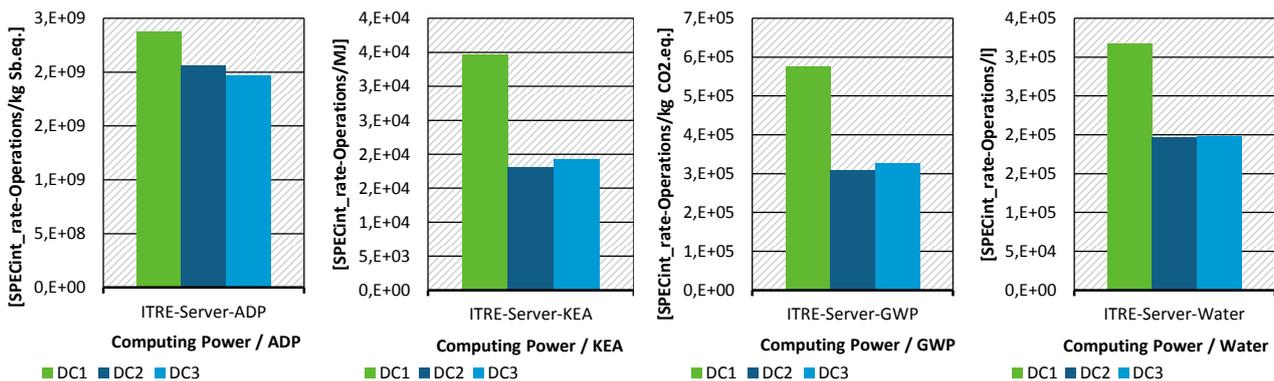
Figure 1: Resource efficiency of the building infrastructure of the data centers



Own representation.

Figure 2 shows the values of the KPIs for the assessment of the resource efficiency of the servers for the three data centers investigated. The four KPIs are each defined as the ratio of the computing performance of the CPUs of the servers and the resource consumption of the servers over the entire life cycle. The larger the values of the KPIs, the higher the resource efficiency with respect to the servers used in the data centers. Figure 2 shows that the servers of the DC1 have the highest resource efficiency in the four efficiency categories considered, whereas DC2 and DC3 achieve comparable values.

Figure 2: Resource efficiency of the servers of the data centers

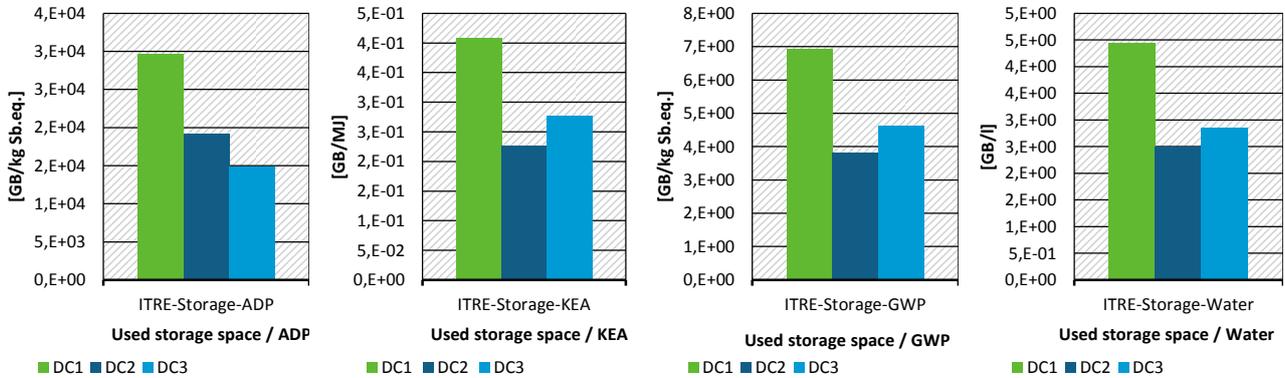


Own representation.

Due to the lack of information on the number and throughput of read and write operations of the data storage systems and the impossibility of deriving plausible assumptions, it was only possible to calculate resource efficiency values for data storage systems with regard to the used storage space. Figure 3 shows the values of the four KPIs for evaluating the resource efficiency of the data storage systems in relation to the used storage space for the three data centers under investigation. The KPIs are each defined as the ratio of the used storage space to the resource consumption of the data storage systems

over the life cycle. In this case too, DC1 achieves the highest (and thus best) values compared to DC2 and DC3. This is due to the fact that the DC1 mainly uses capacity-optimized HDDs, which usually have low power consumption and high storage capacity per disk.

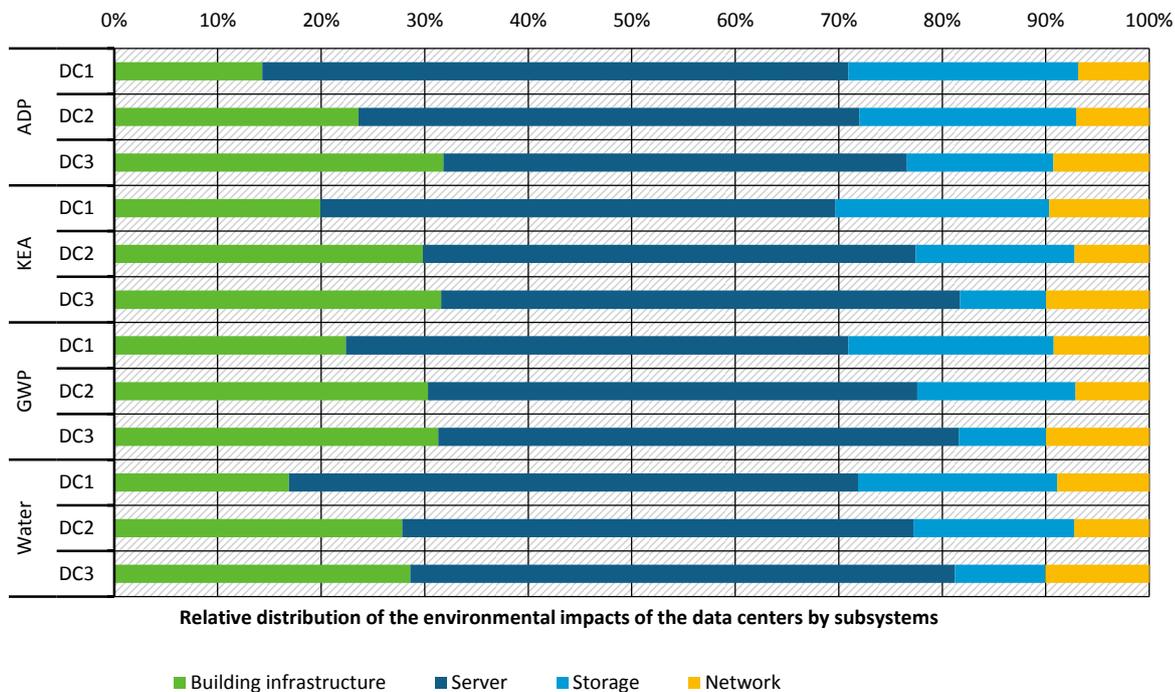
Figure 3: Resource efficiency of the data storage systems of the data centers



Own representation.

In addition to the defined KPI, the KPI4DCE tool calculates the distributions of the resource consumption by subsystems and by life cycle stages. Figure 4 shows the relative distribution of the resource consumption by subsystems of the data centers. On the one hand, servers are dominating the resource consumption in regard to the impact categories considered for all data centers. On the other hand, network devices have the lowest resource consumption in regard to the impact categories considered for all data centers. However, a heterogeneous picture results for the building infrastructure and the data storage systems. Here, it is crucial which data center and which impact category are considered.

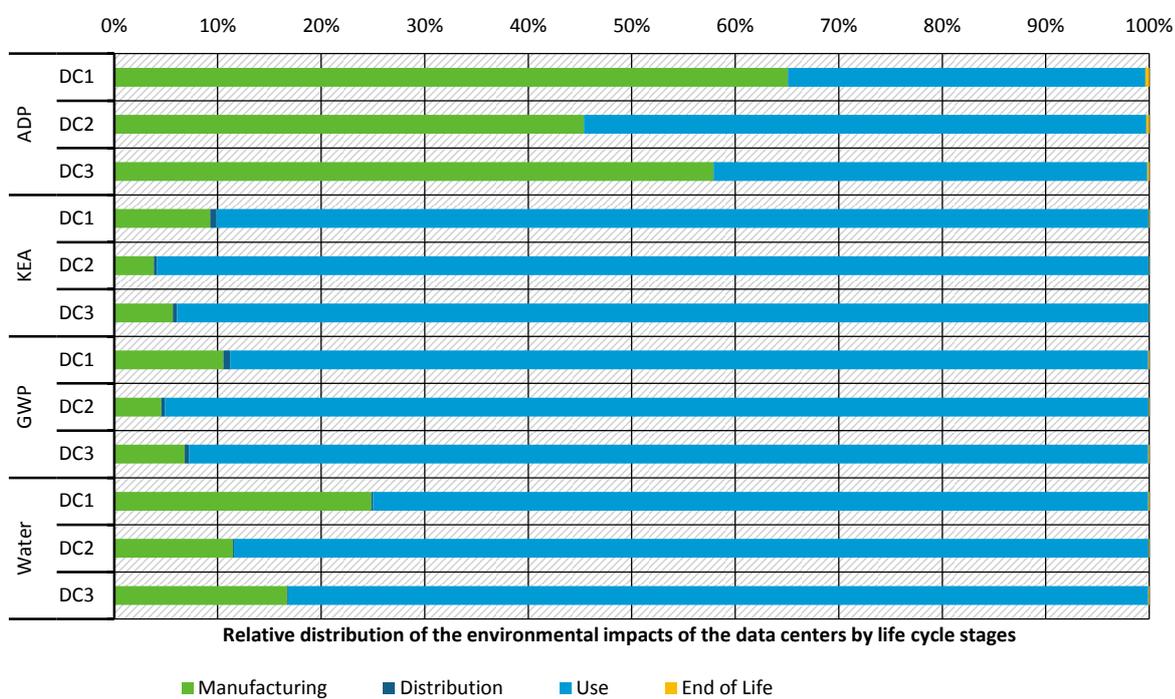
Figure 4: Relative distribution of the environmental impacts of the data centers by subsystems



Own representation.

Figure 5 shows the relative distribution of the resource consumption of the three data centers investigated by life cycle stages. It is clear that the resource consumption of the distribution and disposal stage in all cases has no relevant influence and is negligible compared to the manufacturing and use stage. Thus, the calculation rules for the KPIs and the KPI4DCE tool can be simplified. The manufacturing stage dominates the ADP in the case of normal lifetimes (three to five years) of the IT equipment. Thereby, increasing lifetimes lead to a decreasing share of the resource consumption of the manufacturing stage, whereas reduced lifespan leads to a higher percentage of the resource consumption of the manufacturing stage. In turn, the use stage of the three data centers investigated dominates the KEA and THG with a share of over 90 percent. The manufacturing plays a subordinate role for the KEA and the THG if normal lifetimes are applied for the IT equipment and building infrastructure. Rising lifetimes lead to a higher proportion, reduced lifetime to a lower proportion of the use stage in terms of the resource consumption. The use stage also dominates water consumption.

Figure 5: Relative distribution of environmental impacts of the data centers by life cycle stages



Own representation.

None of the investigated data centers uses own systems to generate electricity from renewable energies or by means of natural gas or diesel. In Figure 4 and Figure 5, the relative distributions of the KEA and the GWP of the three data centers are therefore quite similar.

Assessment of the reliability and robustness of the KPIs

Through the three case studies, conclusions about the reliability and robustness of the KPI system were only possible to a limited extent. In this regard, a follow-up study could provide further insights with the acquisition of data for a large number of data centers of different sizes and equipment types and with different operating models. On the basis of the available data sets, however, some central aspects such as different load states and lifetimes of devices could be simulated, which influence the resource efficiency differently. The following effects were observed:

- ▶ Higher utilization of the IT inventory (CPU utilization, used storage space) always lead to a higher resource efficiency of the data centers. A higher utilization of the IT equates with a higher IT performance, while the energy consumption of the IT grows comparatively slower due to the already very high static electricity consumption of most IT equipment in active idle mode. Thus, through a holistic view of the resource consumption over the entire life cycle, large overcapacities have a more negative effect than when only the energy consumption in the use stage is considered.
- ▶ A prolonged service life of the IT equipment usually leads to higher raw material efficiency compared to shorter renewal cycles in the overall balance. However, the consumption of fossil resources for the energy supply in the use phase is included in the calculation of the adiabatic consumption of raw materials. Therefore it can be useful to improve the raw material efficiency by replacing very old and inefficient IT devices by newer, very energy-efficient ones.
- ▶ Shorter renewal cycles of the IT equipment have a positive impact on KEA and GWP, as long as the improvement of the energy efficiency of new generations of IT equipment remains high following, and the IT equipment in the data centers is continued to be operated around the clock. For the KEA and GWP, the resource consumption in the use stage is particularly relevant. In most cases improvements in the energy efficiency of the building infrastructure are comparatively low from generation to generation, so that the lifetime of the building infrastructure usually should be as high as possible.

Critical appraisal of the performance indicators

Regarding the reliability and robustness of the indicators that describe the performance of the data center the following core statements can be made:

- ▶ Performance indicator for servers: The computing performance of the servers can be very well expressed by the values for the computing capacity of more than 750 CPU types. With this number, high market coverage is achieved. In conjunction with the utilization of the CPUs measured in operation, the computing performance of the servers can be determined in a comparable manner. Computing services that other components (e.g., co-processors on graphics cards) provide cannot yet be determined with the existing approach. This is not important for most data centers. However, in the area of high performance computing (HPC), the expansion of the computing performance using co-processors is becoming increasingly important. Thus, the existing approach should be further developed for this area of application.
- ▶ Performance indicators for data storage systems: The three indicators for the expression of the data storage performance should be measured for each data storage system of the data centers in order to determine the extent to which an aggregated view of the data storage systems is sufficient or whether a differentiation according to the application area is advisable. In the absence of measured values no recommendations could be derived. Furthermore, the performance indicators do not take into account all the characteristics of data storage systems: the performance indicators do not refer to the long usability of the storage media, the fast recoverability of data or the protection mechanisms against data loss. Moreover, data storage services provided by the servers are not covered. Actually, servers and data storage systems are often difficult to distinguish from one another in practice, so that a clear definition (for example on the basis of a minimum number of storage media) has to be made or the data storage capacity of the servers must be measured in principle.
- ▶ Performance indicator for data center networks: Data traffic with IT systems outside the data center and its infrastructure was defined as the performance indicator for data center networks. Thus, the internal data traffic between the servers and the data storage systems of the data center is not covered. For networks of certain data centers, which exchange very little data with the outside world, but in return have a very high internal data traffic, this performance indicator may be little meaningful.
- ▶ Performance indicators in general: The defined performance indicators do not distinguish between IT performance and "useful" IT performance. Each computing operation of the CPU, each stored file, and every bit transferred to the outside world is interpreted as "useful" and positively affects the val-

ues of the KPIs. In fact, data often is computed and stored twice and needs to be retransmitted without creating additional benefits. Thus, the indicators measure only how much work the IT devices provide, not to what extent the performance of the IT devices is useful from the user's point of view.

Critical appraisal of the effort indicators

Regarding the reliability and robustness of the indicators that describe the resource consumption of the manufacturing, distribution and disposal as well as the operation of the data center the following core statements can be made:

- ▶ The calculation of the resource consumption of the manufacturing, distribution and disposal of the IT equipment was deliberately kept simple so that the users of the KPI4DCE tool (usually the data center operators) only have to supply a small amount of data and can export it directly from their CMDB. Such data are, for example, the number and weight of components or the CPU types. These simplifications were made at the expense of the completeness and accuracy of the calculation results. The rough calculation of the resource consumption can therefore not replace a complete life cycle assessment.
- ▶ The data sets used represent a static state of the production technology. There is no distinction between obsolete and modern production techniques. For example, the manufacturing effort of CPUs is approximated over their silicon area ("Die" area) without taking the year of manufacturing into account. In addition, mostly only older data sets are available in terms of manufacturing technologies and manufacturing processes (for example SSD production from 2011). This leads to a regular overestimation of the resource consumption of the manufacturing processes due to the fact that efficiency gains have been achieved in the meantime.
- ▶ The calculation of the resource consumption for manufacturing, distribution and disposal relates to the most relevant components of the data center from the viewpoint of resource consumption. These are the IT devices as well as the UPS systems including their batteries. Components with a subordinate (less than ten percent) significance for the overall balance as the other components of the building infrastructure are not included in the calculation.
- ▶ For the use stage the energy, water and refrigerant consumption of the data center is included in the calculation. The energy and water consumption are the actual measured values. The refrigerant consumption is an estimate based on the measured refrigerant charge of the cooling systems. The use stage is thus very precisely balanced and the regarding calculation leads to robust results.
- ▶ The results of the resource consumption and environmental impacts of the investigated data centers by life cycle stage (see Figure 5) show that the use stage has the main influence on the KEA, GWP and water consumption. For the accuracy of the results, this means that inaccuracies in the remaining life cycle stages (manufacturing, distribution and disposal) only have a minor influence on the overall result. However, the inaccuracies are relevant for the ADP and should be further reduced in the future.
- ▶ For the indicators that describe the resource consumption and the environmental impacts, it can be summarized that their values are still subject to some uncertainties (in particular the ADP). However, the results are reliable, i.e. they are suitable for making statements in regard to which components of the data center contribute to which extent to which category of resource consumption.

Recommendations for using the outcome of the project

Future standardization projects

The ADP, KEA and GWP can be recommended for further use in international standardization. The ADP seems well suited to close unaddressed areas of the measurement of the resource consumption of data centers. Up to now, measurement of the resource consumption of data centers has only been addressed in standardization projects by the energy consumption. The ADP also fulfills almost all requirements for standardization. The general calculation rules for the ADP are already set out in the ISO 14040 and should be adapted or extended for data centers. The results provide a good basis for this

step. The technical feasibility and the methodology were demonstrated by means of three data centers during this research project. However, it would still be necessary to examine whether the life cycle databases used in this project (ecoinvent, ProBas) can meet the requirements for standardization.

For the GHG, the specific focus on data centers should also be worked out in order to delineate the indicator against the general standardization approach of "carbon footprinting". For the rating of CO₂ emissions of data centers there is already an approach called *Carbon Usage Effectiveness* (CUE), but which is limited to the power consumption of the data center. In this regard the results of the projects show that in terms of CO₂ emissions the defined GHG indicator accounts much better for the environmental impact of a data center over the total life cycle.

In the field of IT performance indicators, an approach for the standardized assessment of the performance of the servers of the data center already exists at the international level. The current approach of the ISO 30134 covering the ITEE_{SV} and ITEU_{SV} in connection with the ISO 21836 (SEEM) is widely accepted by standardization experts. The measurement methods and calculation rules have been tested and approved by the *SPECPower_ssj2008* benchmark. The advantage in the practical application is that the measurements can be carried out by operators and manufacturers using the same measuring method. The disadvantage is that this method does not allow a continuous measurement of the server performance. Here, the developed approach to determining the performance of the servers using CPU-specific *SPECint_rate* benchmark values in conjunction with the continuous measurement of the CPU utilization could add value. For this, however, comparability according to a defined standard would have to be achieved for the CPU measurements. For the practical implementation and the standardization relevance, the greater effort of the data collection could be disadvantageous. In order to integrate the developed approach into ISO 30134 / ISO 21836, a clear added value for the operator would have to be demonstrated, which would justify the greater effort of the data collection. To the current state, the developed approach could most likely be proposed as an addition or variant within the existing ITEU_{SV} or ITEE_{SV} framework. A proposal as a single performance indicator appears to be unlikely due to very large overlaps with ISO 31034.

The current state of the art has not yet been sufficiently tested for the proposed overall approach of KPIs that combine the resource consumption and the performance indicators. There are still a lot of unfilled basic requirements for standardization. In particular the testing of the scientifically described method for the individual measurements in the operation of a data center over a longer period is missing. The investigation of the essential influencing factors with their interactions should also be carried out by means of a detailed sensitivity analysis using real data. On the other hand, the current state of standardization is not yet ready for such a higher-ranking indicator.

In summary, the following can be formulated as a recommendation for standardization:

The indicators ADP, KEA and THG examined in this project already have been proposed for the EU-wide standardization of the *TC 215 CENELC* for EN 50600-4 and EN 50600-99 respectively. Subsequently, these indicators should be proposed within the framework of ISO 30134. This procedure has proven its worth in EN 50600. The advantage lies in the shorter implementation time within the framework of the EU standardization compared to the worldwide ISO standardization. If the standards for the single indicators for the resource consumption and the IT performance are established, the approach to calculate the resource efficiency considered in this project could also be proposed as an overarching KPI for the international standardization as a combination of well understood and proven indicators.

Blue Angel

The KPI4DCE tool for the application of the resource efficiency methodology was developed as a scientific expert tool within the framework of the present study. The KPI4DCE tool should be further devel-

oped into a resource monitoring tool in order to be used by data center operators as part of an eco-label. The further development of the existing KPI4DCE tool should include at least the following:

- ▶ Easier usability: protection against incorrect operation, storage of default values, specification of various data center concepts, plausibility checks during input.
- ▶ Optimized structure: Modular structure, extension of data sets and infrastructure components, more transparent data links, inclusion of user-specific data records.
- ▶ Possibilities to maintain the data base contained (for example, data on processors, etc.)
- ▶ Improvement of the evaluation possibilities (for example on the IT application level) and optimization tools (for example sensitivity analyzes), graphical results presentation, export of reports.
- ▶ Compatibility with other monitoring instruments: data import from CMDB, possibilities for data export, harmonization with systems for the planning of sustainable structures (for example, evaluation system for sustainable building for federal buildings).
- ▶ Creation of a manual for the application of the resource monitoring tool.

In summary, a recommendation for the Blue Angel environmental label can be formulated:

- ▶ Further development of the KPI4DCE tool towards a resource monitoring tool
- ▶ Introduction of mandatory resource monitoring for the Blue Angel
- ▶ Calculation of resource efficiency indicators for the participating data centers
- ▶ Provision of this data to the Federal Environmental Agency for the further development of the calculation methodology and the eco-label, possibly obligatory publication of selected indicators by the users of the eco-label

Further Research

Further development of the background models for the assessment of the resource consumption

While modeling resource consumption of the data centers, assumptions have been made in the absence of data, to limit the scope of the investigation and to simplify the reality. Some assumptions influence the results and can favor certain equipment variants of data centers. An example is the modeling of the blade systems, where a uniform size of the mainboard was assumed for all blade server modules. In reality, however, there are different sizes of blade server modules, so that for a data center with blade server modules of a smaller form factor an excessive use of resources would be recorded. A future research project could, therefore, thoroughly examine the assumptions made from the existing model, further develop the resource consumption model at suitable points and, if required, also include components of building infrastructure not considered in this study.

Further development of the indicators for the assessment of the performance of the data storage systems

The KPI4DCE system currently includes three indicators for capturing the performance of the data storage systems. The performance indicators should be measured for the overall data storage system and, in the current form, refers to the entire resource use of the data storage systems. Since the case studies were hardly able to provide data on the performance of the data storage systems for in-depth analysis, a future research project should deal in detail with the measurement of the performance and the resource consumption of the data storage systems. The subject matter of the investigation could be the granular assessment of resource efficiency for selected fields of application of data storage systems in order to conclude on the possibility of reducing the number of indicators or on the need for (further) differentiation of the approach. It should also be checked whether and how the latency of data storage systems can possibly be included in the performance evaluation. In addition, it could be examined how aspects of the resource-conserving reduction of data by e.g. data deduplication can be captured by the specified performance indicator for recording the used storage space.

Expansion of the KPI system to the assessment of the cost-efficiency

In its present form, the KPI4DCE system focuses exclusively on the assessment of the efficiency of the use of natural resources. In practice, data center operators are particularly interested in the financial aspects of the data center operation, in other words the costs or the profit. While the latter depends on the prices, which can vary widely depending on competition and supplementary services, it should be possible to extend the KPI4DCE indicator set by comparable measures to measure cost-effectiveness. From a scientific point of view, it is particularly interesting to know whether and how the different dimensions of efficiency are related to each other. This means cost-efficiency should be associated with a low consumption of raw materials, but also with high energy efficiency. Such correlations could be an object of investigation that supplements the natural resource models by adding a model to include the total cost of ownership or the life cycle costs.

Conducting a field study to generate benchmarks for the defined KPIs

The data centers examined in the case studies of this project have shown that the measurement of the indicators is possible in principle. But the collection of the required data was a major challenge for the data centers of the case studies. Therefore, partial assumptions had to be made for the completion of the data records and some KPI such as for the resource efficiency of data storage and network could not be computed. Regardless, a record for three data centers is not sufficient to provide benchmarks, e.g. for the eco-label Blue Angel. Therefore, the aim of a research project could be to collect the developed KPI for different data centers to provide benchmarks for each of the KPIs. Therefore, the data centers should differ in size and core tasks. In fact, each of the RZs considered in such a field study should have implemented a technical or procedural innovation to increase resource efficiency so that the impact of best practices on the KPI system can be investigated as well.

Adjustment of the KPI4DCE indicator set for HPC systems

IT systems designed for high performance computing (HPC) are used for the processing of complex computing tasks. In this case, the optimal interaction of the computational and data storage nodes connected to one another via an extremely fast network is important. Because HPC play a subordinate role for the data centers as a whole, they were not considered separately in this study. Regarding the indicator set, however, it must be noted that the resource efficiency of the HPC systems should be measured at the level of the overall IT system. In addition, management components and hardware accelerators are often used, which are not yet covered by the models for the resources consumption. As HPC systems will become more widely adopted in the future, a further development of the proposed methodology and demonstration on real HPC systems is recommended.

Transfer of the KPI4DCE methodology to evaluate the resource efficiency of public cloud services

The metrics defined in this study capture the resource efficiency of the IT at the physical infrastructure level. They allow an assessment of whether the IT equipment itself is resource-efficient and whether it is well utilized. Yet, the KPI set cannot assess, whether the IT services have been provisioned resource-conserving. For this, not only the performance of the servers, data storage systems and networks should be quantified at the infrastructure level only, but also the quantity of the retrieved IT services should be measured. In this regard IT services offered by public cloud providers, with their high volumes and high degree of standardization, offer good opportunities to transfer the KPI4DCE methodology to the service level. The central object of the survey should be the specification of KPIs and allocation rules that capture the use of natural resources per instance of a IT service. The methodology could then be applied to selected cloud services of different providers and the resource efficiency of similar cloud services may be compared with each other.

1 Einleitung

1.1 Begriffsbestimmungen

Um nachstehende Ausführungen eindeutig verstehen zu können, werden zunächst die wesentlichen Begriffe definiert.

Abhängig vom Zweck einer Publikation finden sich in der Literatur verschiedene Definitionen des Begriffs *Rechenzentrum* (RZ). Das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) definiert ein RZ als die „für den Betrieb von komplexen IT-Infrastrukturen [...] erforderlichen Einrichtungen [...] und Räumlichkeiten“ [BSI 2014]. Dabei wird die Informationstechnik (IT) nicht miteinbezogen, wohingegen andere Autoren die IT einem RZ explizit zurechnen. Aufgrund der Zielstellung des Vorhabens wird ein RZ nach [Schödwell et al. 2012a] ganzheitlich definiert: Ein Rechenzentrum ist ein in sich geschlossenes System, das zentralisierte IT-Systeme (Hard- und Software) sowie die zum Betrieb erforderlichen Räumlichkeiten und gebäudetechnischen Versorgungs- und Sicherheitsinfrastrukturen umfasst, um die „dauerhafte und zuverlässige Berechnung, Speicherung und Übertragung großer Mengen digitaler Daten zu ermöglichen.“ [Schödwell et al. 2012a]

Die Begriffe *Ressourcen* und *Rohstoffe* werden von verschiedenen Fachdisziplinen im jeweiligen Kontext unterschiedlich definiert und verwendet. Im Forschungsvorhaben des Umweltbundesamtes (UBA) (UBA-FB 001563: Indikatoren / Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion) wurden verschiedene Definitionen von natürlichen Ressourcen und Rohstoffen dargestellt und eine Definition für das UBA-Glossar entwickelt, der in dieser Studie gefolgt wird [Giegrich et al. 2012]. Demnach ist eine natürliche Ressource eine „Ressource, die Bestandteil der Natur ist. Hierzu zählen erneuerbare und nicht erneuerbare Rohstoffe, physischer Raum (Fläche), Umweltmedien (Wasser, Boden, Luft), strömende Ressourcen (z. B. Erdwärme, Wind-, Gezeiten- und Sonnenenergie) sowie die Biodiversität. Es ist hierbei unwesentlich, ob die Ressourcen als Quellen für die Herstellung von Produkten oder als Senken zur Aufnahme von Emissionen (Wasser, Boden, Luft) dienen.“ [Giegrich et al. 2012].

Effizienz beschreibt allgemein das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand. Das UBA definiert *Ressourceneffizienz* als das „Verhältnis eines bestimmten Nutzens oder Ergebnisses zum dafür nötigen Ressourceneinsatz. Im umweltwissenschaftlichen Sprachgebrauch ist mit Ressourceneinsatz der Einsatz von natürlichen Ressourcen gemeint.“ [UBA Glossar 2012]. Die Begriffe Ressourceneinsatz, Ressourceninanspruchnahme, Ressourcenverbrauch, und Ressourcenbedarf werden in diesem Forschungsvorhaben synonym verwendet. Dies gilt auch für Wortkombinationen mit konkreten Ressourcen.

Kennzahlen bezeichnen „Zahlen, die quantitativ erfassbare Sachverhalte in konzentrierter Form wiedergeben“ [Kütz 2008]. In der Literatur finden sich gelegentlich unterschiedliche Bedeutungen der Begriffe Kennzahl, Kennwert, Indikator und Schlüsselindikator (engl.: key performance indicator, KPI). In diesem Forschungsvorhaben werden die Begriffe synonym verwendet. Eine Sonderform von Kennzahlen sind Umweltkennzahlen, die in Umweltschlusskennzahlen, Umweltmanagementkennzahlen und Umweltzustandskennzahlen unterteilt werden können [DIN EN ISO 14031:2011]. Gegenstand dieses Forschungsvorhabens sind Umweltschlusskennzahlen, die sich für die Planung, Steuerung und Kontrolle der Ressourceneffizienz und der Umweltwirkungen von RZ eignen.

1.2 Hintergrund

Die zunehmende Durchdringung aller Lebens- und Wirtschaftsbereiche mit IT führt zur wachsenden Bedeutung ökologischer Fragestellungen im Rahmen der IT-Leistungserstellung. Die weltweit steigenden IT-Gerätebestände verursachen nicht nur erhöhte Energiebedarfe und Kohlenstoffdioxid (CO₂)-Emissionen. Sie belasten die Umwelt auch durch die bei der Herstellung benötigten toxischen Substanzen und den Abbau und die dissipative Verarbeitung von Edel- und Sondermetallen. Darüber hinaus werden die meisten Rohstoffe nicht oder nur in sehr geringem Umfang aus dem Elektronikschrott zurückgewonnen. Oft existieren noch keine Recyclingverfahren oder sie sind noch nicht wirtschaftlich.

Vor diesem Hintergrund ist es zwingend notwendig, IT-Produkte und IT-Dienste ökologisch verträglich zu gestalten und unter dem Begriff *Green IT* ein langfristiges Ziel zur branchenweiten Erhöhung der Ressourceneffizienz und Reduzierung negativer Umweltwirkungen zu etablieren. Vor allem RZ müssen besonders beachtet werden. Der Fokus auf die Verfügbarkeit, Sicherheit und Performanz und die stetig wachsende Nachfrage nach zentral bereitgestellten Datenverarbeitungskapazitäten führen zu immer größeren und energieintensiveren RZ-Infrastrukturen. So ist in Deutschland der Serverbestand von knapp 1,8 Millionen (Mio.) Server im Jahr 2010 auf ca. 2,3 Mio. Server im Jahr 2015 gestiegen [Stobbe et al. 2015]. Dem entsprechend ist auch der Energieverbrauch der RZ in Deutschland von 10,5 Terrawattstunden (TWh) im Jahr 2010 auf 12 TWh im Jahr 2015 gestiegen [Stobbe et al. 2015].

Zugleich bestehen vielfältige Möglichkeiten zur Verbesserung der Umweltbilanz der RZ. Der Istzustand kann mit Hilfe von Kennzahlen erfasst und bewertet werden. Sie bilden die Grundlage für die Ableitung und Priorisierung zielgerichteter Maßnahmen. Durch intensive Forschungsarbeit konnten bereits einige Kennzahlen, Indikatoren und Methoden für RZ entwickelt und teilweise in der Praxis etabliert werden. Die bisherigen Ansätze adressieren aber immer nur ausgewählte ökologische Aspekte oder die Ressourceneffizienz eines begrenzten Teilbereichs der RZ. Die Kennzahlen sind daher in ihrer Aussagekraft beschränkt, die Werte sind zudem oft nicht für verschiedene RZ vergleichbar oder die Kennzahlen lassen sich von den RZ-Betreibern aufgrund mehrdeutiger Messmethoden und fehlender Datengrundlagen nicht oder nur mit unverhältnismäßigem Aufwand erfassen.

Die Vielfältigkeit und Komplexität des Gesamtsystems erschwert die Entwicklung und Anwendung vergleichbarer Kennzahlen mit einheitlichen Datenerhebungs- und Berechnungsvorschriften. Neben der Größe und dem Standort beeinflussen die technische Ausgestaltung der Teilbereiche eines RZ immer auch die Art und Menge der im RZ erbrachten IT-Dienste sowie die an sie gestellten Qualitätsanforderungen (Verfügbarkeit, Performanz, Sicherheit). Aus diesem Grund arbeiten derzeit weltweit privatwirtschaftliche Unternehmen, wissenschaftliche Institutionen und branchennahe Arbeitskreise und Gremien an der Vereinheitlichung und Normung von Kennzahlen, Indikatoren und Methoden zur Bewertung der Ressourceneffizienz und Umweltwirkungen von RZ. Hierbei wird vor allem eine Zusammenführung und Harmonisierung bestehender Ansätze angestrebt, um die entwickelten Standards erfolgreicher in der Praxis zu etablieren. Das Forschungsvorhaben knüpft an diese Aktivitäten an und adressiert insbesondere die Ganzheitlichkeit und Richtungssicherheit der ökologischen Bewertung.

1.3 Marktrelevanz

RZ sind die unsichtbaren Motoren unserer Informationsgesellschaft. Trotzdem die Branche jung und im Vergleich zu anderen Wirtschaftsbereichen klein ist, darf ihre Bedeutung für die Gesamtwirtschaft nicht unterschätzt werden. Ähnlich wie bei anderen Versorgungsinfrastrukturen (Strom, Wasser, Gas, Straßen etc.) gelten viele der von den RZ erbrachten IT-Dienste mittlerweile als unverzichtbar.

Ohne RZ ist bspw. das Internet nicht denkbar, da Anwendungen und Daten überwiegend zentral in den RZ und nicht mehr lokal auf den Endgeräten ausgeführt und gespeichert werden. Auch nahezu alle Wirtschaftsbereiche (insbesondere Banken und Versicherungen, öffentliche Verwaltung, Dienstleistungen und Industrie) und viele Versorgungsinfrastrukturen (insbesondere Energieversorgung, Bahn- und Flugverkehr) hängen von den in RZ erbrachten IT-Diensten ab. Ob die Produktentwicklung, die Warenwirtschaftsplanung, die Lieferkettensteuerung oder die Kommunikation mit den Geschäftspartnern und den Kunden: Verschiedenste Software-Applikationen unterstützen Geschäftsprozesse von Unternehmen aller Art im Rahmen ihrer Wertschöpfung und müssen immer und überall verfügbar sein. Trends wie das *Cloud Computing*, die *Industrie 4.0* und das *Internet der Dinge* werden die Abhängigkeit von zentral bereitgestellten IT-Diensten und damit die Bedeutung der RZ auch in Zukunft weiter erhöhen. [Hintemann 2014]

Im internationalen Vergleich nimmt der deutsche RZ-Markt eine führende Rolle ein. Nach einer Untersuchung des Marktforschungsinstituts *DCD Intelligence* im Jahr 2013 zählt Deutschland neben den

USA, Japan, Großbritannien, China und Frankreich zu den sechs Ländern mit den weltweit größten IT-Flächen [Hintemann 2014]. Diesbezüglich konnte eine Zunahme vom Jahr 2010 bis zum Jahr 2015 um 25 Prozent auf 1,9 Mio. Quadratmeter (m²) beobachtet werden, die vor allem mit einer Konsolidierung kleinerer Lokalitäten in größeren Liegenschaften einhergeht [Hintemann 2015a].

Für die Zukunft wird ein weiter anhaltendes Wachstum des IT-Gerätebestands in den RZ vorhergesagt. Waren es in 2015 ca. 2,3 Mio. physische Server, wird für 2020 ein Anstieg auf ca. 2,5 Mio. Server und für 2025 auf ca. 2,7 Mio. Server prognostiziert [Stobbe et al. 2015]. Ein noch stärkeres Wachstum ist bei Datenspeichersystemen abzusehen. Waren es im Jahr 2015 ca. 22,4 Mio. Festplatten, wird davon ausgegangen, dass im Jahr 2020 in RZ bereits 33,5 Mio. Festplatten und im Jahr 2025 ca. 49,8 Mio. Festplatten betrieben werden [Stobbe et al. 2015]. Mit dem IT-Gerätebestand wächst auch die zum sicheren und zuverlässigen Betrieb notwendige Gebäudeinfrastruktur, so dass der Energiebedarf der RZ in Deutschland bis zum Jahr 2020 voraussichtlich auf 14,2 TWh und bis zum Jahr 2025 auf 16,4 TWh wachsen wird [Stobbe et al. 2015].

Berücksichtigt werden muss, dass die Bestandsentwicklungen in den RZ und die resultierenden Energieverbräuche aufgrund der Dynamik der IT-Branche für einen Zeithorizont von zehn Jahren schwer abgeschätzt werden können und die angeführten Vorhersagen daher mit großer Unsicherheit behaftet sind. Nichtsdestotrotz zeigen die Zukunftsprognosen eine klare Tendenz auf und unterstreichen die Dringlichkeit verstärkter Bemühungen zur Steigerung der Ressourceneffizienz der RZ. Denn ohne zusätzliche Anstrengungen der IT-Branche werden die Belastungen für die Umwelt in einem noch größeren Umfang zunehmen. Die Entwicklung, Überprüfung und Verbreitung eines robusten und richtungssicheren Kennzahlensystems für die Erfassung und Bewertung der Ist-Situation und für die Ableitung zielgerichteter Verbesserungsmaßnahmen ist daher zentraler Untersuchungsgegenstand des Forschungsvorhabens.

1.4 Zielsetzung und Aufgaben

Das Ziel des Vorhabens KPI4DCE ist die Entwicklung, Überprüfung und Verbreitung eines praktikablen Kennzahlensystems zur ganzheitlichen und richtungssicheren Bewertung der Ressourceneffizienz und Umweltwirkungen von RZ. Das Kennzahlensystem soll

- a) alle Teilbereiche eines RZ adressieren,
- b) den aktuellen Auslastungszustand berücksichtigen,
- c) den gesamten Lebenszyklus abbilden und
- d) die erbrachte IT-Leistung mit einbeziehen.

Die Aufgabenschwerpunkte des Vorhabens lassen sich wie folgt zusammenfassen:

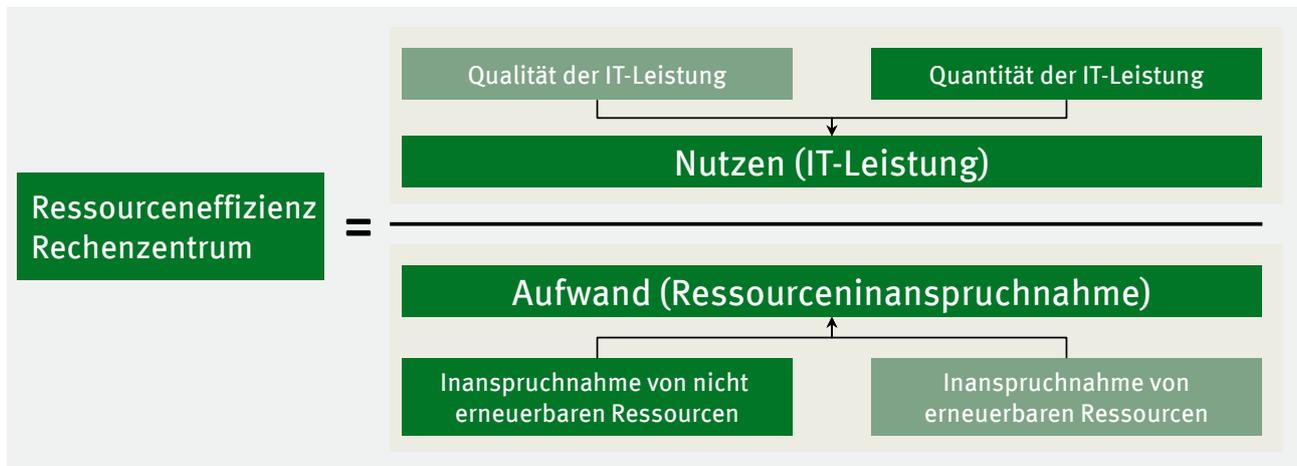
- ▶ Bestandsaufnahme zu vorhandenen Kennzahlen, Indikatoren und Methoden für die Bewertung der Ressourceneffizienz von RZ (Lückenanalyse, Bewertung der Vor- und Nachteile)
- ▶ Entwicklung eines Kennzahlensystems für die ganzheitliche und richtungssichere Beurteilung der Ressourceneffizienz und Umweltwirkung eines RZ
- ▶ Überprüfung der Anwendbarkeit des Kennzahlensystems an mehreren praktischen Beispielen
- ▶ Ergebnisaufbereitung und Einspeisung in nationale und internationale Harmonisierungsdiskussionen, in aktuelle Normungsaktivitäten und in den Blauen Engel RAL UZ 161

1.5 Untersuchungsrahmen

Der Untersuchungsgegenstand des Forschungsvorhabens ist ein praktikables Kennzahlensystem zur ganzheitlichen und richtungssicheren Bewertung der Ressourceneffizienz und Umweltwirkungen eines RZ. Die Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich der Definition vergleichbarer Kenngrößen für die IT-Leistung (Nutzenindikatoren) und die Ressourceninanspruchnahme eines RZ über den Lebens-

zyklus (Aufwandsindikatoren). Um die Ressourceneffizienz und Umweltwirkungen von RZ ganzheitlich zu quantifizieren, werden die IT-Leistung und Ressourceninanspruchnahme von RZ im Detail betrachtet (siehe Abbildung 6).

Abbildung 6: Untersuchungsgegenstand und Vordefinition der Systemgrenzen



Eigene.

Der Nutzen eines RZ ist auf die Betriebsphase begrenzt und besteht darin, eine bestimmte Nachfrage nach IT-Diensten (E-Mails, Webseiten, Simulationsrechnungen etc.) in einer definierten Qualität (Bearbeitungsdauer, Antwortzeit, Verfügbarkeit, Datensicherheit etc.) zu bedienen. In dieser Studie wird vor allem die Möglichkeit untersucht, über die Menge der erbrachten IT-Leistungen eine hinreichende Vergleichbarkeit des Nutzens herzustellen. Der Aufwand zur Bereitstellung der IT-Leistungen bemisst sich nach der Inanspruchnahme natürlicher Ressourcen über den gesamten Lebensweg beginnend bei der Herstellung über die Distribution und Nutzung bis hin zur Entsorgung. Die Systemgrenzen der zwei Forschungsschwerpunkte werden in Kapitel 3 weiter konkretisiert.

1.6 Methodik

Bei der Bearbeitung des Vorhabens kamen verschiedene wissenschaftliche Methoden zum Einsatz:

- ▶ Sekundärforschung - Im Rahmen der Sekundärforschung (engl.: desk research) erfolgte eine systematische inhaltlich-analytische Recherche (Auswertung von Fachliteratur, Internetseiten, Datenbanken und Statistiken), um die Vor- und Nachteile bestehender Ansätze zu bewerten, Forschungslücken zu identifizieren und die Entwicklungsschwerpunkte des Vorhabens darauf auszurichten.
- ▶ Experteninterviews - Um spezifisches Fachwissen zu relevanten Problemstellungen und Themenbereichen zu erschließen, wurden Interviews mit Experten aus der Praxis und der Wissenschaft (vor allem mit Teilnehmern des Begleitkreises) durchgeführt.
- ▶ Begleitkreistreffen – Projektbegleitend wurden drei ganztägige Workshops durchgeführt, um vorhandene Überlegungen abzusichern und zu erweitern und neue Lösungen zu entwickeln. Die Begleitkreistreffen dienten zudem der Verbreitung der Ergebnisse, da die Experten als Multiplikatoren die Lösungsansätze in weitere relevante Arbeitsgruppen trugen.
- ▶ Fallstudien – Fallstudien dienten der Identifikation von Herausforderungen und Prüfung der praktischen Anwendbarkeit des Kennzahlensystems. Im Rahmen der Fallstudien kamen verschiedene Techniken der Datenerfassung und Datenanalyse zum Einsatz.
- ▶ Modellierung / Simulation – Um die Ergebnisse aus den Fallstudien generalisieren und die Robustheit und Richtungssicherheit der Kennzahlen überprüfen zu können, wurden mit den Daten mittels mathematischer Modelle variierende Auslastungsgrade und Betriebszustände der RZ simuliert.

2 Analyse und Bewertung des aktuellen Wissenstandes

Um den aktuellen Wissenstand zu Kennzahlen, Indikatoren und Methoden für die Bewertung der Ressourceneffizienz und Umweltwirkungen von RZ zu erfassen, wurde zunächst wissenschaftliche Literatur systematisch analysiert. Hierbei wurden insgesamt fünf übergeordnete Kategorien von Instrumenten für die Bewertung der Ressourceneffizienz und Umweltwirkungen von RZ identifiziert:

Umweltkennzahlen und Indikatoren

Umweltkennzahlen und Indikatoren beschreiben die Umweltleistung eines Unternehmens, Aktivitäten des betrieblichen Umweltmanagements oder den Zustand der unternehmensexternen Umwelt [BMU/UBA 1997]. Sie verdichten umfangreiche Umweltdaten auf eine überschaubare Anzahl aussagekräftiger Schlüsselinformationen (Energieeffizienz, Rohstoffeffizienz). Beispiele für RZ sind die *Power Usage Effectiveness* (PUE, [Belady und Patterson 2008]) oder die *Corporate Average Data Center Efficiency* (CADE, [Kaplan et al. 2008]). Erste Kennzahlenstandards für RZ der *International Organization for Standardization* (ISO) und des *Deutschen Instituts für Normung* (DIN) sind bereits in der Entwicklung und finden sich in den Normen ISO 30134, ISO 21836 und EN 50600 (siehe Abschnitt 2.1.4).

IT-Benchmarks und Anlagenkennlinien

Benchmark-Werte und Kennlinien technischer Systeme und Komponenten werden überwiegend in Testumgebungen unter genormten Bedingungen mit standardisierten Arbeitslasten ermittelt. Sie dienen den Anwendern (Nutzer) als Orientierungshilfe bei der Beschaffung und den Anbietern (Hersteller) zur Überprüfung der Wirkungsgrade ihrer Produkte. Beispiele für diese Kategorie von Bewertungsmethoden mit Bezug zum RZ sind *Coefficient of Performance* (COP)-Kennlinien für Kälteanlagen bei verschiedenen Auslastungen und Vorlauftemperaturen oder der *SPECPower_ssj2008*-Benchmark für Server [SPEC 2017a].

Lebenszyklusanalysen und Ökobilanzierungen

Lebenszyklusanalysen und Ökobilanzierungen betrachten mehrere Umweltauswirkungen, die durch Entnahmen aus der Umwelt (z. B. Rohstoffe) und Einträge in die Umwelt (z. B. CO₂-Emissionen) entstehen. Bei der Bewertung werden der gesamte Lebensweg „von der Wiege bis zur Bahre“ oder ausgewählte Lebensabschnitte wie die Herstellungsphase betrachtet. Ein Beispiel für eine Umweltauswirkung ist das Treibhausgaspotenzial (THG, engl.: global warming potential, GWP), das üblicherweise in CO₂-Äquivalenten ausgedrückt wird. Die Standards für eine ISO-konforme Ökobilanz für Produkte und Dienstleistungen sind in den Normen ISO 14040 (Grundsätze und Rahmenbedingungen) und ISO 14044 (Anforderungen und Anleitungen) beschrieben.

Best Practice Frameworks und Reifegradmodelle

Best Practice Frameworks sind nach Teilbereichen strukturierte Sammlungen von in der Praxis bewährten, erfolgreichen Vorgehensweisen. Reifegradmodelle zeigen meist Entwicklungspfade mit stufenweise ansteigender Komplexität der Implementierung von Best Practices in den Teilbereichen auf. Beispiele für RZ sind der *European Union Code of Conduct for Data Centers* (EU CoC DC, [Acton et al. 2017]) und das *Data Center Maturity Model* des *The Green Grid* [Singh et al. 2011].

Rating Systeme und Zertifizierungen

Rating Systeme vergeben üblicherweise Punkte für die im Vergleich zu definierten Maßstäben (Benchmarks, Best Practices) erreichte Leistung. Sie beziehen oft mehrere gewichtete (ökologische)

Einflussbereiche ein. Zertifizierungen prüfen dabei die Einhaltung definierter Mindeststandards. Beispiele für RZ sind der *Blaue Engel für energieeffizienten RZ-Betrieb* [RAL 2015] und der *Certified Energy Efficiency Datacenter Award*¹¹.

Auf eine Diskussion der Best Practice Frameworks und Reifegradmodelle sowie der Rating Systeme und Zertifizierungen wird aufgrund der Zielstellung dieser Studie verzichtet. Der Istzustand zu den Kennzahlen und IT-Benchmarks mit Bezug zu RZ wird im Abschnitt 2.1 dargestellt. Verfahren der Ökobilanzierung und Lebenszyklusanalyse werden im Abschnitt 2.2 diskutiert.

2.1 Bestandsaufnahme zu Kennzahlen für Rechenzentren

2.1.1 Anforderungen an Kennzahlen und Kennzahlensysteme

Zahlreiche Autoren haben sich mit (Umwelt-)Kennzahlen und Kennzahlensystemen im Allgemeinen und speziell für die Bewertung der Ressourceneffizienz und Umweltwirkungen von RZ auseinandergesetzt. Hierbei wurden von den Autoren verschiedene Qualitätsanforderungen benannt (vgl. [UBA 1997, Weiß et al. 2013, Ranganathan et al. 2009, Wang und Khan 2011, Newcombe 2011, Wilkens et al. 2012, Schödwel et al. 2012b]), deren Kerninhalte sich wie folgt zusammenfassen lassen:

Anforderungen an Kennzahlen:

- ▶ Zielorientiert: Die Kennzahl soll ein klares, nachvollziehbares Ziel (hier: Bewertung Ressourceneffizienz und Umweltwirkungen von RZ) beschreiben.
- ▶ Messbar: Die zur Berechnung der Kennzahl erforderlichen Größen sollen mit angemessenem wirtschaftlichem und technischem Aufwand messbar sein.
- ▶ Verständlich: Die Kennzahl trifft eindeutige inhaltliche Aussagen und hat eine nachvollziehbare Optimierungsrichtung. Aus der Bezeichnung kann intuitiv die Bedeutung abgeleitet werden.
- ▶ Optimierbar: Die Kennzahl gibt Hinweise zu Verbesserungsansätzen und kann durch die Umsetzung von Maßnahmen gezielt beeinflusst werden.
- ▶ Vergleichbar: Für die Kennzahl sind eindeutige Messmethoden, -punkte, -perioden und -intervalle definiert. Die Kennzahl ist möglichst unabhängig von externen Einflussfaktoren bzw. wenn Einflüsse existieren, sollten diese dargestellt und ggfs. eine Normierung möglich sein.

Anforderungen an Kennzahlensysteme:

- ▶ Unabhängig: Kennzahlen einer hierarchischen Ebene oder innerhalb einer logischen Gruppe sollten möglichst unabhängig voneinander sein. Wenn Wechselwirkungen auftreten, und die Beibehaltung beider Kennzahlen sinnvoll ist, sollten diese dargestellt und quantifiziert werden.
- ▶ Vollständig: Das Kennzahlensystem sollte alle für ein RZ wesentlichen Umweltaspekte abbilden. Das Kennzahlensystem sollte alle Teilbereiche eines RZ abdecken.
- ▶ Einheitlich: Die Datenerhebungsmethoden für Kennzahlen mit gleicher Bedeutung für das System sollten einheitlich bzw. ähnlich sein (z. B. möglichst nicht Messwerte mit Schätzungen kombinieren)
- ▶ Handhabbar: Die Anzahl an Kennzahlen eines Systems sollte sich auf ein Höchstmaß (fünf bis acht Kennzahlen) beschränken, um für die Anwender interpretierbar zu bleiben.

Die in der Literatur identifizierten Kennzahlen und Kennzahlensysteme genügen den Anforderungen immer nur teilweise. Zum Beispiel war das Ziel der PUE, die das Verhältnis aus Energiebedarf des RZ und der IT darstellt (siehe Formel 1), die Energieeffizienz des gesamten RZ zu beschreiben (vgl. [Beldady und Patterson 2008]). Mittlerweile ist klar, dass die PUE die Energieeffizienz der Gebäudetechnik eines RZ im Betrieb charakterisiert und nur in Verbindung mit weiteren Kennzahlen eine Aussage

¹¹ <http://www.ceedacert.com>

über die Energieeffizienz eines RZ zulässt. Denn Verbesserungsmaßnahmen wie die Konsolidierung durch Virtualisierung oder der Ersatz alter IT-Geräte durch neue energieeffiziente führen zur Verringerung des IT-Energiebedarfes bei gleicher IT-Leistung. Eine derartige Steigerung der Effizienz verschlechtert aber die PUE, wenn die Gebäudetechnik ihren Energiebedarf nicht in gleichem Maße reduzieren kann, was bei oft statischen Kühlsystemen die Regel ist. Eine Orientierung des Managements an der PUE würde zu suboptimalen Entscheidungen führen, da kein Bezug zur IT-Leistung hergestellt wird. Problematisch war lange Zeit auch das Fehlen eindeutiger Mess- und Berechnungsvorschriften für die PUE, wobei dieser Missstand durch ergänzende Richtlinien (vgl. [Avelar et al. 2012]) und eine darauf beruhende Normung der Kennzahl (siehe Abschnitt 2.1.4) behoben wurde. Dass der Name (deutsch: Stromnutzungseffektivität) unverständlich und der Wertebereich (unendlich bis eins) wie auch die Optimierungsrichtung (Minimierung) nicht intuitiv sind, sind weitere Kritikpunkte.

Das Beispiel verdeutlicht die Problematik der Spezifikation von Kennzahlen. Daher dienten die angeführten Anforderungen im Rahmen des Forschungsvorhabens einerseits der objektiven Bewertung bestehender Kennzahlen und Kennzahlensysteme. Mit ihnen wurden systematisch die Stärken und Schwächen der existierenden Ansätze identifiziert und so der Entwicklungsbedarf bestimmt. Andererseits dienten die Anforderungen als Richtlinien der Neu- und Weiterentwicklung von Kennzahlen.

2.1.2 Steckbrief für Kennzahlen

Im Rahmen der Analyse von Sekundärliteratur wurden mehr als einhundert Kennzahlen und Indikatoren für die Bewertung der Ressourceneffizienz und Umweltwirkungen von RZ identifiziert. Um trotz der Vielzahl an Vorschlägen jeweils die wesentlichen Merkmale erfassen, systematisch bewerten und vergleichen zu können, wurde in Anlehnung an [Schödwell et al. 2013a] das Kennzahlensteckbriefformat verwendet. Den Entwurf des Kennzahlensteckbriefes zeigt Tabelle 4:

Tabelle 4: Steckbrief für Kennzahlen

Name und Kürzel der Kennzahl	
Beschreibung / Einsatzszenario	Welchen Sachverhalt stellt die Kennzahl dar? Wann ist die Verwendung der Kennzahl sinnvoll?
Wertebereich / Zielwert	Welchen Wertebereich und welche Optimierungsrichtung hat die Kennzahl? Was ist das Optimum der Kennzahl?
Verantwortlichkeit	Wer verantwortet die Datenermittlung und -aufbereitung, wer die Zielwertehaltung und die Eskalation?
Datenermittlung	Angaben zur Datenaufnahme und Datenquellen, zu den Messhäufigkeiten und erforderlichen Messwerten und Kennzahlen
Datenaufbereitung	Angaben zum Berechnungsweg (Metrik)
Abhängigkeiten	Angaben zu den Wirkungs- und Ursachenzusammenhängen der Kennzahl zu anderen Kennzahlen: <ul style="list-style-type: none"> ▶ Die linke Seite dokumentiert die Wirkung anderer Kennzahlen auf die dargestellte Kennzahl. Die Wirkrichtung gibt einen positiven Zusammenhang (+) wider, wenn eine Erhöhung der Ursachenkennzahl (Kennzahl 1) eine Erhöhung der dargestellten Kennzahl erzeugt bzw. einen negativen Zusammenhang (-) wider, wenn eine Erhöhung der Ursachenkennzahl (Kennzahl 2) eine Verringerung der dargestellten Kennzahl erzeugt. ▶ Die rechte Seite dokumentiert, welche Wirkung die dargestellte Kennzahl auf andere Kennzahlen hat. Die Wirkrichtung gibt einen positiven Zusammenhang (+) wider, wenn eine Erhöhung der dargestellten Kennzahl eine Erhöhung der Wirkungskennzahl (Kennzahl 3) erzeugt, bzw. einen negativen Zusammen-

hang (-) wider, wenn eine Erhöhung der dargestellten Kennzahl eine Verringerung der Wirkungskennzahl (Kennzahl 4) erzeugt.

Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
Kennzahl 1	+	Kennzahl 3	+
Kennzahl 2	-	Kennzahl 4	-

[Schödwell et al. 2013a].

Häufig finden sich in Kennzahlensteckbriefen auch Angaben zu den Toleranzwerten, zu den Maßnahmen bei Überschreitung der Toleranzwerte, zur geeigneten Präsentation (Darstellungsformen, Aggregationsstufen) und zur Archivierung. Auf diese in der Praxis vom Betreiber nach Bedarf zu definierenden Aspekte wurde bei der Dokumentation der Kennzahlen in Abschnitt 8.1 im Anhang verzichtet.

2.1.3 Wichtige Organisationen und richtungsweisende Ansätze

Auf eine detaillierte Vorstellung aller bei der Literaturanalyse identifizierten Kennzahlen und Indikatoren wird aufgrund der Vielzahl im Folgenden verzichtet. Hierzu können die Übersichten im Abschnitt 2.1.5 in Verbindung mit den Kennzahlensteckbriefen im Abschnitt 8.1 im Anhang herangezogen werden. Nachstehend werden die Organisationen gelistet, die den bisherigen Entwicklungsprozess maßgeblich geprägt haben, und die wichtigsten Konzepte für Kennzahlen vorgestellt:

- ▶ *Centre of Energy Policies and Economics*
- ▶ *Lawrence Berkeley National Laboratory*
- ▶ *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE)*
- ▶ *Uptime Institute (MC Kinsey, Gartner)*
- ▶ *The Green Grid*
- ▶ *British Computer Society*
- ▶ *Green IT Promotion Council*

Die Entwicklung von Kennzahlen zur Bewertung der Ressourceneffizienz und Umweltwirkungen von RZ begann Ende der Achtziger Jahre, als Schweizer Betreiber mit dem Indikator *K* die Energieeffizienz der zentralen Gebäudeinfrastruktur als Quotient aus elektrischer Leistungsaufnahme der IT und des gesamten RZ bestimmten [Aebischer et al. 2003]. Auf Basis dieses Konzepts entwickelte *The Green Grid* die *Data Center infrastructure Efficiency (DCiE)* bzw. die reziproke PUE [Belady und Patterson 2008]. Die Motivation der Kennzahlen ist es, den energetischen Mehraufwand der Gebäudetechnik für den Betrieb der IT zu quantifizieren. Eine Aussage über die Energieeffizienz des RZ kann mit der DCiE und der PUE nicht getroffen werden, da beide Kennzahlen keinen Bezug zur IT-Leistung herstellen (siehe Abschnitt 2.1.1). Kennzahlen für die Bewertung der Energieeffizienz der Teilsysteme der Gebäudeinfrastruktur schlagen u. a. [Greenberg et al. 2006, Mathew et al. 2009, Mathew et al. 2010] vor.

Um die Energieeffizienz der IT zu quantifizieren, finden sich in der Literatur verschiedene Ansätze. Einige Autoren schlagen die Auslastung, speziell für Server die Auslastung der Hauptprozessoren (engl.: central processing unit, CPU), als Indikator für die Energieeffizienz der IT vor (vgl. [Belady und Patterson 2008, Kaplan et al. 2008]). Der Grund ist der hohe Stromverbrauch der IT im Leerlauf, der eine hohe Auslastung der IT-Geräte aus energetischer Sicht begünstigt, und die Annahme, dass eine hohe Auslastung immer auch mit mehr nützlicher Arbeit der IT einhergeht.

Andere Autoren empfehlen, die energetischen Verluste durch die IT-internen Versorgungsinfrastruktur über das Verhältnis des Stromverbrauchs der datenverarbeitenden Komponenten (CPU, Arbeitsspeicher etc.) zum IT-Gesamtstromverbrauch zu erfassen (vgl. [Aebischer et al. 2003, Stanley et al. 2007, Barosso und Hoelzle 2009, Patterson et al. 2012]). Mit diesem Ansatz wird der energetische

Mehraufwand durch Komponenten der IT quantifiziert, die keinen unmittelbaren Nutzen im Sinne von IT-Leistung stiften (z. B. Netzteile, Lüfter etc.). Problematisch ist die Messung der Stromverbrauchs- werte der datenverarbeitenden Komponenten und dass der Ansatz die IT-Leistung nicht miteinbezieht.

Nur wenige Autoren versuchen sich an der Bewertung der Energieeffizienz der IT als Verhältnis aus IT-Leistung zum energetischen Aufwand. Als Indikatoren der IT-Leistung werden die abgeschlossenen Netzwerktransaktionen, Lese- und Schreiboperationen oder Rechenzyklen ebenso vorgeschlagen wie die Anzahl der laufenden Betriebssysteme, der abgeschlossenen Aufgaben und IT-Dienste oder der an die Außenwelt übertragenen Bits [Brill 2007, Anderson et al. 2008, Haas et al. 2009, Newcombe 2012]. Aufgrund der Vielfältigkeit der IT-Systeme in RZ gibt es über den richtigen Ansatz unter Experten keine Einigkeit (vgl. [Monroe et al. 2009, Newcombe 2012, Taskforce 2014]). Autoren suchen vor allem Antworten auf die Frage, inwiefern die von der IT erbrachte Leistung einen Nutzen stiftet (Arbeit vs. „nützliche“ Arbeit, vgl. [Anderson et al. 2008, Blackburn et al. 2010]) und wie dieser vergleichbar quantifiziert werden kann. Hierbei kommt es einerseits auf die Perspektive (Anbieter vs. Anwender) und andererseits auf die Ebene (Hardware vs. Software vs. Dienste) der Bewertung an. Die Definition RZ-übergreifend vergleichbarer Nutzenindikatoren ist hierbei die zentrale Herausforderung.

Um vergleichbare Kenngrößen der Energieeffizienz auf Ebene der IT-Geräte zu bilden, erscheint die Zuhilfenahme von Energie-Performance-Benchmarks erfolgsversprechend (vgl. [Haas et al. 2009, GITPC 2012, Ackermann und Hintemann 2016]). Mit dem *SPECpower_{ssj2008}*-Benchmark der *Standard Performance Evaluation Corporation* (SPEC) steht seit dem Jahr 2008 ein Benchmark für Server zur Verfügung, der über eine standardisierte Arbeitslast die Energieeffizienz als Verhältnis aus IT-Leistung und Energiebedarf darstellt (vgl. [SPEC 2017a]). Die folgenden industrienahen Organisationen haben diesem Prinzip folgend Energie-Performance-Benchmarks entwickelt:

- ▶ *Transaction Processing Performance Council* (TPC)
- ▶ *Storage Performance Council* (SPC)
- ▶ *Storage Networking Industry Association* (SNIA)
- ▶ *Alliance for Telecommunications Industry Solutions* (ATIS)
- ▶ *Energy Consumption Rating Initiative* (ECR)

Darüber hinaus existieren Energie-Performance-Benchmarks wissenschaftlicher Initiativen und Organisationen wie der *Green500*-Benchmark [Hsu und Feng 2007] und der *JouleSort*-Benchmark [Rivoire et al. 2007] oder von privatwirtschaftlichen Unternehmen wie der *VMmark*¹²-Benchmark von *VMware* und der *SAPS*-Benchmark von *SAP* [SAP 2017]. Die für das zu entwickelnde Kennzahlensystem möglicherweise geeigneten Benchmarks werden bei der Definition der Indikatoren zur Erfassung der IT-Leistung in Abschnitt 3.3.1 im Detail diskutiert.

Ein weiterer Ansatz, um die Energieeffizienz des RZ zu charakterisieren, ist die Quantifizierung der Energieproportionalität. Energieproportionalität wurde im Zusammenhang mit RZ erstmals von [Barosso und Hoelzle 2007] formuliert. Sie beschreibt, inwiefern der Energiebedarf eines RZ von der Menge der erbrachten IT-Leistung abhängt. Aus dieser Überlegung heraus abgeleitete Kennzahlen wie die *Data Centre Fixed to Variable Energy Ratio* (DCFVER, [Newcombe 2012]) quantifizieren, inwieweit ein RZ nur in dem Maße Energie verbraucht, wie es auch nützliche Arbeit verrichtet. Energieproportionalität kann für unterschiedliche Systemebenen beginnend bei einzelnen Komponenten (z. B. CPU) über komplette technische Systeme (z. B. Server) bis hin zur Ebene des gesamten RZ ermittelt werden.

Neben den skizzierten Ansätzen für die Bewertung der Energieeffizienz wird in jüngeren Arbeiten das Augenmerk verstärkt auf Aspekte der ökologischen Nachhaltigkeit und der Ressourceneffizienz wie das THG durch CO₂-Emissionen [Belady et al. 2010], den Wasserverbrauch [Patterson et al. 2011], die

¹² <http://www.vmware.com/products/vmmark/>

Nutzung erneuerbarer Energien [GITPC 2012], die Wiederverwendung der Abwärme [Patterson et al. 2010] und die verantwortungsvolle Entsorgung [Brown et al. 2012] gelegt. In der Praxis sind diese Ansätze bisher aber noch weitestgehend unbekannt [Schoedwell et al. 2013b].

2.1.4 Stand der Normung von Kennzahlen für Rechenzentren

Eine Übersicht über Standards im IT-Sektor findet sich in [ILNAS und ANEC 2015]. Für das Vorhaben sind insbesondere die EN 50600 und ISO 30134 relevant. Darüber hinaus existiert folgende Gremienlandschaft im Bereich der Normung mit Bezug zu RZ und Kennzahlen:

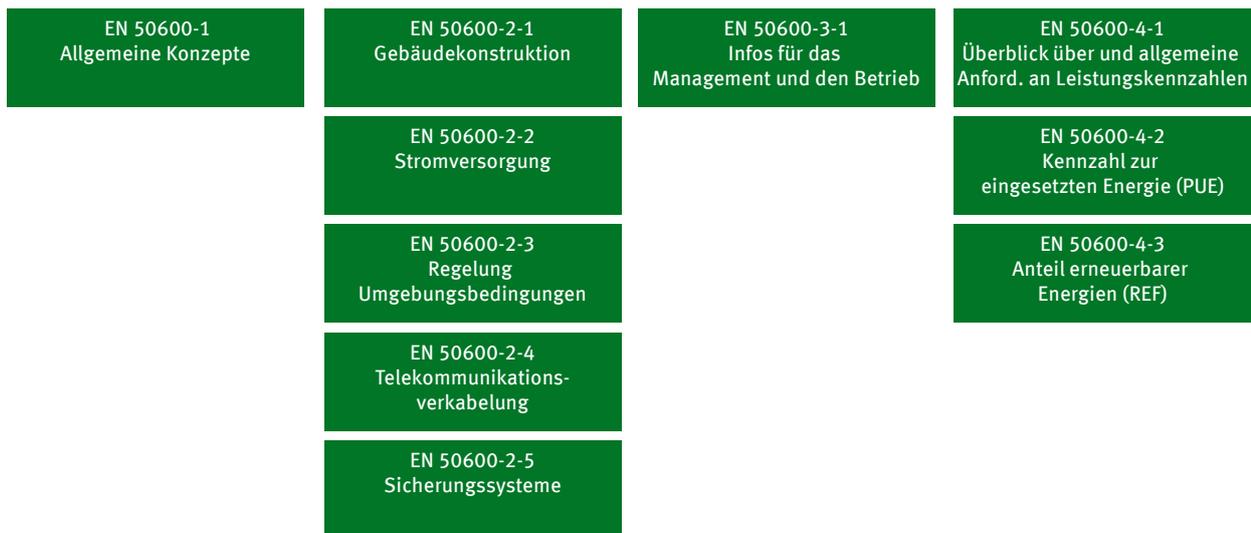
- ▶ ISO/IEC JTC1/SC39 "Information Technology Standards – ISO 30134/30133/21836
- ▶ CLC/TC 215 mit nationalen Expertengremien (DKE/GUK 715.5): EN 50600
- ▶ International Telecommunication Union - Technical (ITU-T SG 5)
- ▶ IEC/TC 108: Modular Data Centre
- ▶ IEC/SC 48D: Einhausungen
- ▶ CEN/CLC/ETSI CG Green Data Centre
- ▶ ETSI ATTM: KPI for ICT sites

2.1.4.1 EN 50600: Einrichtungen und Infrastrukturen von Rechenzentren

Die EN 50600 „Informationstechnik – Einrichtungen und Infrastrukturen von Rechenzentren“ hat den Anspruch praxisbezogene Aspekte rund um die RZ-Infrastruktur allgemeingültig zu standardisieren. Sie stellt den Stand der Technik für die Planung, den Bau und den Betrieb von RZ dar. Die EN 50600-Reihe betrachtet ausschließlich die Bauphysik und Gebäudetechnik – die IT-Geräte und die Software sind nicht Bestandteil der Norm. Der Gültigkeitsbereich der EN 50600 umfasst alle Länder der Europäischen Union (EU). Ein vergleichbarer weltweiter ISO-Standard existiert bisher nicht.

Die einzelnen Teile der Normenreihe werden nach und nach eingeführt. Im Mai 2013 wurde der erste Teil der Norm EN 50600 „Informationstechnik – Einrichtungen und Infrastrukturen von Rechenzentren – Teil 1: Allgemeine Konzepte“ veröffentlicht. Im April 2016 ist mit der EN 50600-2-5 „Sicherheitssysteme“ der letzte Abschnitt des zweiten Teils erschienen.

Abbildung 7: Relevante EN-Normen: EN 50600



Eigene.

Die Normteile der Reihe EN 50600-2-X legen Anforderungen und Empfehlungen für Einrichtungen und Infrastrukturen von RZ fest, um die Klassifikation für „Verfügbarkeit“, „physische Sicherheit“ und „Befähigung zur Energieeffizienz“ zu unterstützen, die aus der Norm EN 50600-1 ausgewählt wurden.

Für das Forschungsvorhaben ist insbesondere der Norm-Teil 3 „Management und Betrieb von Rechenzentren“ und der Norm-Teil 4 „Kennzahlen“ von Bedeutung. Der Norm-Teil 3 wurde am 08.04.2016 veröffentlicht und befindet sich derzeit in der Überarbeitung. Im Norm-Teil 3 wurden bereits erste KPI für die folgenden betrieblichen Prozesse im RZ definiert:

- ▶ Betriebsmanagement
- ▶ Störfallmanagement
- ▶ Änderungsmanagement
- ▶ Bestands- und Konfigurationsmanagement
- ▶ Kapazitätsmanagement

Auf der Ebene der RZ-Managementprozesse werden Kennzahlen für folgende Prozesse beschrieben:

- ▶ Verfügbarkeitsmanagement
- ▶ Sicherheitsmanagement
- ▶ Ressourcenmanagement
- ▶ Energiemanagement
- ▶ Produktlebenszyklusmanagement
- ▶ Kostenmanagement
- ▶ RZ-Strategie
- ▶ Dienstleistungsniveaumanagement
- ▶ Kundenmanagement

Für den Norm-Teil 3 den EN 50600 wurde in Anlehnung an die Prozesse der *IT Infrastructure Library* (ITIL) folgende neue Struktur vorgeschlagen:

- ▶ EN 50600-3-1 Betriebsorganisation
- ▶ EN 50600-3-2 Betriebsprozesse
- ▶ EN 50600-3-3 Managementprozesse

Der Norm-Teil 4 beschreibt Leistungskennzahlen, die für den Betrieb eines RZ wichtig sind. Der Norm-Teil 4 soll helfen, die Bereitstellung betrieblicher Infrastrukturen effektiver und effizienter zu gestalten. Das Ziel der Kennzahlen ist:

- ▶ die Minimierung des Verbrauchs von Energie und anderer Ressourcen
- ▶ die Maximierung der Effektivität der IT-Last bei minimalem Energieverbrauch
- ▶ die Wiederverwendung von Energien darzustellen
- ▶ die Verwendung erneuerbarer Energien zu berücksichtigen.

Die Norm-Teile 4-1, 4-2 und 4-3 wurden im Juni 2017 veröffentlicht. Nachfolgend werden die Inhalte der Norm-Teile 4-1 bis 4-3 näher erläutert.

EN 50600-4-1: Überblick über und allgemeine Anforderungen an Leistungskennzahlen

Bearbeitungsstand: Norm, 2017-06

Verantwortlich: Deutschland (DKE GUK 715.5)

Gegenstand: Der Norm-Teil 4-1 legt die Struktur, die Begriffe, die Terminologie und die Abgrenzungsbedingungen von Leistungskennzahlen für die Effektivität bzw. den Wirkungsgrad des Ressourcenverbrauchs von RZ fest. Er definiert gemeinsame Anforderungen und Ziele an die Leistungskennzahlen für die Effektivität bzw. den Wirkungsgrad des Ressourcenverbrauchs von RZ fest. Darüber hinaus bietet der Norm-Teil 4-1 allgemeine Informationen zur Verwendung dieser Leistungskennzahlen.

EN 50600-4-2: Kennzahl zur eingesetzten Energie (PUE)

Bearbeitungsstand: Norm, 2017-06

Verantwortlich: Deutschland (DKE GUK 715.5)

Der Teil 50600-4-2 entspricht der ISO 30134-2 (siehe Abschnitt 2.1.4.2).

EN 50600-4-3: Anteil erneuerbarer Energien (REF)

Bearbeitungsstand: Norm, 2017-06

Verantwortlich: Deutschland (DKE GUK 715.5)

Gegenstand: Der Norm-Teil 4-3 definiert die Methode zur Bestimmung des Anteils der erneuerbaren Energien (engl.: Renewable Energy Factor, REF) am RZ-Gesamtenergiebedarf. Die EN 50600-4-3 legt eine Methodik zur Berechnung und Darstellung des REF fest und enthält Informationen zur korrekten Interpretation des REF. Die Definition des REF entspricht der ISO 30134-3 (siehe Abschnitt 2.1.4.2). Der REF ist definiert als das Verhältnis aus genutzter erneuerbarer Energie im RZ und dem Gesamtenergiebedarf des RZ (siehe Formel 2 im Abschnitt 2.1.4.2). Der Höchstwert von eins besagt, dass einhundert Prozent des RZ-Energieverbrauchs aus erneuerbarer Energie bestritten werden. Die Norm trifft keine Vorgaben oder Empfehlungen für Grenzwerte.

Der Teil des RZ-Energiebedarfes, der aus erneuerbaren Energien bereitgestellt wird, muss mit demselben Erfassungs- und Bilanzierungsverfahren gemessen werden, wie der RZ-Energiebedarf, der nicht aus erneuerbaren Energie gedeckt wird. Die RZ-eigene Energiebereitstellung (z. B. über eine Photovoltaik (PV)-Anlage auf dem Dach) muss bei der Bilanzierung mit berücksichtigt werden. Die Berechnung des REF erfordert die Aufzeichnung und Dokumentation des jährlichen RZ-Energieverbrauchs und der anteiligen Energiemenge aus erneuerbaren Energien über einen übereinstimmenden Zeitraum von zwölf Monaten. Damit ein veröffentlichter REF aussagekräftig ist, muss die veröffentlichende Organisation folgende Informationen zur Verfügung stellen:

- ▶ das untersuchte RZ (einschließlich der Bilanz- bzw. Systemgrenzen)
- ▶ den REF-Wert
- ▶ das Datum, an dem die Messdauer beendet wurde (im Format der ISO 8601)

Auf Grund regionaler Unterschiede bei erneuerbaren Energien sollten alle Veröffentlichungen zum REF folgende Punkte einschließen:

- ▶ die verwendete Datenbasis für die Bewertung der erneuerbaren Energien;
- ▶ die Organisation/Organisationen, die die Zertifikate für erneuerbare Energie ausgegeben hat/haben;
- ▶ Menge der jährlich am Standort des RZ erzeugten erneuerbaren Energie;
- ▶ jährliche Zertifikate für erneuerbare Energie oder den schriftlichen Nachweis des (der) Energieversorger(s), das die im Berichtszeitraum gelieferte Energie der gegebenen Definition von erneuerbarer Energie entspricht.

2.1.4.2 ISO 30134: Leistungskennzahlen für Rechenzentren

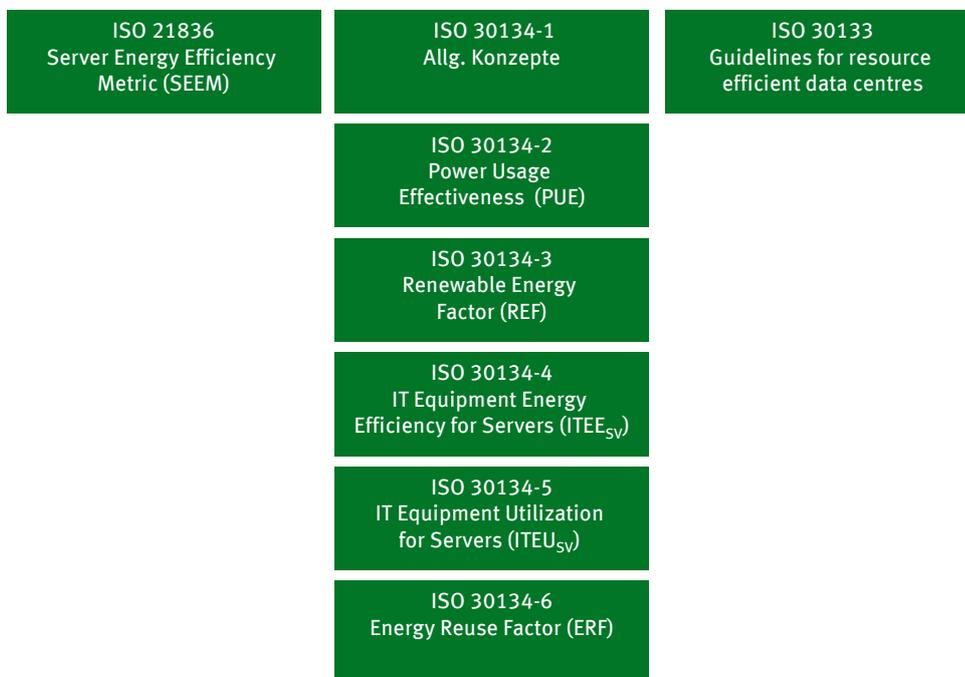
Das zuständige Komitee für die internationale Normung von Kennzahlen im Bereich RZ ist das ISO/IEC JTC 1, Information Technology, SC 39, Sustainability for and by Information Technology. Das ISO-Normungsprojekt „Sustainability for and by Information Technology - Data centres - Key performance indicators“ soll Leistungskennzahlen bereitstellen, mit dem die Effektivität und die Effizienz der RZ-Infrastruktur gemessen und veranschaulicht werden kann. Unter anderem sollen die Kennzahlen das Erreichen folgender Zielsetzungen messbar machen:

- ▶ Minimierung der Ressourcenbedarfe (z. B. Energie- oder Wasserbedarf)
- ▶ Maximierung der IT-Leistung bei minimalem Energiebedarf
- ▶ Nutzung von Abwärme aus dem RZ
- ▶ Einsatz erneuerbarer Energien

Die ISO 30134 definiert ausdrücklich keine Grenz- oder Zielwerte für die beschriebenen Kennzahlen. Zum aktuellen Stand wurden bzw. werden im Rahmen der ISO 30134 folgende Norm-Teile bearbeitet:

- ▶ 30134-1: Overview and general requirements
- ▶ 30134-2: Power Usage Effectiveness (PUE)
- ▶ 30134-3: Renewable Energy Factor (REF)
- ▶ 30134-4: IT Equipment Energy Efficiency for Servers (ITEE_{SV})
- ▶ 30134-5: IT Equipment Utilization for Servers (ITEU_{SV})
- ▶ 30134-6: Energy Reuse Factor (ERF)
- ▶ 30134-X: Cooling Efficiency Ratio (CER), Cooling Performance Ratio (CPR)

Abbildung 8: Relevante ISO-Normen: ISO 30134, ISO 21836 und ISO 30133



Eigene.

Ergänzend zur ISO 30134 ist die Norm ISO 30133 „Information Technology – Data Centres – Guidelines for resource efficient Data Centres“ in der Bearbeitung. Hier werden allgemeine Hinweise und Richtlinien für den ressourceneffizienten RZ-Betrieb geben.

Offizielle Partner, die sich an den Normungsprojekte ISO 30134 und ISO 30133 beteiligen, sind die *International Telecommunication Union (ITU)*, das *European Telecommunications Standards Institute (ETSI)*, TC215, TC100 und SPEC. Seit Beginn 2016 unterstützen auch The Green Grid und ASHRAE offiziell den Normungsprozess ISO 30134.

Im Folgenden wird der aktuelle Stand der einzelnen Teile zusammengefasst.

ISO 30134-1: Überblick und allgemeine Anforderungen

Aktueller Bearbeitungsstand: Norm, 2016-03

Der Norm-Teil 1 stellt die allgemeine Struktur des Normungsansatzes dar und definiert die grundlegenden Begriffe und Anforderungen an die Kennzahlen. Darüber hinaus werden die Systemgrenzen und die Ziele für die Kennzahlen festgelegt. Dabei wird der Anspruch formuliert, nicht nur den RZ-Strombedarf zu betrachten. Es sollen ausdrücklich alle RZ-Ressourcenbedarfe (z. B. auch Wasser) berücksichtigt werden. In diesem Zusammenhang sind auch verschiedene Ansätze enthalten, mit denen ggf. die Ökobilanzierung bzw. Lebenszyklusanalysen abgebildet werden können.

ISO 30134-2: Power Usage Effectiveness (PUE)

Aktueller Bearbeitungsstand: Norm, 2016-04

Verantwortlich: Japan

Kooperationen: ITU Telecommunication Standardization Sector (ITU-T)

Ziel: Im Norm-Teil 2 werden das Messkonzept, die Berechnungs- und Darstellungsvorschriften des PUE eines RZ festgelegt. Der PUE-Wert wird ermittelt, in dem die insgesamt im RZ benötigte Energie ins Verhältnis zum Energiebedarf der IT gesetzt wird.

Formel 1: Power Usage Effectiveness (PUE) und Data Center infrastructure Efficiency (DCiE)

$$PUE = \frac{1}{DCiE} = \frac{E_{RZ}}{E_{IT}}$$

E_{RZ} : Energiebedarf des RZ (kWh)

E_{IT} : Energiebedarf der IT (kWh)

Die Messdauer beträgt mindestens zwölf Monate. In Abhängigkeit von der Messgenauigkeit für den IT-Strombedarf, muss eine entsprechende PUE-Kategorie ausgewählt werden:

Tabelle 5: Messkategorien der PUE nach ISO 30134

	PUE1	PUE2	PUE3
IT-Energiebedarf	USV-Ausgang	PDU-Ausgang	Eingang IT-Gerät
RZ-Energiebedarf	Trafo + Eigenerzeugung	Trafo + Eigenerzeugung	Trafo + Eigenerzeugung
Messintervall	12 Monate	12 Monate	12 Monate

Eigene nach [ISO 30134].

Um mittels des PUE gezielter Verbesserungsmaßnahmen ableiten zu können, können verschiedene PUE-Derivate gebildet werden:

- ▶ **Partial PUE (pPUE)** – Die pPUE beschreibt das Verhältnis aus Energiebedarf eines RZ-Teilsystems geteilt durch den IT-Energiebedarf. Bei der pPUE kann ein RZ-Teilsystem des RZ-Gesamtsystems freige wählt und definiert werden. Zum Beispiel kann ein pPUE für das RZ-Kühlsystem berechnet werden. Dazu wird der Strombedarf des Kühlsystems ins Verhältnis zum IT-Strombedarf gesetzt. Die Verwendung von pPUE-Werten kann hilfreich sein, um mögliche Ineffizienzen genauer zu lokalisieren und über einen längeren Zeitraum zu vergleichen. Die Messdauer muss mindestens zwölf Monate betragen.
- ▶ **Designed PUE (dPUE)** – Die dPUE beschreibt das Verhältnis aus geplantem Energiebedarf des RZ zu geplantem Energiebedarf der IT. Im Rahmen der Planung eines RZ-Neubaus bzw. eines RZ-Umbaus kann auf der Basis von Prognosen für die IT-Auslastung bzw. die Ausbaustufen der Gebäudetechnik ein theoretischer PUE-Wert berechnet werden.

► **Interim PUE (iPUE)** – Die iPUE beschreibt das Verhältnis aus Energiebedarf des RZ zum Energiebedarf der IT in einem bestimmten Messintervall. Wenn die Messdauer für den PUE-Wert nicht zwölf Monate beträgt, dann muss die PUE als iPUE gekennzeichnet und die Messdauer angegeben werden.

Die normkonforme Darstellung des PUE-Wertes für ein RZ muss mindestens die Bezeichnung des RZ, den PUE-Wert, die PUE-Kategorie, und die PUE-Messdauer beinhalten.

Hinweis: Die weitere Überarbeitung des PUE soll zukünftig ausschließlich durch das Normungskomitee der ISO 30134 (ISO/IEC JTC 1/WG1) erfolgen. Unabhängige Veröffentlichungen des *The Green Grid* soll es hierzu nicht mehr geben.

ISO 30134-3: Renewable Energy Factor (REF)

Aktueller Bearbeitungsstand: Norm, 2016-04

Verantwortlich: Japan

Ziel: siehe EN 50600-4-3 in Abschnitt 2.1.4.1

Formel 2: Renewable Energy Factor (REF)

$$\text{REF} = \frac{E_{\text{RZ, EE}}}{E_{\text{RZ}}}$$

E_{RZ} : Energiebedarf des RZ (kWh)

$E_{\text{RZ, EE}}$: Energiebedarf des RZ, der durch Erneuerbare Energien gedeckt wird (kWh)

Eine Verrechnung des REF mit dem PUE ist nicht zulässig. Der Anteil erneuerbarer Energie darf nicht bei der Berechnung des PUE vom Energiebedarf abgezogen werden. Die Messung für den Anteil der Erneuerbaren Energien muss nach den Vorgaben des PUE (ISO 30134-2) erfolgen. Die gleichen Systemgrenzen und die gleiche Messdauer müssen eingehalten werden.

Im Rahmen der Definition des REF soll eine eindeutige Definition von Primärenergie erarbeitet werden. Hierfür gab es ein New Work Item Proposal (NWIP) „Primary Energy“ von der französischen Stelle für Normung, der *Association Française de Normalisation* (AFNOR).

Hinweis: Es gibt bereits Normen, die den Begriff „Primärenergie“ definieren. Auf nationaler Ebene existiert für Deutschland die DIN V 18599-1:2016-10 „Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger“. Auf internationaler Ebene gibt es die ISO 52000-1:2017 „Energy Performance for Buildings“, die ebenfalls die Ermittlung von Primärenergiefaktoren beschreibt. Bei der Bewertung des NWIP hat Deutschland drauf hingewiesen, dass es bereits eine ISO-Norm mit dem Fokus Gebäude dazu gibt. Frankreich ist nun aufgefordert das NWIP dahingehend zu überprüfen und den Inhalt des NWIP von der ISO 52000 deutlich abzugrenzen.

ISO 30134-4: IT Equipment Energy Efficiency for Servers (ITEE_{sv}) – Energieeffizienz von Servern

Aktueller Bearbeitungsstand: Final Draft International Standard (FDIS) veröffentlicht

Verantwortlich: Japan

Ziel: Das Ziel der ITEE_{sv} ist es, die Energieeffizienz der Server als das Verhältnis der maximalen Performance der Server bei Volllast und der resultierenden elektrischen Leistungsaufnahme der Server darzustellen. Die ITEE_{sv} gibt die Energieeffizienzfähigkeit von Servern auf Basis der Spezifikation in

den Datenblättern der Hersteller wieder, nicht aber die Energieeffizienz der Server in einer realen Betriebssituation.

Formel 3: IT Equipment Energy Efficiency for Servers (ITEE_{SV})

$$ITEE_{SV} = \frac{\sum_{i=1}^N SMPE_{i, \max}}{\sum_{i=1}^N SMPO_{i, \max}}$$

n: Anzahl Server des RZ

SMPE_{i, max}: maximale Performance des Servers i (Ops)

SMPO_{i, max}: maximale elektrische Leistungsaufnahme des Servers i (W_{el})

Der SMPE_i-Wert entspricht der maximalen Leistung eines Servers i. Der SMPE_i-Wert wird anhand der vom Hersteller bereitgestellten Benchmarking-Ergebnisse oder durch direkte Messung ermittelt, wobei der Benchmark gemäß Abschnitt 6.2 der Norm definierte Anforderungen erfüllen muss. Für den SMPE-Wert kann bspw. der normalisierte Spitzenleistungswert „Normalized Peak Performance“ von SERT oder der Benchmark-Leistungswert „SPECpower_ssj2008 (ssj_ops) at 100 % load“ oder der Benchmark-Leistungswert „LINPACK“ verwendet werden.

Der SMPO_i-Wert entspricht der maximalen elektrischen Leistungsaufnahme eines Servers i. Der SMPO_i-Wert wird durch die Verwendung von Herstellerangaben zur Leistungsaufnahme oder die direkte Messung bestimmt. SMPO_i stellt die maximale Energie dar, die erforderlich ist, um den SMPE_i-Wert des betrachteten Servers zu erreichen. Mögliche Optionen für die Messung von SMPO_i sind der SPECpower_ssj2008-Wert für die vom Hersteller gemessene durchschnittliche elektrische Wirkleistung bei Volllast („average active power at 100 % load“) oder der Watt-Wert bei höchster Auslastungsstufe („Watts at highest load level“) von SERT. Das Benchmark-Verfahren für den SMPO sollte dem Benchmark-Verfahren für den SMPE entsprechen. Die Nennleistung der Stromversorgung laut Typenschild ist nicht geeignet, da sie möglicherweise eine Sicherheitsmarge einschließt und nicht die tatsächliche maximale Leistungsaufnahme widerspiegelt.

Die ITEE_{SV} wird als Summe über alle Server eines RZ gebildet. Die ITEE_{SV} betrachtet ausschließlich die Spitzenleistungen (engl.: peak power). Die ITEE_{SV} beschreibt somit die Leistungsfähigkeit (theoretische maximale Arbeit je Energieeinheit [Watt]) und kann verwendet werden, um die Auswirkungen neu installierter Server mit höherer Leistungsfähigkeit je Energieeinheit quantitativ zu bestimmen. Ein höherer ITEE_{SV}-Wert von Rechenzentren weist dementsprechend auf die Installation von Servern mit höherer Energieeffizienz hin. Für die Darstellung der ITEE_{SV} muss die Messmethode, der Messwert und der Messzeitpunkt angegeben werden.

ISO 30134-5: IT Equipment Utilization for Servers (ITEU_{SV}) – Auslastung von Servern

Aktueller Bearbeitungsstand: DIS zur Kommentierung

Ziel: Das Ziel der ITEU_{SV} ist die quantitative Bestimmung der Auslastung von Servern in einem RZ. Die ITEU_{SV} soll zur Verbesserung der Energieeffizienz der Server in einem RZ eingesetzt werden.

Die ITEU_{SV} beschreibt die Auslastung der Server im RZ unter Betriebsbedingungen. Die ITEU_{SV} beruht auf der Erkenntnis, dass die Energieeffizienz der Server bei höherer Auslastung tendenziell besser ist.

Hinweis: Je nach Konfiguration und Arbeitslast erreichen einige Servermodelle die höchste Energieeffizienz bereits bei geringerer Auslastung (vgl. [SPEC 2016]). Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Energieverbrauch der Server nicht proportional mit der Arbeitslast steigt. Vielmehr weist jede Komponente im aktiven Leerlauf bereits einen statischen Stromverbrauch auf. Hinzu kommt ein dynami-

scher Stromverbrauch in Abhängigkeit von der Auslastung der Komponente. Der Stromverbrauch der CPU steigt in der dritten Potenz zur Taktfrequenz. Der Stromverbrauch der Lüfter wächst ebenfalls in der dritten Potenz zur Drehzahl. Im Ergebnis kann ab einer gewissen Arbeitslast der exponentiell steigende dynamische Stromverbrauch der CPU und der Lüfter den Effekt der Umlage des statischen Stromverbrauchs aller Komponenten im Leerlauf auf insgesamt mehr Arbeit überwiegen, so dass das Verhältnis aus erbrachter Leistung und Gesamtstromverbrauch des Servers schlechter werden kann. Dies passiert vor allem bei Servern mit sehr gutem Energiemanagement und einem im Vergleich zum maximalen Strombedarf (bei Volllast) sehr geringen statischen Stromverbrauch im Leerlauf.

Grundsätzlich setzt sich die Energieeffizienz von Servern zusammen aus:

- ▶ dem Vermögen, Arbeit je Energieeinheit zu verrichten (Leistungsfähigkeit, siehe $ITEE_{SV}$),
- ▶ der Zeitdauer, während der der Server tatsächlich arbeitet (Auslastung),
- ▶ der Fähigkeit des Servers, den Energieverbrauch zu senken, wenn der Server nicht voll ausgelastet ist (Energiemanagement).

Die $ITEU_{SV}$ weist die Auslastung und das Energiemanagement aus und wird verwendet, um die Auswirkungen einer oder beider der folgenden Maßnahmen quantitativ zu bestimmen:

- ▶ Verbesserung der Auslastung der Server durch den Einsatz von Technologien wie die Virtualisierung und der Serverkonsolidierung zur gemeinsamen Nutzung von Servern
- ▶ Reduzierung der Serveranzahl, wobei der Grad der Informationsverarbeitung beibehalten wird

Formel 4: IT Equipment Utilization for Servers ($ITEU_{SV}$)

$$ITEU_{SV}(t) = \frac{\sum_{i=1}^N CUS_i(t)}{N}$$

$ITEU_{SV}(t)$: mittlere Auslastung aller oder einer Gruppe von Servern in einem RZ zum Zeitpunkt t

N: Anzahl der Server in einem RZ oder in einer Gruppe, die zum Zeitpunkt t eingesetzt werden

$CUS_i(t)$: CPU-Auslastungsgrad des Servers i zum Zeitpunkt t (%)

Anmerkung: Wenn ein Server einen Multikernprozessor enthält, entspricht $CUS_i(t)$ der durchschnittlichen Auslastung eines jeden Kerns. Wenn ein Server mehrere CPUs umfasst, entspricht $CUS_i(t)$ der durchschnittlichen Auslastung jeder einzelnen CPU.

Beispiel: Arbeiten einige der Server mit einer sehr geringen Arbeitslast, kann der Betreiber des RZ die $ITEU_{SV}(t)$ verbessern, indem er die Anzahl der in Betrieb befindlichen Server z. B. mithilfe einer Virtualisierungstechnik reduziert, während die Gesamtarbeitslast des RZ beibehalten wird. Wenn der Besitzer/Betreiber des RZ die Serverfunktion „Ausschalten“ benutzt, um den Stromverbrauch von Servern im Leerlaufbetrieb zu senken, müssen die Werte für die Server in diesem Zustand von der berechneten $ITEU_{SV}(t)$ abgezogen werden. Der $ITEU_{SV}(t)$ -Wert ist hoch, wenn zum Zeitpunkt t die Mehrheit der Server mit hohem Auslastungsgrad betrieben werden. Die Energieeffizienz von RZ kann durch die Anregung zu höheren $ITEU_{SV}(t)$ -Werten gefördert werden.

Die Messdauer beträgt mindestens zwölf Monate. Sowohl für die Berechnung als auch für die Dokumentation der $ITEU_{SV}$ muss der Betreiber des RZ offenlegen, welches Messverfahren angewendet wurde. Der Bericht muss mindestens die folgenden Angaben enthalten:

- ▶ den $ITEU_{SV}$ -Wert
- ▶ den Spitzenwert der $ITEU_{SV}(t)$ und die Dauer der Spitze von $ITEU_{SV}(t)$ (durchschnittliche Anzahl von Minuten und Prozentsatz des Spitzenstatus an einem Tag)

- ▶ Messverfahren (Name Leistungsüberwachungstool und Messfrequenz und -intervall)
- ▶ Start- und Enddatum des einjährigen Messzeitraums
- ▶ Identifikation des RZ (z. B. Name, Adresse, Besitzer/Betreiber).

ITEU_{SV} beruht auf der Verwendung der CPU-Auslastung als Ersatz für die gesamte Serverauslastung. Bei dieser Vereinfachung müssen verschiedene Faktoren berücksichtigt werden:

- ▶ Unterschiede in der Arbeitslast
- ▶ Auslastung des Hauptspeichers;
- ▶ Auslastung der Eingabe/Ausgabe-Komponenten;
- ▶ Messunterschiede zwischen verschiedenen CPU- und Betriebssystemarchitekturen.

Mithilfe der ITEU_{SV} kann der Betreiber des RZ eine Betriebsrichtlinie aufstellen, die den effektiven Betrieb von Servern festlegt, um die Energieeffizienz der Server zu verbessern.

Die ITEU_{SV} kann verbessert werden, indem die Anzahl der betriebenen Server reduziert wird, ohne die Gesamtarbeitslast des RZ zu verringern, oder indem die Gesamtarbeitslast des RZ bei gleichbleibender Anzahl der betriebenen Server erhöht wird (Lastmanagement). Betreiber von RZ sollten bei der Verwendung der ITEU_{SV} die Auswirkungen von Auslastungsspitzen von größer als 80 Prozent berücksichtigen. Wenn zur Steigerung der mittleren Auslastung Änderungen vorgenommen werden, kann eine unzulässige Anzahl von Spitzen auftreten, die die Leistung der Anwendung beeinträchtigen könnte.

ISO 30134-6: Energy Reuse Factor (ERF) - Anteil der wiederverwendeten Energie

Aktueller Bearbeitungsstand: Working Draft (WD) in Vorbereitung

Verantwortlich: Finnland; Unterstützung: Deutschland

Ziel: Der ERF soll den Anteil der wiederverwendeten Energie aus dem RZ darstellen (z. B. Nutzung der Abwärme des RZ). Aktuell wird der Umfang des ERF überarbeitet. Mit der Überarbeitung sollen fehlgeleitete Interpretationen verhindert werden (bspw. ein Green Washing über die Abwärmenutzung). Eine Anrechnung der Abwärmenutzung auf den PUE-Wert ist grundsätzlich nicht zulässig. Als Ergänzung zum ERF ist die Kennzahl *Energy Reuse Efficiency* (ERE) geplant.

ISO 30134-x: Excess Energy

Aktueller Bearbeitungsstand: NWIP - zukünftig als Technical Report (TR)

Verantwortlich: Frankreich

Ziel: Mit der Kennzahl *Excess Energy* sollen mögliche Effekte im Bereich der Speicherung und Wiederverwendung von überschüssiger Energie im RZ abgebildet werden. Für den bisher eher seltenen Fall, dass in einem RZ zu bestimmten Zeiten mehr Energie zur Verfügung steht als tatsächlich benötigt, soll eine Kennzahl festgelegt werden, die die Effizienz beim Speichern und Wiederverwenden dieser überschüssigen Energie beschreibt. Ein Beispiel wäre die Speicherung von vom RZ selbst produziertem Strom aus PV-Anlagen in der Batterie der USV-Anlagen. Der bisherige Betrachtungsgegenstand und die Systemgrenzen der Kennzahl müssen aktuell überarbeitet werden, um Wechselwirkungen mit der PUE auszuschließen.

Aktuelle Einschätzung: Eine Norm wird es dazu nicht geben. Lediglich die Beschreibung von Praxisbeispielen im Rahmen eines TR wäre möglich. Die bisherigen Vorschläge zu diesem KPI sind technisch und physikalisch unzureichend. Der Ansatz wurde lediglich der Vollständigkeit halber erwähnt.

ISO 30134-x: Primary Energy

Aktueller Bearbeitungsstand: NWIP - zukünftig als TR

Verantwortlich: Frankreich

Ziel: Um den Einsatz verschiedener Primärenergieträger im RZ vergleichbar zu machen, sollen mit der Kennzahl *Primary Energy* entsprechende Primärenergie-Umwandlungsfaktoren definiert werden. Aktuell werden hier nur die CO₂-Emissionen der verschiedenen Primärenergien betrachtet. Der Betrachtungsgegenstand soll zukünftig aber erweitert werden. Die vorgeschlagenen Primärenergie-Umwandlungsfaktoren dürfen nur dann angewendet werden, wenn es keine offiziellen Werte für das Land bzw. die Region gibt.

Hinweis: Aufgrund der internationalen Berichtspflichten gibt es internationale Durchschnittswerte über die Emissionsfaktoren der fossilen Energieträger. Das UBA erhebt jährlich für Deutschland die landesspezifischen CO₂-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe [Jührich 2016].

Aktuelle Einschätzung: Eine Norm wird es dazu nicht geben. Lediglich die Beschreibung von Praxisbeispielen im Rahmen eines TR wäre möglich.

ISO 30134-x: Cooling Efficiency Ratio (CER), Cooling Performance Ratio (CPR)

Aktueller Bearbeitungsstand: NWIP abgelehnt

Ziel: In Anlehnung an die *Seasonal Energy Efficiency Ratio* (SEER) und den COP von Kälteanlagen sollen die beiden Kennzahlen die Effektivität des RZ-Kühlsystems beschreiben. Ziel der CER und CPR ist es, die Auswirkungen von Effizienzmaßnahmen im Bereich des RZ-Kühlsystems besser darzustellen.

2.1.4.3 ISO 30133: Guidelines for resource efficient Data Centres

Aktueller Bearbeitungsstand: Proposed Draft Technical Report (PDTR)

Verantwortlich: Japan

Ziel: Die Leitlinien für ressourceneffiziente RZ enthalten für verschiedene RZ-Bereiche (Planung, Management, Kühlung, Stromanbindung) praxisrelevante Richtlinien und Beispiele, um die Energie- und Ressourceneffizienz von RZ zu verbessern.

Die Bereiche IT-Geräte und Kosten sind ausdrücklich nicht Teil der ISO 30133. Der Fokus liegt auf der Einführung und Umsetzung eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses. Für die Aktualität der Praxisvorgaben ist eine kontinuierliche Überarbeitung angedacht. Die Hinweise und Richtlinien dienen nicht dazu, eine Vergleichbarkeit der RZ in Bezug auf ihre Performance herzustellen oder den Reifegrad von RZ abzubilden. Das Dokument ISO 30133 befindet sich zurzeit in der Abstimmung. Die detaillierte technische Beschreibung von RZ-Kategorien soll zukünftig in einer separaten technischen Spezifikation veröffentlicht werden.

Bezug der ISO 30134 zur EN 50600:

Auf der europäischen Ebene wurde vorerst entschieden, dass der Teil EN 50600-4 erstmal unabhängig von, aber in Abstimmung mit dem ISO 30134-Projekt veröffentlicht wird. Mit Beschluss vom Juni 2017 wird die EN 50600 in die ISO-Normung überführt. Dazu wurde eine neue „Working Group“ WG3 im SC 39 gegründet. Den Vorsitz der WG3 hat Deutschland.

2.1.4.4 ISO 21836: Server Energy Effectiveness Metric

Aktueller Bearbeitungsstand: NWIP in Bearbeitung

Verantwortlich: USA

Kooperationen: SPEC, The Green Grid

Ziel: Die *Server Energy Effectiveness Metric* (SEEM) ist als Produktnorm ISO 21836 für Server geplant und soll die Berechnungsvorschrift und die Messmethode zur Bewertung der Energieeffektivität eines Servers festlegen. Die entsprechenden Berechnungsvorschriften bilden der SPEC_{Power_ssj2008}-Benchmark und das *Server Efficiency Rating Tool* (SERT) von SPEC. Weitere, alternative Berechnungsvorschriften und Messmethoden soll es nicht geben. Die Testwerkzeuge müssen käuflich erworben werden. Üblicherweise werden das die Serverhersteller übernehmen. SEEM ist als Produktnorm ISO 21836 für Server geplant.

Verweise: ISO 30134 (ITEE_{sv}, ITEU_{sv})

Abgrenzung: SEEM bezieht sich „nur“ auf einen einzelnen Server. Dafür sollen aber alle Auslastungs- und Konfigurationsstufen berücksichtigt werden. ITEE_{sv} und ITEU_{sv} beziehen sich nur auf die Spitzenlast der IT-Geräte (aktuell werden nur Server betrachtet), ermöglichen dafür aber eine aggregierte Betrachtung aller Server im RZ.

Zielgruppen:

- ▶ Hersteller von Server-Hardware und Server-Software
- ▶ Öffentliche Organisationen
- ▶ RZ-Betreiber

Für die SEEM soll es auch möglich sein, nur bestimmte Zustände bzw. Arbeitslasten zu messen. So könnte z. B. nur der „idle“-Zustand oder nur der „active“-Zustand gemessen werden. Die RZ-Betreiber sollen dadurch mehr Informationen erhalten und besser entscheiden können, welcher Server für welche Aufgabe aus Sicht der Energieeffizienz zweckmäßig ist. Die Norm soll nicht vorschreiben, was in welcher Kombination gemessen werden muss.

Für die SEEM ist eine Kategorisierung der Server nach Funktion im RZ geplant. Im Gegensatz zu den bisherigen Ansätzen soll dann zukünftig z. B. zwischen Storage-Servern, File-Servern, etc. unterschieden werden.

Die SEEM sieht auch sogenannte „Konfigurations-Tests“ vor. Hier werden der sogenannte „Familientest“ (engl.: family testing) für die Maximalkonfiguration (engl.: high end configuration) und die Minimalkonfiguration (engl.: low end configuration) und der „Einzeltest“ (engl.: single testing) sowie der „Trägerkörperertest“ (engl.: blade testing) unterschieden. Für die Testkonfiguration können die Hersteller zwischen einem Test mit der Standardkonfiguration oder einem Test mit individueller Konfiguration des Servers wählen.

Hinweis: Die Server müssen in der Konfiguration getestet werden, wie sie zum Kunden versandt werden („as there are shipped to the customer“). Das Testverfahren bei den Blade Systemen und den Mehrknoten-Servern lässt individuelle Ausstattungen wie z. B. 50 Prozent Gehäusebelegung, Schwerpunkt Speichertechnik oder Schwerpunkt Netzwerktechnik zu.

Für die Messungen der SEEM werden die Strommessgeräte, die Temperaturmessungen und die Messungen der Luftfeuchte definiert. Hier sollen insbesondere die Vorgaben von ASHRAE als Grundlage dienen.

Um eine einheitliche, transparente und nachvollziehbare Darstellung der Ergebnisse zu gewährleisten, müssen für die SEEM die Anforderungen an die Dokumentation festgelegt werden. Insbesondere müssen die getesteten IT-Systeme (engl.: system under test, SUT) eindeutig benannt und beschrieben werden. Als Grundlage für die Dokumentationsanforderungen der SEEM sollen die Richtlinien von SPEC¹³

¹³ <https://www.spec.org/fairuse.html>

übernommen werden. Ob eine Standardisierung für die Dokumentationsanforderungen tatsächlich möglich ist, wurde noch nicht entschieden.

Hinweis: Der *ENERGY STAR* für Server umfasst deutlich mehr als die SEEM. Zum Beispiel berücksichtigt der *ENERGY STAR* für Server auch den Bereich High Performance Computing (HPC). Daher beschreibt der *ENERGY STAR* viel mehr als die Messmethode und die Berechnungsvorschrift.

Hintergrund: Die SEEM bezieht sich auf das Produkt „Server“. Daher wird die SEEM den Produktnormen (ISO 20.000er-Reihe) zugeordnet. Die SEEM hat aber einen wichtigen Bezug zu den Kennzahlen aus der *ISO 30134*. Die Bearbeitung der *ISO 21836* ist daher auch in der JTC 1, SC 39, WG 1 angesiedelt.

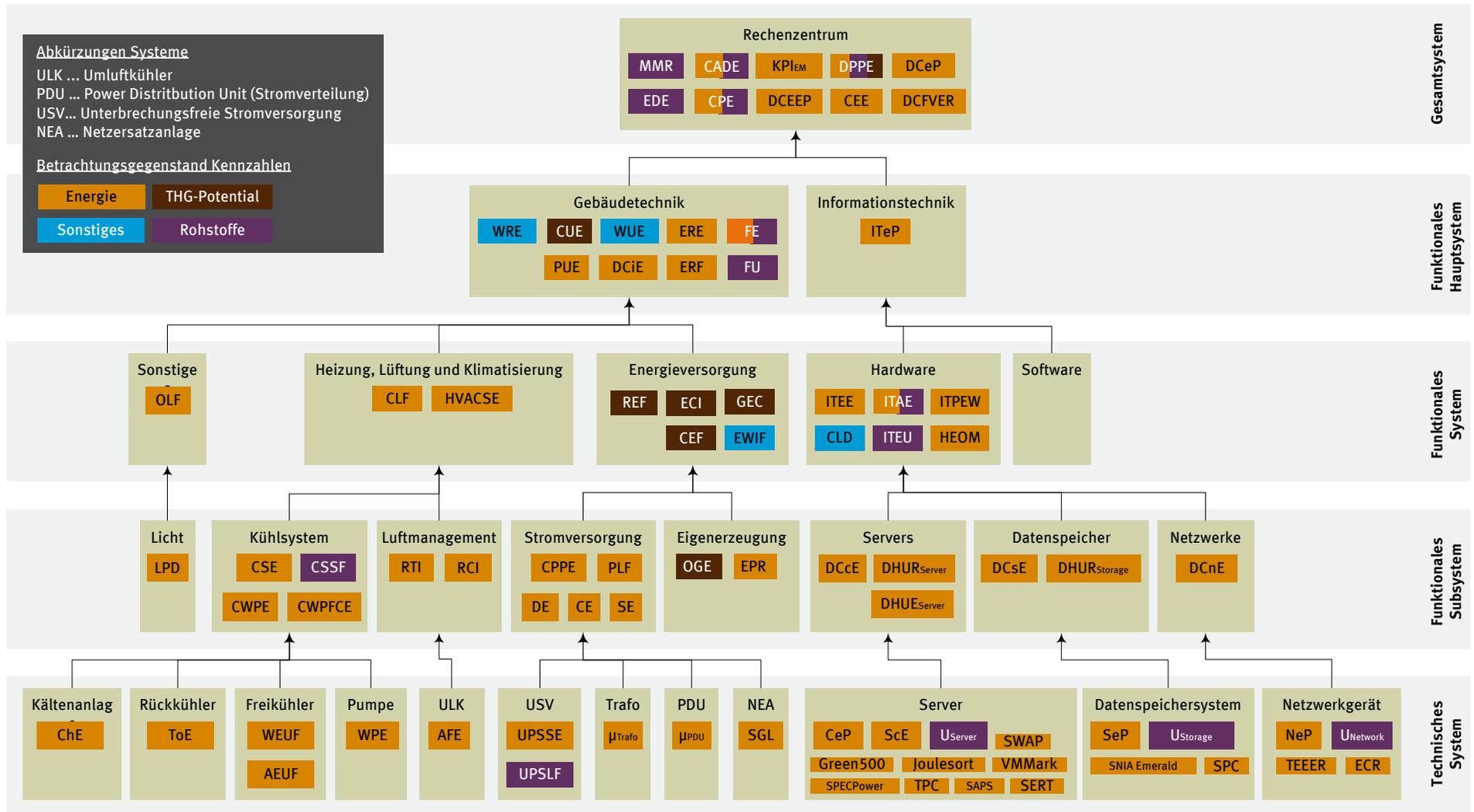
2.1.5 Zusammenfassende Bewertung des Istzustandes

Abbildung 9 zeigt die im Rahmen der Literaturrecherche identifizierten Kennzahlen, die für eine Bewertung der Ressourceneffizienz und Umweltwirkungen von RZ herangezogen werden können. Um trotz der Vielzahl der Kennzahlen die Übersicht zu bewahren, wurden Ansätze mit gleichen oder ähnlichen Berechnungsvorschriften trotz unterschiedlicher Bezeichnungen nur einmal in das Schema aufgenommen. Ein Verzeichnis der identifizierten Kennzahlen findet sich in Tabelle 69 im Abschnitt 8.1 im Anhang.

Um Lücken dazustellen, wurden in Abbildung 9 die Kennzahlen farblich nach Betrachtungsgegenstand differenziert. Betrachtungsgegenstände sind die Energie- und Rohstoffeffizienz (letztere meist indirekt über Auslastungskennzahlen), das THG (teilweise indirekt über den Anteil erneuerbarer Energien) und sonstiges wie der Einsatz von Wasser. Einige Kennzahlen integrieren mehrere Betrachtungsgegenstände. Ein Beispiel hierfür ist die CADE, die die Energie- und Rohstoffeffizienz (letztere indirekt über die Auslastung) der IT und der Gebäudetechnik adressiert (vgl. [Kaplan et al. 2008]).

Weiterhin wurden die Kennzahlen den Systemebenen und Teilsystemen zugeordnet. Teilsysteme beschreiben funktional oder technisch voneinander abgrenzbare Bereiche bzw. Anlagen wie auf der Ebene der funktionalen Hauptsysteme die Gebäudetechnik und die IT. Nicht dargestellt in Abbildung 9 ist die Ebene der Komponenten, aus denen sich die technischen Systeme zusammensetzen. Für Komponenten existieren ebenfalls Kennzahlen. Ein Beispiel ist der Wirkungsgrad der in Servern, Datenspeichern oder Netzwerkgeräten verbauten Netzteile.

Abbildung 9: Ergebnisse der Lückenanalyse zu den Kennzahlen nach Systemebenen



Eigene nach [Schödwell et al. 2013b].

Abbildung 10 verdeutlicht, inwiefern mittels der existierenden Kennzahlen die Ressourceneffizienz und Umweltwirkungen von RZ über die Lebenszyklusphasen Herstellung, Nutzung und Entsorgung abgebildet werden können. Ein rot hinterlegtes Feld bedeutet, dass es hierfür in der Literatur bezogen auf RZ keinen Ansatz gibt. Grün signalisiert, dass für RZ dieser Bereich mit Kennzahlen schon ausreichend abgedeckt wird. Ein gelber Hintergrund deutet daraufhin, dass der Aspekt in der Literatur bisher nur indirekt oder noch unzureichend adressiert wird. Ersichtlich wird, dass nach wie vor in allen Bereichen Forschungsbedarf besteht.

Abbildung 10: Ergebnisse der Lückenanalyse zu den Kennzahlen nach Lebenszyklusphasen

	Herstellung	Nutzung	Entsorgung
Energie	-	PUE, JAZ, CPPE, ITEE, EPR, ERF, ITEE, ITeP, HEOM ...	-
Rohstoffe	-	FU, UPSLF, CSSF, ITEU, U _{server} , U _{storage} , U _{network}	MRR, EDE
THG-Potential	-	CUE, CEF, ECI, GEC, REF, OGE	-
Sonstiges (z.B. Wasser)	EWIF	WUE, WUE _{source} , WRE	-

Eigene.

Als Ergebnis der Bestandsanalyse lässt sich feststellen, dass Kennzahlen für die Energieeffizienz der Gebäudetechnik in der Nutzungsphase gut erforscht sind, auch wenn teilweise noch eindeutige Berechnungsvorschriften und Datenerhebungskonzepte fehlen. Für die Nutzungsphase gibt es vielversprechende Ansätze zur Bewertung der Effizienz des Einsatzes von Wasser, zur Beschreibung des THG sowie zur Erfassung der Nutzung erneuerbarer Energien und der Abwärme. Auch für die Bewertung der Energieeffizienz der IT im Betrieb existieren erste Kennzahlen. Jedoch besteht nach wie vor Forschungsbedarf in Bezug auf vergleichbare Nutzenindikatoren für die drei IT-Subsysteme Server, Datenspeicher und Netzwerke sowie für das IT-Gesamtsystem (Hardware + Software).

Die bestehenden Kennzahlen adressieren bis auf wenige Ausnahmen nur die Nutzungsphase. Der ökologische Fußabdruck der Lebenszyklusphasen Herstellung und Entsorgung wird noch nicht ausreichend erfasst. Aufwandsindikatoren für die im RZ eingesetzten Rohstoffe existieren bisher ebenfalls nicht. Aussagen über die Materialeffizienz können nur indirekt und stark beschränkt über die Auslastung und die geplante Lebensdauer der Anlagen und Komponenten im RZ getroffen werden.

In Bezug auf das Forschungsvorhaben bestätigt sich somit die eingangs formulierte Zielstellung: Es besteht nach wie vor großer Bedarf an einem Kennzahlensystem, welches die Ressourceneffizienz eines RZ ganzheitlich über den Lebenszyklus charakterisiert. Eine wichtige Voraussetzung dafür ist die Spezifikation RZ-übergreifend vergleichbarer Indikatoren zur Bewertung der erbrachten IT-Leistung.

2.2 Bewertung des Rohstoffverbrauchs in der Ökobilanzierung

2.2.1 Rohstoffverbrauch in Ökobilanzen

Wie in Abschnitt 1.1 erwähnt, ist eine natürliche Ressource definiert als:

„Ressource, die Bestandteil der Natur ist. Hierzu zählen erneuerbare und nicht erneuerbare Rohstoffe, physischer Raum (Fläche), Umweltmedien (Wasser, Boden, Luft), strömende Ressourcen (z. B. Erdwärme, Wind-, Gezeiten- und Sonnenenergie) sowie die Biodiversität.“ [Giegrich et al. 2012]

Diese Definition ist unabhängig davon, ob die natürlichen Ressourcen als Quellen für die Herstellung von Produkten oder als Senken zur Aufnahme von Emissionen (Wasser, Boden, Luft) dienen [Giegrich et al. 2012]. Somit differenziert der Begriff natürliche Ressourcen im „engeren Sinn“ und im „weiteren Sinn“ (vgl. Forschungsvorhaben des UBA „Ressourcenverbrauch von Deutschland – aktuelle Kennzahlen und Begriffsbestimmungen“ [UBA 2008] zitiert in [Giegrich et al. 2012]). Dabei handelt es sich bei den natürlichen Ressourcen „im engeren Sinn“ um materielle natürliche Ressourcen. Natürliche Ressourcen „im weiteren Sinn“ umfassen zusätzlich noch die Senkenfunktionen.

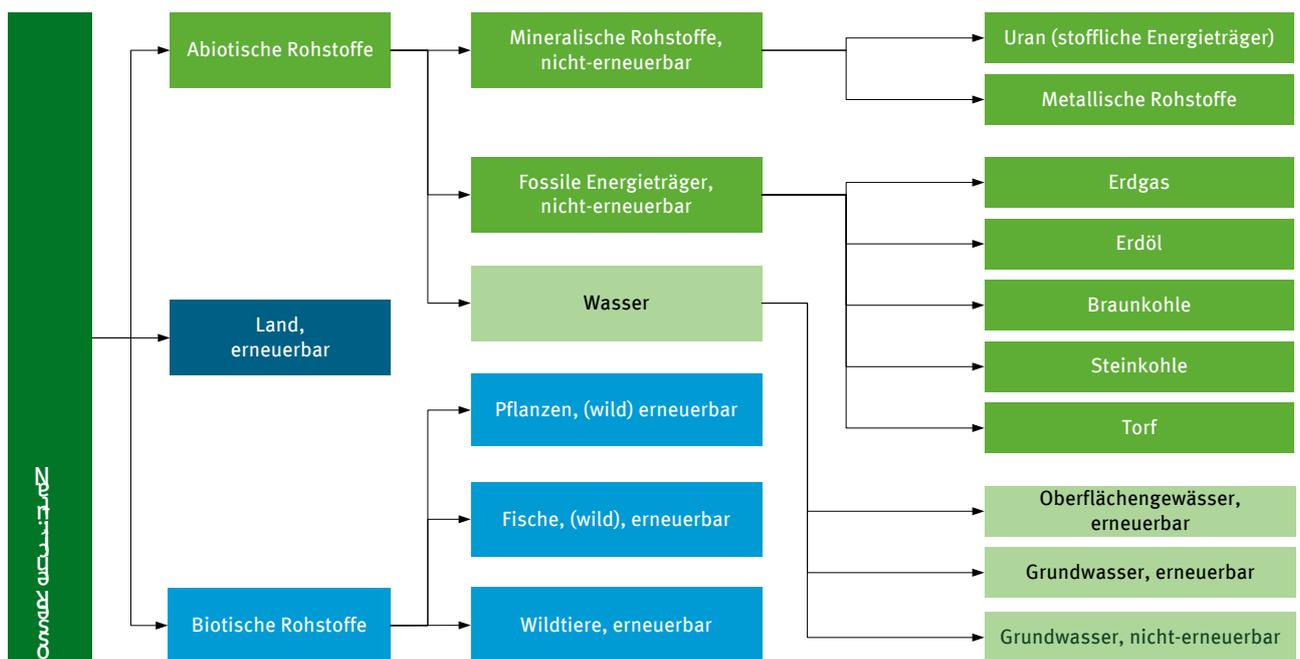
In der Ökobilanz werden die Definitionen der natürlichen Ressourcen im „engeren Sinn“ und im „weiteren Sinn“ separat unter verschiedenen Wirkungskategorien ausgewertet, denn sie repräsentieren unterschiedliche Umweltthemen. Die natürlichen Ressourcen „im engeren Sinn“ werden in einer Ökobilanz durch eingabebezogene Wirkungskategorien (z. B. abiotischer Rohstoffverbrauch, Wasserverbrauch, Landnutzung) erfasst. Die natürlichen Ressourcen „im weiteren Sinn“ bezüglich der Senkenfunktion werden anhand der ausgabebezogenen Wirkungskategorien ausgewertet (z. B.: Ökotoxizität durch Schwermetallbelastung).

Abbildung 11 gibt einen Überblick über die Aufteilung der natürlichen Ressourcen „im engeren Sinn“ im Kontext der Ökobilanz nach [Klinglmair et al. 2014]. [Klinglmair et al. 2014] weisen darauf hin, dass keine Methode alle der in Abbildung 11 dargestellten Ressourcen abdecken und auswerten kann. Abbildung 12 zeigt die Aufteilung der natürlichen Ressourcen im Kontext der Ökobilanz nach [Klöpffer und Grahl 2007]. Nach [Klöpffer und Grahl 2007] werden die abiotischen und die biotischen Ressourcen nach der Regenerierbarkeit des jeweiligen Rohstoffs in endliche und regenerierbare Ressourcen unterteilt. Obwohl es im Detail Unterschiede gibt, zeigen die beiden Quellen, dass sich die „natürlichen Ressourcen“ im Kontext der Ökobilanz auf die drei Subkategorien „abiotische Rohstoffe“, „biotische Rohstoffe“ und „Landnutzung“ aufteilen. Sie werden jeweils separat unter eigenen Kategorien bzw. mit eigenen Indikatoren ausgewertet. Für die Bilanzierung der natürlichen Ressourcen „im engeren Sinn“ in der vorliegenden Studie bedeutet das:

- ▶ Abiotischer Rohstoffverbrauch¹⁴ (engl.: abiotic resource depletion potential, ADP): Die Indikatoren für abiotische Rohstoffe in Ökobilanzen beinhalten Mineralien und fossile Rohstoffe. Eine methodische Einführung für die Bestimmung des ADP wird in Abschnitt 2.2.2 gegeben. Die für diese Studie verwendeten methodischen Grundlagen und alle betrachteten Wirkungskategorien sind in Abschnitt 3.4.2 dokumentiert.
- ▶ Die regenerierbare abiotische Ressource „Wasser“ wird in Ökobilanzen als eigenständige Kategorie betrachtet. Daher ist der Wasserverbrauch nicht im abiotischen Rohstoffverbrauch eingeschlossen, sondern wird in dieser Studie als separater Indikator betrachtet (siehe Abschnitt 3.4.2).
- ▶ Die Berechnung von biotischen Rohstoffen wird bei Ökobilanzen in der Praxis kaum durchgeführt. Es bestehen noch methodische Herausforderungen, die eine Belastbarkeit und Akzeptanz der Ergebnisse verhindern. In dieser Studie werden daher biotische Rohstoffe nicht berücksichtigt.
- ▶ Die Landnutzung und die Landnutzungsänderung (auch als Naturraumbeanspruchung bezeichnet) werden im Rahmen von Ökobilanzen als eigene Wirkungskategorie betrachtet. Bedingt durch die schlechte Datenlage werden sie in dieser Studie nicht berücksichtigt.
- ▶ Biodiversität und strömende Ressourcen gehören zu der allgemeinen klassischen Definition der natürlichen Ressourcen. Sie werden im Kontext der Ökobilanz unter anderen Kategorien erfasst. Z. B. werden strömende Ressourcen mit dem Indikator des kumulierten Energieaufwands (KEA) erfasst. Daher zählt die strömende Ressource nicht zur Kategorie ADP.

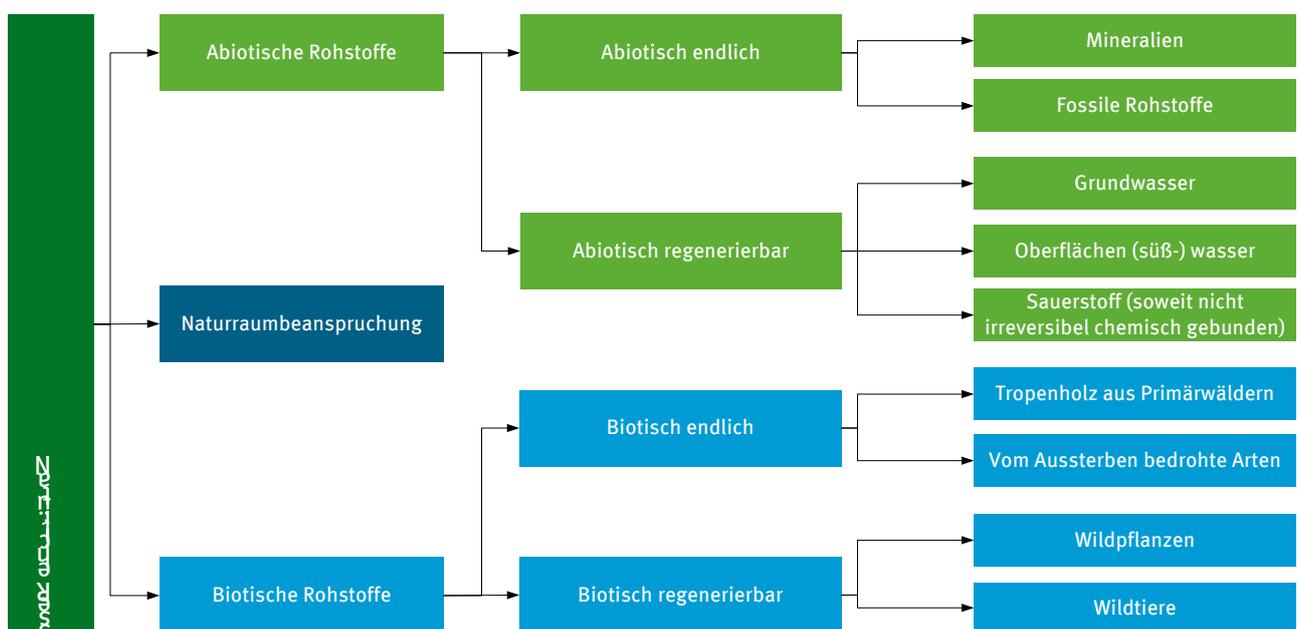
¹⁴ Die Übersetzung ADP vom Englischen ins Deutsche ist je nach Quelle leicht unterschiedlich. Es gibt z. B. Abbau abiotischer Ressourcen, Erschöpfung abiotischer Ressourcen, Verbrauch von abiotischen Ressourcen [MatRessource 2015]; Abiotischer Ressourcenverbrauch [Jepsen et al. o.J.]. Ressourcenerschöpfung-Mineralisch, fossil nach PEF [EU Amtsblatt 2013/179/EU 2013]. Zur Vereinfachung wird in diesem Forschungsvorhaben für ADP einheitlich abiotischer Rohstoffverbrauch verwendet.

Abbildung 11: Kategorisierung der natürlichen Ressourcen I



Eigene nach [Klinglmair et al. 2014].

Abbildung 12: Kategorisierung der natürlichen Ressourcen II



Eigene nach [Klöpffer und Grahl 2007].

Nachfolgend werden die vorhandenen Auswertungsmethoden in Ökobilanzen für die Wirkungskategorie „abiotischer Rohstoffverbrauch“ beschrieben.

2.2.2 Methoden für die Bewertung des abiotischen Rohstoffverbrauchs

Die Methoden zur Wirkungsabschätzung unterscheiden zwischen Midpoint- und Endpoint-Methoden:

- Die Midpoint-Methoden bewerten die Umweltauswirkung einer bestimmten Wirkungskategorie mit spezifischen Einheiten. Bspw. wird die Wirkungskategorie „Treibhauseffekt“ mit dem Indikator

CO₂-Äquivalente (Einheit: CO₂-eq.) und die Wirkungskategorie „Versauerungspotenzial“ mit dem Indikator Schwefeldioxid (SO₂)-Äquivalente (Einheit: SO₂-eq.) beschrieben. Die Ergebnisse der verschiedenen Wirkungskategorien auf Midpoint-Ebene dürfen nicht addiert werden, da sie unterschiedliche Einheiten haben.

► Die Endpoint-Methoden bewerten die Schäden an den Schutzgütern (z. B. an der menschlichen Gesundheit, an der Ökosystemqualität oder an den natürlichen Ressourcen). Die Ergebnisse der verschiedenen Wirkungskategorien der Endpoint-Methoden werden den Schutzgütern zugeordnet, gewichtet und aggregiert.

In Übereinstimmung mit der Zielstellung des Vorhabens stehen die Midpoint-Methoden im Vordergrund. Die Endpoint-Methoden benötigen die Gewichtungsschritte, die auf Werthaltungen beruhen und nicht wissenschaftlich begründet sind [DIN EN ISO 14044:2006-10].

2.2.2.1 CML: Methode des Centrum voor Milieukunde

Das Umweltinstitut der Universität Leiden, Niederlande (Institute of Environmental Sciences, Leiden University) hat die *Centrum voor Milieukunde* (CML)-Methode entwickelt. Diese Methode basiert auf dem Ansatz von Umweltproblemfeldern und ist im Bereich der Ökobilanzierung eine der am häufigsten verwendeten und auch international anerkanntesten Methoden. Das Umweltinstitut der Universität Leiden aktualisiert die Charakterisierungsfaktoren regelmäßig auf seiner Website¹⁵.

Die CML-Methode beschreibt in der Wirkungskategorie ADP die Reduktion des globalen Bestandes an nicht erneuerbaren Rohstoffen. In Hinblick auf die Bewertung wird nach der Verfügbarkeit der natürlichen Elemente (ADP_{element}) und der fossilen Energieträger (ADP_{fossil}) unterschieden. Der Indikator für die natürlichen Elemente wird in Antimon-Äquivalenten (Einheit: Sb-eq.) angegeben, der Indikator für fossile Energieträger (Kohle, Erdgas, Öl) in Megajoule (Einheit: MJ). Die ADP-Auswertung nach der CML-Methode gilt allgemein als anerkannt und wird im *International Reference Life Cycle Data System* (ILCD)-Handbuch (siehe Abschnitt 2.2.2.2) und von der Europäischen Kommission in der *Product Environmental Footprint* (PEF)¹⁶-Methode empfohlen.

Die Charakterisierungsfaktoren für ADP_{element} unterscheiden sich nach

- Gesamtreserven (engl.: ultimate reserves),
- förderbaren Reserven (engl.: reserve base) und
- wirtschaftlich nutzbaren Reserven (engl.: economic reserves).

CML definiert die Charakterisierungsfaktoren nach Gesamtreserven (oder nachgewiesenen Reserven) als „Baseline“, welche 49 abiotische Ressourcen bewertet. Eine andere Definition, die als „Non-Baseline“ bezeichnet wird, beinhaltet die Methode nach förderbaren Reserven (43 abiotische Ressourcen) und nach wirtschaftlich nutzbaren Reserven (44 abiotische Ressourcen). Tabelle 70 im Anhang listet die Charakterisierungsfaktoren für ADP nach der CML-Methode auf (Stand: Version 4.7, 2016).

Die Baseline-Charakterisierungsfaktoren, mit denen die abiotische Ressourcen auf Sb-eq. umgerechnet werden, basieren auf den Gesamtvorräten (Synonyme: Gesamtreserven, nachgewiesene Reserven, ultimative Reserven) und der Extraktionsrate (Synonym: Gewinnungsrate) in Kilogramm (Einheit: kg) pro Jahr (Einheit: a). Formel 5 verdeutlicht den Berechnungsweg der Charakterisierungsfaktoren der Ressourcen:

¹⁵ <http://cml.leiden.edu/software/data-cmlia.html>

¹⁶ http://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/policy_footprint.htm

Formel 5: Berechnungsweg der Charakterisierungsfaktoren der Ressourcen

$$ADP_i = \frac{DR_i}{(R_i)^2} \times \frac{(R_{sb})^2}{DR_{sb}}$$

ADP_i: Charakterisierungsfaktoren der Rohstoffe i ($\frac{kg_{sb}}{kg_i}$)

DR_i: Extraktionsrate der Rohstoffe i ($\frac{kg}{a}$)

R_i: Gesamtvorräte (oder nachgewiesene Reserven) der Ressource i (kg)

DR_{sb}: Extraktionsrate des Referenzrohstoffs Antimon ($\frac{kg}{a}$)

R_{sb}: Gesamtvorräte (oder nachgewiesene Reserven) der Referenzressource Antimon (kg)

Nach [van Oers und Guinée 2016] war Antimon als Referenzsubstanz eine willkürliche Entscheidung. Allerdings hätte die Wahl einer anderen Referenzsubstanz die relativen Größen der Charakterisierungsfaktoren zueinander nicht geändert. Antimon wurde als Referenzsubstanz gewählt, weil es das erste Element im Alphabet war, bei der eine Reihe von notwendigen Daten für die Berechnung der Charakterisierungsfaktoren (Extraktionsrate und ultimative Reserven) zur Verfügung stand.

Die Charakterisierungsfaktoren berücksichtigen die Verfügbarkeit der nicht-erneuerbare Rohstoffe (fossile Energieträger und Mineralien). Die zugrundeliegenden Daten über Extraktionsraten, Gesamtvorräte und förderbare Reserven der Rohstoffe entstammen bis 2010 der *United States Geological Survey*¹⁷ (USGS) [van Oers und Guinée 2016]. Allerdings veröffentlicht die USGS die Daten seit 2010 nicht mehr [van Oers und Guinée 2016]. Seitdem stammen die Daten über neue Extraktionsraten und Gesamtvorräte von Frischknecht et al. (zitiert in [van Oers und Guinée 2016]).

2.2.2.2 Ökobilanz nach ILCD-Handbuch

Das ILCD-Handbuch wurde vom *Joint Research Centre* (JRC) der Europäischen Kommission entwickelt und dient als Leitfaden zur Durchführung einer Ökobilanz. Die im ILCD-Handbuch empfohlenen Methoden für die Auswertung des abiotischen Ressourcenverbrauchs sind in Tabelle 6 gelistet.

Tabelle 6: Methoden abiotischer Ressourcenverbrauch nach ILCD-Handbuch

Wirkungskategorien (Midpoint)	Empfohlene LCIA-Methode	Indikator	Niveau (empfohlenes)
ADP – mineral and fossil fuels	CML [Guinee et al. 2002]	Sb-eq.	Level II (Empfohlene Methode mit erforderlichen Verbesserungen) ¹⁸
Resource depletion – renewable	keine	-	-

Eigene nach [ILCD Handbuch 2011].

Wie im Abschnitt 2.2.2.1 zur CML-Methode erwähnt, unterscheiden sich die Charakterisierungsfaktoren nach Gesamtreserven, förderbaren Reserven und wirtschaftlich nutzbaren Reserven. Das [ILCD

¹⁷ <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/>

¹⁸ Das ILCD-Handbuch vergibt noch das empfohlene Niveau (engl.: recommended level) für die jeweils empfohlene Methode. Level I bedeutet empfohlene Methode und zufriedenstellend, Level II bedeutet empfohlene Methode, aber mit erforderlichen Verbesserungen, Level III bedeutet empfohlene Methode, Anwendung aber mit Vorsicht. ADP der CML-Methode wurde als Level II eingestuft. Im ILCD-Handbuch werden keine möglichen Verbesserungsaspekte für die ADP der CML-Methode dokumentiert.

Handbuch 2011] empfiehlt, dass der abiotische Ressourcenverbrauch nach den Charakterisierungsfaktoren der CML-Methode, aber nach förderbaren Reserven bewertet werden soll.

Im [ILCD Handbuch 2012] wird darauf hingewiesen, dass die CML-Methode noch keine Charakterisierungsfaktoren für die Seltenen Erden angegeben hat. Im [ILCD Handbuch 2012] wird daher empfohlen, dass für die in Tabelle 7 genannten Seltenen Erden ein allgemeiner Faktor von $5,69E-04$ kg Sb-eq. pro kg Seltene Erden zugrunde gelegt werden soll. Eine Ausnahme ist Yttrium, dessen Charakterisierungsfaktor schon in der CML-Methode angegeben ist (siehe Tabelle 70 im Anhang).

Tabelle 7: Seltene Erden nach ILCD-Handbuch

Cerium (Ce)	Samarium (Sm)	Holmium (Ho)	Terbium (Tb)
Europium (Eu)	Scandium (Sc)	Thulium (Tm)	Erbium (Er)
Lanthanum (La)	Dysprosium (Dy)	Ytterbium (Yb)	Gadolinium (Gd)
Neodymium (Nd)	Praseodymium (Pr)	Prometheum (Pm)	Lutetium (Lu)

[ILCD Handbuch 2012]. 16 Seltene Erden, die im ILCD-Handbuch definiert werden und deren ADP mit einem allgemeinen Charakterisierungsfaktor berechnet werden.

Zusätzlich wurden für das ILCD-Handbuch 19 Charakterisierungsfaktoren für die förderbaren Reserven entwickelt, welche nicht in der CML-Methode nach förderbaren Reserven angegeben sind (siehe Tabelle 70 im Anhang). Diese Charakterisierungsfaktoren sind in Tabelle 71 im Anhang dokumentiert.

2.2.2.3 AADP nach ESSENZ-Methode

Die vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte *Integrierte Methode zur ganzheitlichen Berechnung/ Messung der Ressourceneffizienz* (ESSENZ) hat die Bewertung der Ressourcen erweitert. Laut ESSENZ gliedert sich die Verfügbarkeit der Rohstoffe in „physische“ und „sozio-ökonomische“ Verfügbarkeit [Berger et al. 2015]. Die physische Verfügbarkeit unterteilt sich nach der geologischen Verfügbarkeit (Rohstoffe in der Erdkruste) und der anthropogenen Verfügbarkeit (Materialien in der Technosphäre, z. B. Edelmetalle in Smartphones). Die bereits in Ökobilanzen verwendete Methode für ADP betrachtet nur die geologische Verfügbarkeit. Die Bewertung nach der ESSENZ-Methode betrachtet zusätzlich zu den geologischen Ressourcen noch die anthropogenen Vorkommen basierend auf ADP nach der CML-Methode und bildet den *Anthropogenic stock extended Abiotic Depletion Potential* (AADP)-Indikator.

Die sozio-ökonomische Verfügbarkeit bewertet mögliche Risiken aus sozio-ökonomischen Aspekten (z. B.: Handelshemmnisse, Preisvolatilität/-trend, Politische Stabilität etc.), die zu einer Verknappung der Rohstoffe führen können [Berger et al. 2015, MatRessource 2015, Mattsson 2012]. [MatRessource 2015] weist darauf hin, dass die in dem zugrunde liegenden Modell nach der ESSENZ-Methode verwendeten Grenzwerte subjektiv und somit wissenschaftlich schwer zu belegen sind.

Die Charakterisierungsfaktoren der 35 Metallelemente für AADP wurden von Schneider et al. (2015) ermittelt (siehe Tabelle 72). Auf Basis des ADP aus der CML-Methode wurden unter Berücksichtigung der anthropogenen Verfügbarkeit das AADP ermittelt. Das AADP wird in Sb-eq. angegeben.

2.2.2.4 Eco-Indicator 99

Der Eco-Indicator 99 wurde im Auftrag des niederländischen Ministeriums für Wohnungsbau, Raumordnung und Umwelt unter dem Gesichtspunkt der Integrierten Produktpolitik von *PRé Consultants* entwickelt [Goedkoop und Spriensma 2001].

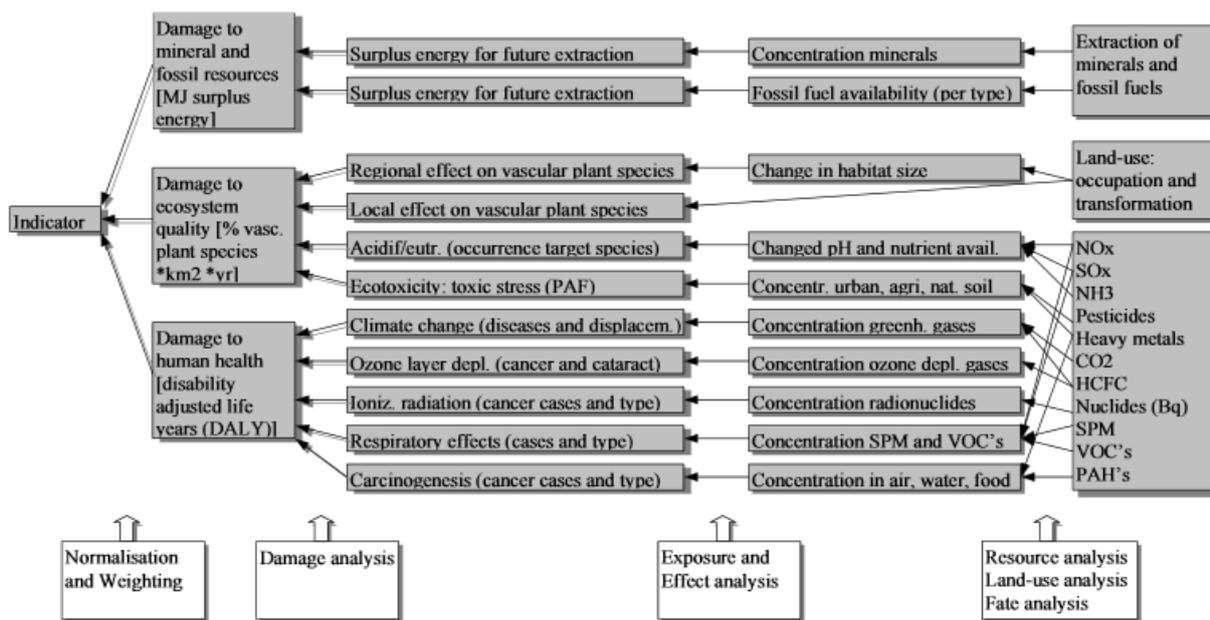
Die Methode ist eine schadensorientierte Bewertungsmethode (Endpoint-Methode). Die Indikatoren bewerten die Auswirkung auf die Schutzgüter „menschliche Gesundheit“ (engl.: human health), „Ökosystemqualität“ (engl.: ecosystem quality) und „Ressourcenverbrauch“ (engl.: resource depletion).

Abbildung 13 zeigt das methodische Prinzip des Eco-Indicators 99. Das zugrunde liegende Schadensmodell basiert auf der Verteilungsanalyse, der Exposition, der Effektanalyse und der Analyse der Schäden durch die Emissionen und den Rohstoffverbrauch [Goedkoop und Spriensma 2001]. Die Schäden an den Ressourcen werden durch den erhöhten Energiebedarf der Förderung (in MJ Surplus Energie) ausgedrückt. Ein Schaden von eins (bzw. ein MJ Surplus Energie) bedeutet, dass aufgrund der niedrigeren Konzentration von Rohstoffen oder anderer ungünstiger Merkmale der verbleibenden Vorräte die weitere Förderung dieser Rohstoffe in Zukunft ein zusätzliches MJ an Energie erfordert.

Die Schäden an der Ökosystemqualität werden durch die potenziell verschwindende Arten (engl.: potentially disappearing species, PDF) multipliziert mit der Fläche und den Jahren ausgedrückt.

Die Schäden an der menschlichen Gesundheit werden mit Hilfe des Schadensmaßes „disability adjusted life years“ (DALY) ausgedrückt, die durch die entsprechenden Wirkungskategorien (z. B. Treibhauseffekt, Ozonzerstörung, ionisierende Emissionen) verursacht werden.

Abbildung 13: Methodisches Prinzip des Eco-Indicators 99



[Goedkoop und Spriensma 2001]

In Tabelle 73 im Anhang werden die Charakterisierungsfaktoren für die Bewertung des abiotischen Rohstoffverbrauchs nach Eco-Indicator 99 aufgelistet.

2.2.2.5 ReCiPe-Methode

Die ReCiPe-Methode wurde vom National Institute for Public Health and the Environment, CML, PRÉ Consultants und der Radboud Universität entwickelt und kombiniert den Eco-Indicator 99 und die CML-Methode. Das Ziel ist die Harmonisierung der Midpoint-Methode der CML-Methode und der Endpoint-Methode der Eco-Indicator 99-Methode zu einer konsistenten Methode [Goedkoop et al. 2013].

Der Ressourcenaspekt wird bei der Midpoint-Methode über zwei Indikatoren definiert und bewertet (siehe auch Tabelle 74 und Tabelle 75 im Anhang):

- ▶ Metal depletion potential (MDP) in kg Eisen-Äquivalenten (Einheit: Fe-eq.)
- ▶ Fossil depletion potential (FDP) in kg Rohöl-Äquivalenten (Einheit: kg oil-eq.)

Das Grundprinzip der ReCiPe-Methode basiert auf einer wirtschaftlichen Sichtweise. Der Energieverbrauch und die Kosten steigen, wenn ein Rohstoff aus weniger konzentrierten und minderwertigen Vorkommen gewonnen wird. Die Ressourcenbewertung nach ReCiPe verfolgt das Konzept der Überschussenergie (engl.: surplus energy) und der Überschusskosten (engl.: surplus cost) und charakterisiert den zukünftigen zusätzlichen Aufwand für die Ressourcenextraktion. Das Grundmodell, in dem die Charakterisierungsfaktoren berechnet werden, basiert auf dem marginalen Anstieg der Förderkosten pro kg extrahierter Ressource. Zu beachten ist, dass nach der ReCiPe-Methode die Referenzressource für Mineralien als Eisen anstatt wie bei der CML-Methode als Antimon definiert wird.

2.2.2.6 EPS 2000: Environmental Priority Strategies

Die *Environmental Priority Strategies* (EPS)-Methode wurde im Jahr 1998 von der *Volvo Car Corporation*, dem *Swedish Environmental Research Institute* (IVL) und der *Swedish Federation of Industries* entwickelt [Bengt Steen 1999, Mattsson 2012].

Die Wirkungskategorien umfassen:

- ▶ menschliche Gesundheit (engl.: human health)
- ▶ Produktionskapazität des Ökosystems (engl.: production capacity of ecosystems)
- ▶ abiotische Ressourcen (engl.: abiotic stock resource)
- ▶ Biodiversität (engl.: biodiversity)
- ▶ Kultur- und Freizeitwerte (engl.: cultural and recreation value)

Bezüglich des abiotischen Ressourcenverbrauches umfasst die EPS-Methode die nicht-erneuerbaren Ressourcen „Mineralien“ und „Fossile Energieträger“ (siehe Tabelle 76 im Anhang). Der Charakterisierungsfaktor der Ressourcen ist gleich eins¹⁹, da jeder Rohstoff separat erfasst wird. Die EPS-Methode definiert keinen Leitindikator, sondern setzt für jeden Rohstoff einen eigenen Indikator („kg of element“) fest (siehe Tabelle 76 im Anhang). Dies unterscheidet sie von anderen Methoden, bei denen Ressourcen auf eine äquivalente Referenzressource umgerechnet werden (z. B. kg Sb-eq. nach CML-Methode oder kg Fe-eq. nach ReCiPe-Methode).

Um alle betrachteten Ressourcen mit einem Wert auszudrücken, werden Gewichtungsfaktoren verwendet. Die Gewichtungsfaktoren basieren auf einem Ansatz, der die Zahlungsbereitschaft „Willingness-To-Pay“ (WTP) in der Einheit „Environmental Load Unit“ (ELU) ausdrückt [Mattsson 2012]. Die WTP-Information stammt von der *Organization for Economic Cooperation and Development* (OECD). Die für die Bewertung der abiotischen Ressourcen verwendeten Gewichtungsfaktoren nach ESP 2000 sind in (Bengt Steen 1999) zu finden. Die Gewichtungsfaktoren beziehen sich auf den Zeitraum vom Jahr 1990 bis zum Jahr 2000. Für einen aktuelleren Zeitraum liegen die Faktoren nicht vor.

2.2.2.7 IMPACT 2002+: Life Cycle Impact Assessment Methodology

IMPACT 2002+ wurde im Jahr 2002 vom *Swiss Federal Institute of Technology Lausanne* entwickelt [Jolliet et al. 2003] und im Jahr 2012 von *Quantis* aktualisiert [Humbert et al. 2012].

Der Ressourcenverbrauch wird durch zwei Wirkungskategorien bewertet [Humbert et al. 2012]:

- ▶ Förderung der Mineralien in Bezug auf MJ Surplus Energie oder kg Fe-eq.
- ▶ Kumulierter nicht-erneuerbarer Energieaufwand in Primärenergie MJ oder kg oil-eq.

¹⁹ <http://cpmtdatabase.cpm.chalmers.se/CM/index.asp?IAM=EPS defaultundIAMVer=2000undCM=Resource consumption %20impact on resource reserves undver=1999>

Das Grundprinzip der Methode hinsichtlich der Ressourcenbewertung entspricht dem von Eco-Indicator 99. Der Mehraufwand für die Förderung von Mineralien durch Verknappung wird in der Einheit MJ Surplus Energie ermittelt. Die Charakterisierungsfaktoren sind direkt aus Eco-Indicator 99 übernommen [Humbert et al. 2012].

2.2.2.8 EDIP97 und EDIP2003: Environmental Development of Industrial Products

Die *Environmental Development of Industrial Products* (EDIP)-Methode wurde vom *Institute for Product Development, Technical University of Denmark* entwickelt. Die EDIP2003-Methode folgte auf die EDIP97-Methode und bezieht eine Expositionsbewertung auf der Grundlage regionaler Informationen bezüglich der nicht-globalen Wirkungskategorien (z. B.: photochemische Ozonbildung, Versauerung, Eutrophierung, Ökotoxizität, Humantoxizität, Lärm) ein [ILCD-Handbuch 2010].

Den Rohstoffverbrauch bewertet nur die EDIP97-Methode. Bei der EDIP2003-Methode gibt es keine Wirkungskategorie für die Bewertung des Rohstoffverbrauchs [Bio by Deloitte 2015, Hauschild und Potting 2005, ILCD-Handbuch 2010].

EDIP97 wurde im Jahr 2004 aktualisiert. Die Bewertung der nicht-erneuerbaren Ressourcen (fossile Energieträger und Mineralien) basiert auf wirtschaftlich nutzbaren Reserven [Klinglmair et al. 2014]. Der Verbrauch der abiotischen Ressourcen wird separat erfasst, d. h. es gibt keinen Leitindikator. Durch Normierungs- und Gewichtungsfaktoren wird der Ressourcenverbrauch mit Hilfe des Indikators „Personenreserven“ bewertet. Der Anteil extrahierter Ressourcen wird mit dem Anteil der bekannten globalen wirtschaftlich nutzbaren Reserven pro Person ins Verhältnis gesetzt. [Klinglmair et al. 2014] weisen darauf hin, dass die EDIP97-Methode die aktuelle Bedeutung der Ressourcen nicht berücksichtigt, denn die Methode betrachtet die Gewinnungsrate nicht.

2.2.2.9 KRA: Kumulierter Rohstoffaufwand nach UBA-Methode

Der kumulierte Rohstoffaufwand (KRA) wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens „Indikatoren / Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion“ (Forschungskennzahl 205 93 368 UBA-FB 001563, [Giegrich et al. 2012]) vom *Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg* (Ifeu) im Auftrag des UBA entwickelt. Der KRA eines Produktes wird berechnet, indem alle entlang der Wertschöpfungskette bis zur Bereitstellung des Produktes eingesetzten Rohstoffmengen aufaddiert werden. Nicht wirtschaftlich verwendete Materialien, wie Abraum, bleiben unberücksichtigt. So würde sich beispielsweise der KRA eines Kupferbleches aus der Menge des zur Produktion eingesetzten Kupfererzes sowie den Mengen aller anderen zur Herstellung und Transport eingesetzten Rohstoffe wie z.B. Energieträger zusammensetzen. Da der Berechnung des KRA eine Energie- und Stoffstromanalyse zugrunde liegt, können bei vorliegen entsprechender Sachbilanzdaten auch die damit einhergehenden Umweltbelastungen berechnet werden. Fünf Indikatoren wurden zur Bestimmung der Nutzung natürlicher Ressourcen aus der Studie adressiert:

- ▶ Rohstoffindikator: Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA)
- ▶ Energieindikator: Kumulierter Energieaufwand (KEA)
- ▶ Ressource Wasser: Wasserbedarf
- ▶ Ressource Fläche: Flächenbedarf
- ▶ Senkenfunktion

Als Indikatoren für die Senkenfunktion wird weiterhin differenziert in:

- ▶ Treibhauseffekt (Schutzgut Klima)
- ▶ Versauerung (Schutzgut Luft)
- ▶ Aquatische Eutrophierung (Schutzgut Wasser)

Der KRA als Indikator zur Darstellung des Rohstoffverbrauchs in Deutschland wird als die Summe aller in ein System eingehenden Rohstoffe definiert und in Gewichtseinheiten (z. B. kg) ausgedrückt [Giegrich et al. 2012].

Die Berechnung der KRA-Werte der Rohstoffe besteht aus den inländischen Rohstoffentnahmen (physischen Menge) und importierten Rohstoffe, Halbwaren und Fertigwaren (Importe). Eine Korrektur der physischen Mengen der Importe in Rohstoffäquivalent wird berücksichtigt [Giegrich et al. 2012].

2.2.2.10 KRA: Kumulierter Rohstoffaufwand nach VDI 4800 Blatt 1 und Blatt 2

Zur Bewertung der Ressourceneffizienz entwickelt der *Verein Deutscher Ingenieure* (VDI) e. V. aktuell die Richtlinien für Methodische Grundlagen und Bewertungsindikatoren. Die Richtlinien sind:

- ▶ VDI 4800 Blatt 1 Ressourceneffizienz – Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien
- ▶ VDI 4800 Blatt 2 Ressourceneffizienz – Bewertung des Rohstoffaufwands (noch in Entwicklung)
- ▶ VDI 4800 Blatt 3 Ressourceneffizienz – Umweltindikatoren

Die betrachteten Rohstoffe umfassen abiotische (metallische und nicht metallische), fossil-energetische und biotische Rohstoffe. Außerdem sind Wasser und Fläche ebenfalls eingeschlossen. Eine Besonderheit bei VDI 4800 ist, dass die Kritikalität der Rohstoffe (Versorgungsrisiko und Vulnerabilität) in der Bewertung mitberücksichtigt wird [VDI 2014].

2.2.2.11 TRACI: Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts

Das *Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impact* (TRACI) wurde im Jahr 2002 von der *United States Environmental Protection Agency*²⁰ (US EPA) entwickelt [Ryberg et al. 2013]. Die TRACI-Methode beinhaltet nur eine Bewertung von fossilen Energieträgern (Kohle, Öl und Erdgas) hinsichtlich ihres Ressourcenverbrauchs und stellt keinen Indikator für den Verbrauch anderer mineralischer Rohstoffe dar [ILCD Handbuch 2010, Ryberg et al. 2013].

2.2.2.12 LUCAS: A New LCIA Method Used for a Canadian-Specific Context

Die *New LCIA Method Used for a Canadian-Specific Context* (LUCAS)-Methode wurde im Jahr 2005 vom *International Reference Centre for the Life Cycle of Products, Processes and Services*, Canada entwickelt [Toffoletto et al. 2007]. Die LUCAS-Methode basiert auf den Methoden TRACI und IMPACT 2002+, allerdings wurden diese an die kanadischen Verhältnisse angepasst [ILCD Handbuch 2010, ILCD Handbuch 2011, Toffoletto et al. 2007].

Bezüglich der Bewertung von Ressourcenknappheit stammt das Grundmodell für die Ermittlung der Charakterisierungsfaktoren aus der Eco-Indicator 99 Methode (über den Mehrbedarf an Energie [Toffoletto C. et al. 2007]). Die Charakterisierungsfaktoren für die Wirkungskategorie ADP konnten im Rahmen der Recherchen nicht gefunden werden, auch nicht auf der Internetseite der Entwickler²¹. Laut [ILCD Handbuch 2010] sollen die Charakterisierungsfaktoren der LUCAS-Methode von den ursprünglichen Methoden [TRACI und IMPACT 2002+] übernommen worden sein.

2.2.2.13 LIME: Life Cycle Impact Assessment Method based on Endpoint Modeling

Die *Life Cycle Impact Assessment based on Endpoint Modelling* (LIME)-Methode wurde vom *National Institute of Advanced Industrial Science and Technology*, Japan²² im Jahr 2003 entwickelt [Itsuno und Inaba 2003] und im Jahr 2008 mit dem Namen „LIME2“ verfeinert [Itsuno und Inaba 2012].

²⁰ <https://www.epa.gov/chemical-research/tool-reduction-and-assessment-chemicals-and-other-environmental-impacts-traci>

²¹ <http://www.ciraig.org/en/index.php>

²² <https://www.aist-riss.jp/old/lca/cie/activity/project/lime/index.html>

Die LIME-Methode wird in Japan verwendet. Hinsichtlich der Bewertung des Verbrauchs natürlicher Ressourcen wird der Verbrauch der Mineralien, der fossilen Energieträger und der biotischen Ressourcen in Betracht gezogen [Itsuno und Inaba 2012].

Das für die Ermittlung der Charakterisierungsfaktoren zugrunde gelegte Grundmodell basiert auf förderbaren Reserven [Itsuno und Inaba 2012]. Diese Methode bewertet nicht die Knappheit der Ressourcen, da die Gewinnungsrate im Grundmodell nicht berücksichtigt wird. Die Charakterisierungsfaktoren für die Wirkungskategorie ADP konnten im Rahmen dieser Recherchen nicht ermittelt werden.

2.2.3 Zusammenfassung zu den dargestellten Methoden

Tabelle 9 gibt einen Überblick über die Methoden zur Bewertung des ADP im Rahmen von Ökobilanzen. ADP ist eine der meistdiskutierten Wirkungskategorien, auch wenn es bis jetzt keine wissenschaftlich „korrekte“ Methode gibt, in der die Charakterisierungsfaktoren abgeleitet werden [van Oers und Guinée 2016]. [van Oers und Guinée 2016] empfehlen für die Bewertung des ADP die Baseline-Methode nach den Gesamtreserven. Denn diese basiert auf der Tatsache, dass der Datenbestand über die Gesamtreserven stabil und umfangreich ist. Die Daten nach wirtschaftlich nutzbaren Reserven sind aufgrund der Änderung der Technologie und wirtschaftlichen Entwicklung weniger stabil. Die Datengrundlage nach förderbaren Reserven basiert seit 2010 nicht mehr auf USGS.

Für die vorliegende Studie wurde für die Berechnung des ADP die Methode des ILCD-Handbuchs ausgewählt, die auf der CML-Methode basiert. Die Gründe für die Auswahl sind folgende:

- ▶ Das Grundmodell für die Ermittlung der Charakterisierungsfaktoren basiert auf der CML-Methode, die auf einem Konsens in der Wissenschaft der Ökobilanzierung beruht und vom ILCD-Handbuch und PEF empfohlen wird.
- ▶ Die CML-Methode berücksichtigt die Verfügbarkeit der abiotischen Ressourcen.
- ▶ Die ILCD-Methode verwendet die aktuellen Charakterisierungsfaktoren aus der CML-Methode (V4.7, Januar 2016).
- ▶ Die ILCD-Methode bewertet die größte Anzahl an Rohstoffen, da sie die 43 Charakterisierungsfaktoren der CML-Methode und Charakterisierungsfaktoren für 35 weitere Rohstoffe umfasst.

Tabelle 8: Quellen für Charakterisierungsfaktoren der ILCD-Methode

Methode	Bewertete Ressource	Charakterisierungsfaktoren
CML-Methode (V4.7, Jan.2016)	43 Rohstoffe	siehe Tabelle 70 im Anhang – CF nach förderbaren Reserven
ILCD-Handbuch (v. 1.0.10, August 2016)	16 Seltene Erden	5,69E-04 kg Sb-eq./kg _{Seltene Erden}
ILCD-Handbuch (v. 1.0.10, August 2016)	weitere 19 Rohstoffe	siehe Tabelle 71 im Anhang

Eigene.

Ein Unterschied in der Bestimmung der Baseline zwischen der Methode des ILCD-Handbuchs und der CML-Methode besteht darin, dass die Charakterisierungsfaktoren im ILCD-Handbuch für die Bewertung des ADP nach den förderbaren Reserven zugrunde gelegt sind. Im Gegensatz dazu definiert die CML-Methode die Bewertung des ADP nach den Gesamtreserven als Baseline [van Oers und Guinée 2016].

Tabelle 9: Überblick Auswertungsmethoden abiotischer Rohstoffverbrauch

Name der Methode	Wirkungskategorie für Rohstoffe	Midpoint/Endpoint	Indikator	Methodische Grundlage	Anzahl der Rohstoffe	Charakterisierungsfaktoren (CFs) online verfügbar?	Version / Datum für CF-Aktualisierung (Stand: Sep. 2016)	Anmerkungen
CML 2002	ADP	Midpoint	kg Sb-eq.	Auf Basis von nachgewiesenen, förderbaren und wirtschaftlich nutzbaren Reserven und Gewinnungsraten	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 49 nach nachgewiesenen Reserven ▶ 43 nach förderbaren Reserven ▶ 44 nach wirtschaftlich nutzbaren Reserven 	Ja	Jan. 2016 (Version 4.7)	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Aktuellste CF ▶ Methode ist Grundlage für andere Auswertungsmethoden
ILCD-Handbuch	ADP	Midpoint und Endpoint	kg Sb-eq. (Midpoint)	Auf Basis von CML-Methode nach förderbaren Reserven und Gewinnungsraten	<ul style="list-style-type: none"> ▶ insgesamt 78 ▶ davon 43 nach förderbaren Reserven aus CML-Methode ▶ 35 zusätzliche CFs 	Ja	August 2016 (Version 1.0.10)	<ul style="list-style-type: none"> ▶ CML: Aktuellste CF ▶ Ein allgemeiner CF für 16 Seltene Erden ▶ CFs für 19 weitere Rohstoffe ▶ größte Anzahl an CFs von allen Auswertungsmethoden

Name der Methode	Wirkungskategorie für Rohstoffe	Midpoint/Endpoint	Indikator	Methodische Grundlage	Anzahl der Rohstoffe	Charakterisierungsfaktoren (CFs) online verfügbar?	Version / Datum für CF-Aktualisierung (Stand: Sep. 2016)	Anmerkungen
AADP	AADP	Midpoint	kg Sb-eq.	Auf Basis von CML-Methode, zusätzlich wird die anthropogene Verfügbarkeit berücksichtigt	35	ja	Die mit der anthropogenen Verfügbarkeit relevanten Faktoren stammen aus 2015. Unklar ist, welche Version der CFs von CML zugrunde gelegt ist	Beschränkung: <ul style="list-style-type: none"> ▶ Neue Methode, es besteht noch kein Konsens im LCA-Bereich ▶ Nur begrenzt in LCA-Software integriert
Eco-Indicator 99	Ressourcenverbrauch	Endpoint	MJ Überschussenergie	Auf Basis von Überschussenergie	22 Mineralien	ja	2011	Beschränkung: <ul style="list-style-type: none"> ▶ Ergebnisse auf Midpoint-Ebene sind nicht separat dargestellt
ReCiPe	FDP	Midpoint und Endpoint	kg Oil-eq. (Midpoint)	Überschussenergie und Überschusskosten	4 fossile Energieträger	ja	Version 1.11, August 2014	-
	MDP	Midpoint und Midpoint	kg Fe-eq. (Midpoint)		30 Metalle	ja	Version 1.11, August 2014	-

Name der Methode	Wirkungskategorie für Rohstoffe	Midpoint/Endpoint	Indikator	Methodische Grundlage	Anzahl der Rohstoffe	Charakterisierungsfaktoren (CFs) online verfügbar?	Version / Datum für CF-Aktualisierung (Stand: Sep. 2016)	Anmerkungen
EPS 2000	abiotische Ressourcen	Endpoint	kg Rohstoffe	monetisierte Werte basiert auf WTP	82	Nicht relevant, da kein Leitindikator definiert	Nicht relevant	Beschränkung: <ul style="list-style-type: none"> ▶ keine Leitindikator ▶ bei Nutzung der Methode müssen die auf Monetisierung basierenden Gewichtungsfaktoren aus dem Jahr 1999 verwendet werden
IMPACT 2002+	Mineral extraktion	Midpoint und Endpoint	MJ Überschussenergie	Basiert auf Eco-Indicator 99: Überschussenergie	22 Mineralien (nach Eco-Indicator 99)	k.A.	K.A.	-

Name der Methode	Wirkungskategorie für Rohstoffe	Midpoint/Endpoint	Indikator	Methodische Grundlage	Anzahl der Rohstoffe	Charakterisierungsfaktoren (CFs) online verfügbar?	Version / Datum für CF-Aktualisierung (Stand: Sep. 2016)	Anmerkungen
EDIP97	Nicht-erneuerbare Ressourcen	Midpoint	kg Rohstoffe (Midpoint)	Auf Basis von wirtschaftlich nutzbaren Reserven	24	Nicht relevant, da kein Leitindikator definiert	Nicht relevant	<p>Beschränkung:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ Die Knappheit der Ressource ist nicht bewertet, da die Gewinnungsrate nicht berücksichtigt wird. ▶ kein Leitindikator, wenn man diese Methode verwendet, müssen die Gewichtungsfaktoren aus dem Jahr 2004 verwendet werden.
KRA nach VDI	KRA	Midpoint	kg Rohstoffe	Bewertung der die Kritikalität der Rohstoffe (Versorgungsrisiko und Vulnerabilität)	k.A.	nein	nein	<p>Beschränkung:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ Blatt 2, das für die Berechnung benötigten Faktoren beinhaltet, ist noch in Entwicklung. ▶ Unbekannte CFs

Name der Methode	Wirkungskategorie für Rohstoffe	Midpoint/Endpoint	Indikator	Methodische Grundlage	Anzahl der Rohstoffe	Charakterisierungsfaktoren (CFs) online verfügbar?	Version / Datum für CF-Aktualisierung (Stand: Sep. 2016)	Anmerkungen
TRACI	Keine (nur die Bewertung für Fossile Energieträger)	Midpoint	Nicht relevant	Nicht relevant	Nicht relevant	Nicht relevant	Nicht relevant	Beschränkung: ▶ kein Indikator für den Verbrauch der Mineralien
LUCAS	ADP	Midpoint	MJ Überschussenergie	Basiert auf Eco-Indicator 99: Überschussenergie	22: Mineralien (nach Eco-Indicator 99)	nein	k.A.	▶ keine
LIME	Verbrauch der Mineralien	Midpoint und Endpoint	kg Sb-eq. (Midpoint)	Basiert auf förderbaren Reserven	k.A.	nein	k.A.	Beschränkung: ▶ CFs nicht verfügbar Die Knappheit der Ressource ist nicht bewertet, da die Gewinnungsrate nicht berücksichtigt wird

3 Entwicklung des Kennzahlensystems

3.1 Einfluss der Merkmale von Rechenzentren auf Kennzahlen

In der Praxis finden sich sehr unterschiedliche Arten von RZ. Daher werden im Folgenden zunächst die Auswirkungen von Unterscheidungsmerkmalen auf die Anwendbarkeit und Ausprägung von Kennzahlen diskutiert, um die Notwendigkeit einer Differenzierung des Kennzahlensystems nach RZ-Arten zu bestimmen. Die Anwendbarkeit beschreibt, inwiefern ein Merkmal die Messung von Kennzahlen begünstigt oder erschwert. Zudem wird erörtert, inwiefern Merkmale die Ausprägung der Kennzahlen beeinflussen und ggfs. einer RZ-übergreifenden Vergleichbarkeit entgegenstehen.

Standortfaktoren

Die Standortfaktoren stellen eine wichtige Entscheidungsgrundlage für RZ-Betreiber zum Bau und Betrieb eines RZ an einem bestimmten Ort dar. Die lagespezifischen Merkmale wirken sich unmittelbar auf die technischen Möglichkeiten zur Ausgestaltung und zum Betrieb des RZ aus. Die nachstehenden Standortfaktoren stellen eine unvollständige Auswahl dar:

- ▶ Geografische Lage (Höhenlage, räumliche Nähe zu Seen, Flüssen und Meeren)
- ▶ Klimatische Bedingungen (Außentemperatur, Luftfeuchte, Sonneneinstrahlung, Wind)
- ▶ Direkte Umgebung (Industriepark vs. innerstädtisches Gewerbegebiet vs. Wohnviertel)
- ▶ Gebäudeart (Mischgebäude, Dediziertes Gebäude, Container)
- ▶ Energieverfügbarkeit (Erneuerbare Energien, Fernwärme, Fernkälte, Erdgas etc.)
- ▶ Konnektivität (Anbindung an Internetknoten, Entfernung zu den Kunden)

Standortfaktoren haben keine Auswirkungen auf die Anwendbarkeit von Kennzahlen, beeinflussen aber deren Ausprägungen. Bspw. begünstigen die Nutzung natürlicher Wärmesenken wie Flüsse und Meere in der Nähe oder niedrige Außenlufttemperaturen die Energieeffizienz der Klimatisierung und wirken somit positiv auf die *Jahresarbeitszahl des Kühlsystems* (JAZ, [RAL 2015]). In sehr warmen Regionen kann die energieeffiziente Freie Kühlung mit der Außenluft nicht oder nur stark eingeschränkt angewendet werden kann, was die JAZ tendenziell eher beeinträchtigt. Auch der *Energy Reuse Factor* (ERF, [Patterson et al. 2010]) wird besser ausfallen, wenn die Abwärme des RZ am Standort sinnvoll von Dritten genutzt werden kann.

Trotz des Einflusses der Standortfaktoren auf die Ausprägungen von Kennzahlen wird die Vergleichbarkeit von RZ an unterschiedlichen Standorten prinzipiell nicht eingeschränkt. Denn die Wahl des Standortes und somit der spezifischen Lagemerkmale ist ein direktes Ergebnis der bewussten Entscheidung eines Betreibers, das RZ an Ort und Stelle zu bauen und zu betreiben. Jedem Betreiber muss klar sein, dass sich bestimmte Lagemerkmale eines Standortes positiv oder negativ auf die in Teilbereichen des RZ über den Lebensweg erzielbare Ressourceneffizienz auswirken.

Betriebsmodelle

Betriebsmodelle beschreiben die in der Praxis üblichen Formen der Aufteilung von Verantwortungsbereichen und Besitzverhältnissen in RZ. Die Betriebsmodelle haben großen Einfluss auf die Möglichkeiten zur technischen Ausgestaltung und zum Betrieb eines RZ. Der EU CoC DC definiert fünf generische Betriebsmodelle (siehe Tabelle 10, vgl. [Acton et al. 2017]):

Tabelle 10: Betriebsmodelle von Rechenzentren

Typ	Beschreibung
Betreiber	Betreibt das gesamte RZ und hat alle technischen (Gebäude, Stromversorgung, Klimatisie-

	rung und IT), wirtschaftlichen und organisatorischen Aspekte unter seiner Kontrolle.
Colocation-Anbieter	Betreibt das RZ primär zum Zweck des Verkaufs oder der Vermietung der Fläche, des Stroms und der Klimatisierung an die Kunden, die die IT installieren und verwalten.
Colocation-Kunde	Kauft oder mietet die Fläche, den Strom und die Klimatisierung eines RZs von einem Colocation-Anbieter und besitzt und verwaltet die IT.
Managed Service Provider (MSP)	Besitzt und verwaltet die RZ-Fläche, den Strom, die Klimatisierung, die IT-Geräte und Anteile der Software, um den Kunden IT-Dienste zu liefern. Dies beinhaltet konventionelles IT-Outsourcing.
MSP in Colocation	Ein Anbieter von IT-Diensten (Managed Services), der die Fläche, den Strom und die Klimatisierung eines RZs bei einem Colocation Anbieter mietet/kauft und nicht selber verwaltet.

Eigene nach [Acton et al. 2017].

Zudem unterscheidet der EU CoC DC acht Verantwortungsbereiche (siehe Tabelle 11, vgl. [Acton et al. 2017]):

Tabelle 11: Verantwortungsbereiche in Rechenzentren

Typ	Beschreibung der Aufgabengebiete
Gebäude	Das Gebäude, inklusiv Sicherheit, Lage und Wartung.
Mechanische u. elektrische Anlagen	Die Auswahl, Installation, Konfiguration, Wartung und Verwaltung der mechanischen und elektrischen Anlagen.
RZ-Fläche	Die Installation, Konfiguration, Wartung und Verwaltung der Hauptfläche eines RZs, auf der die IT installiert ist.
IT-Schränke	Die Installation, Konfiguration, Wartung und Verwaltung der IT-Schränke (Racks), in denen die IT installiert ist.
IT (physisch)	Die Auswahl, Installation, Konfiguration, Wartung und Verwaltung der physischen IT.
Betriebssystem / Virtualisierung	Die Auswahl, Installation, Konfiguration, Wartung und Verwaltung der auf der physischen IT installierten Betriebs- und Virtualisierungssoftware.
Software	Die Auswahl, die Installation, die Konfiguration, die Wartung und die Verwaltung der auf der physischen IT installierten Applikationssoftware.
Geschäftspraxis	Die Entscheidung und Kommunikation des Geschäftsbedarfs, einschließlich die Bedeutung des Systems, Verfügbarkeit, Wartungsanforderungen und Datenmanagementprozesse.

Eigene nach [Acton et al. 2017].

Den Betriebsmodellen ordnet der EU CoC DC jeweils typische Verantwortungsbereiche zu (siehe Tabelle 12, vgl. [Acton et al. 2017]):

Tabelle 12: Verantwortungsbereiche in Rechenzentren nach Betriebsmodell

Verantwortungsbereich	Betreiber	MSP	Colocation Anbieter	Colocation Kunde	MSP in Colocation
Gebäude					
Mechanische u. elektrische Anlagen					
RZ-Fläche					

IT-Schränke					
IT (physisch)					
Betriebssystem / Virtualisierung					
Software					
Geschäftspraxis					
<div style="display: flex; justify-content: space-between; width: 100%;"> verantwortlich kommt drauf an nicht verantwortlich </div>					

Eigene nach [Acton et al. 2017].

Das Betriebsmodell hat direkten Einfluss auf die Anwendbarkeit und die Ausprägungen von Kennzahlen. Zum einen bestimmen die Verantwortungsbereiche, welche Freiheitsgrade ein RZ-Betreiber bei der Gestaltung der Technik und des Betriebes hat, und zum anderen, auf welche Informationen er zugreifen kann. Bspw. können Colocation-Anbieter ihren Kunden nicht vorgeben, welche IT-Systeme sie installieren und wie die Kunden die IT-Systeme betreiben sollen. Die Colocation-Kunden wiederum haben keinen direkten Einfluss auf die Auswahl und Betriebsweise der Gebäudetechnik, fordern aber die Einhaltung bestimmter Verfügbarkeiten durch Redundanzen, was direkten Einfluss auf die Anzahl und Auslastung der installierten gebäudetechnischen Anlagen und somit auf den Rohstoff- und Energiebedarf des RZ hat. Ein bilateraler Datenaustausch über die Einrichtungen, Auslastungen und Energiebedarfe findet zwischen dem Colocation-Anbieter und den Kunden üblicherweise nicht statt. Die Ermittlung systemübergreifender Kennzahlen und darauf basierende ganzheitliche Optimierung der Ressourceneffizienz und Umweltwirkungen sind für diese in der Praxis häufig vorkommende Betriebsmodellkonstellation erschwert. Diese Problematik wird bei der Spezifikation des Kennzahlensystems in Abschnitt 3.2 entsprechend berücksichtigt.

Dienste und Applikationen

In RZ werden abhängig vom Zweck unterschiedlichste IT-Dienste mittels der notwendigen Software-Applikationen bereitgestellt. Das Marktforschungs- und Beratungsunternehmen *International Data Corporation* unterscheidet in Bezug auf geschäftskritische Applikationen, die auf Windows-Betriebssystemen laufen, bereits acht verschiedene Kategorien [IDC 2010]:

- ▶ Geschäftsprozesse
- ▶ Entscheidungsunterstützung
- ▶ Zusammenarbeit
- ▶ Anwendungsentwicklung
- ▶ IT-Infrastruktur
- ▶ Web Infrastruktur
- ▶ Industrielle Forschung und Entwicklung
- ▶ Sonstige

Jeder Dienst und jede Applikation im RZ hat individuelle Nutzungsprofile und Qualitätsanforderungen und verursacht in der technischen Systemumgebung (Hard- und Software) charakteristische Arbeitslasten (engl.: workload). Die Arbeitslasten können nach zeitlichem und mengenmäßigem Auftreten (z. B. zufällige Echtzeit-Transaktionen vs. planbare Stapelverarbeitung) und die in Anspruch genommenen IT-Komponenten (z. B. rechen- vs. speicher- vs. datenübertragungsintensiv) unterschieden werden. Dienste bzw. Applikationen mit ähnlichen Anforderungen und Nutzungsprofilen können hierbei zu Arbeitslastklassen zusammengefasst werden.

Die Anwendbarkeit von Kennzahlen wird durch das Dienstspektrum eines RZ insofern beeinflusst, als dass für verschiedene Arbeitslastklassen differenzierte Maße zur richtungssicheren Beschreibung der IT-Leistung vorliegen müssen. Um die Handhabbarkeit eines Kennzahlensystems zu gewährleisten, sollte die Differenzierung von Arbeitslastklassen auf ein Mindestmaß beschränkt werden. Die pro Arbeitslastklasse spezifizierten Leistungsmaße müssen den Teilnutzen trotzdem hinreichend genau abbilden und im Idealfall zu einem Gesamtnutzen aggregierbar sein. Die Regeln für die Zuordnung von Diensten und Applikationen zu Arbeitslastklassen, die Erfassung deren Teilnutzens über definierte Leistungsmaße und die standardisierte Anwendung von Aggregationsregeln beeinflussen direkt die Ausprägung der Kennzahlen. Die Schwierigkeit liegt darin, die Leistungsschwerpunkte von RZ neutral zu erfassen. Diese Problematik wird bei der Entwicklung vergleichbarer Nutzenindikatoren für die IT-Leistung in Abschnitt 3.3 adressiert.

Größe

Die physische Größe eines RZ kann über nachfolgende Parameter charakterisiert werden:

- ▶ Fläche (RZ-Gebäude, IT-Räume)
- ▶ Anzahl der Systeme und Komponenten (Racks, Höheneinheiten (HE), Server, CPU etc.)
- ▶ elektrische Anschlussleistung (RZ, IT)
- ▶ Datenverarbeitungskapazität (Rechenkapazität, Speicherkapazität, Übertragungskapazität)

Die Größe eines RZ hat keine direkten Auswirkungen auf die Anwendbarkeit von Kennzahlen. Es darf aber hinterfragt werden, ob für kleine RZ die Erhebung jeder der in Abbildung 9 dargestellten Kennzahlen sinnvoll ist. Unter Experten ist zudem unstrittig, dass mit zunehmender Größe von RZ über Skaleneffekte Kostenvorteile realisiert werden können. Inwiefern eine zunehmende Größe auch die Ressourceneffizienz und die Umweltwirkungen von RZ positiv beeinflusst, muss noch geklärt werden.

Sicherheits- und Verfügbarkeitsvorkehrungen

In RZ werden physische und logische Vorkehrungen getroffen, um Sicherheits- und Datenschutzanforderungen zu erfüllen und die Verfügbarkeit der Dienste zu gewährleisten. Beispiele für die Unterscheidung von Verfügbarkeitsklassen sind die Tier-Klassifikation des Uptime Institutes und die Klassifikation nach der EN 50600. Die Sicherheits- und Verfügbarkeitsvorkehrungen haben keine Auswirkungen auf die Anwendbarkeit von Kennzahlen. Der redundante Betrieb von Einrichtungen oder die Anwendung von Verfahren der Kryptografie haben aber Auswirkungen auf den materiellen und energetischen Aufwand und somit auf die Ausprägungen von Kennzahlen für die Bewertung der Ressourceneffizienz. Zur Gewährleistung der RZ-übergreifenden Vergleichbarkeit sollte bei der Definition von Leistungsindikatoren darauf geachtet werden, dass unterschiedliche Sicherheits- und Verfügbarkeitsvorkehrungen nach Möglichkeit in die Nutzenbewertung einfließen oder anders verdeutlicht werden.

Räumlichkeiten und technische Einrichtungen

Trotzdem sich in jedem RZ die gleichen funktionalen Systeme finden lassen, werden diese abhängig von den oben ausgeführten Merkmalen und Präferenzen der Planer und Betreiber auf technischer Ebene unterschiedlich ausgestaltet. Die nachfolgende Aufstellung listet die funktionalen Systeme sowie die in der Praxis üblichen technischen Teilsysteme und Komponenten auf:

Räumlichkeiten und Gebäudetechnik

- ▶ Räumlichkeiten (Wände, Decken, Doppelböden, Einhausungen, Racks, Fenster, Türen)
- ▶ Heizungs-, Lüftungs-, Kühl- und Klimatechnik (HLK, z. B. Ventilatoren, Kompressoren, Pumpen, Ventile, Wärmetauscher, thermische Speicher, Verrohrung)

- ▶ Energiesystem (Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV), Netzersatzanlagen (NEA), Transformatoren, Stromverteilungen, Schaltanlagen, Eigenerzeugungsanlagen, Stromleitungen etc.)
- ▶ Sonstiges (Brandschutz, Zutrittskontrolle, Gebäudeleittechnik (GLT) und Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR), Beleuchtung, Fahrstühle etc.)

IT-Systeme

- ▶ Server (Ein-/Mehrknoten 19“ Rack Server, Blade Systeme, Sonderformen wie Tower Server, Mikro Server und Mainframes)
- ▶ Datenspeicher (SSD und HDD in Disk-Arrays als dominierende Speichermedien, Magnetbänder und optische Medien, Controller zur Verwaltung)
- ▶ Netzwerke (Local Area Network (LAN), Storage Area Network (SAN), Wide Area Network (WAN), Switches und Router als dominierende Ausrüstung ergänzt um sonstige Appliances (z. B. Firewall, Load Balancer) und Kabel (Kupfer, Glasfaser))
- ▶ Klassische Telekommunikationsanlagen werden zunehmend von Voice over Internet Protocol (VoIP) basierten Lösungen abgelöst. Sie werden zukünftig sehr wahrscheinlich keine eigene technische Systemklasse eines RZ mehr bilden und sind somit für die vorliegende Studie vernachlässigbar.
- ▶ Managementkomponenten (Terminals, Monitore, Personal Computer etc. finden sich in vergleichsweise geringem Umfang in RZ, sind somit für die vorliegende Studie vernachlässigbar)

Die Räumlichkeiten und technischen Einrichtungen eines RZ haben keinen direkten Einfluss auf die Anwendbarkeit von Kennzahlen. Jedoch existieren nicht für alle technischen IT-Subsysteme mittels Benchmarks standardisiert ermittelte Leistungswerte, die als Hilfskenngrößen zur abstrakten Beschreibung der IT-Leistung genutzt werden können. Wenn Benchmarks existieren, sind nicht für alle auf dem Markt verfügbaren Modellkonfigurationen Ergebnisse frei zugänglich. Diese Problematik wird bei der Definition vergleichbarer Nutzenindikatoren für die IT-Leistung in Abschnitt 3.3 behandelt.

Die Räumlichkeiten und technischen Einrichtungen eines RZ beeinflussen zudem die Ausprägung von Kennzahlen, da sich bestimmte Räumlichkeiten positiv oder negativ auf Betriebskonzepte auswirken können und jedes Gerät abhängig vom Betriebspunkt einen individuellen Wirkungsgrad hat. Die RZ-übergreifende Vergleichbarkeit ist dadurch nicht beeinträchtigt. Vielmehr kann bei besserer Ausprägung der Kennzahlen auf effiziente Ausstattungsvarianten und Betriebskonzepte geschlossen werden.

Zusammenfassung zum Einfluss der Merkmale von Rechenzentren auf Kennzahlen

Tabelle 13 fasst die Ergebnisse der Diskussion zu den Auswirkungen der RZ-Merkmale auf die Anwendbarkeit und Ausprägungen von Kennzahlen zusammen:

Tabelle 13: Einfluss der Merkmale von Rechenzentren auf Kennzahlen

Merkmalbereich	Anwendbarkeit	Ausprägung
Standortfaktoren	nein	ja
Betreibermodelle	ja	ja
IT-Dienste / Applikationen	ja/nein	ja/nein
Größe	nein	ja/nein
Sicherheitsvorkehrungen	nein	ja/nein
Räumlichkeiten und Einrichtungen	ja/nein	ja

Alle Merkmalbereiche beeinflussen die Anwendbarkeit und/oder die Ausprägung von Kennzahlen. Um die Anwendbarkeit des Kennzahlensystems zu gewährleisten, müssen bei der Entwicklung vor allem die unterschiedlichen Betriebsmodelle und IT-Leistungsschwerpunkte von RZ berücksichtigt werden.

Um die Vergleichbarkeit von RZ zu erhöhen, wäre ein möglicher Ansatz, durch ergänzende Berichtsrichtlinien z. B. auf die im RZ getroffenen Verfügbarkeitsvorkehrungen einzugehen.

Ausgehend von diesen Vorüberlegungen werden in den nachstehenden Abschnitten die wesentlichen Überlegungen und Schritte bei der Entwicklung des Kennzahlensystems dargestellt.

3.2 Quantifizierung der Ressourceneffizienz von Rechenzentren

Allgemein beschreibt die Effizienz das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand. Speziell die Ressourceneffizienz eines RZ kann im umweltwissenschaftlichen Sinn nach Formel 6 als das Verhältnis der IT-Leistung zu der Ressourceninanspruchnahme²³ über den gesamten Lebenszyklus definiert werden:

Formel 6: Data Center Ressource Efficiency (DCRE)

$$\text{Data Center Ressource Efficiency (DCRE)} = \frac{\text{IT-Leistung}}{\text{RZ-Ressourcen}}$$

Das zu entwickelnde Kennzahlensystem soll in der Praxis möglichst flächendeckend angewendet werden können. Daher soll es so gestaltet werden, dass den Ansatz auch Colocation-Anbieter und Colocation-Kunden anwenden bzw. das Gebäudemanagement und das IT-Management eigene Kennzahlen bilden können. Die Gesamtressourceneffizienz eines RZ wird als Produkt der Ressourceneffizienz der Gebäudetechnik und der Ressourceneffizienz der IT bestimmt:

Formel 7: DCRE differenziert nach Ressourceneffizienz der Funktionalen Hauptsysteme

$$\text{DCRE} = \text{Data Center infrastructure Ressource Efficiency (DCiRE)} \times \text{IT Ressource Efficiency (ITRE)}$$

Um die Ressourceneffizienz der Gebäudetechnik zu quantifizieren, muss eine Hilfsgröße zur Beschreibung des Nutzens der Gebäudetechnik festgelegt werden. Der Nutzen der Gebäudetechnik liegt darin, den IT-Betrieb unter Einhaltung von Qualitätsanforderungen (Verfügbarkeit, Sicherheit) mit dem Ziel zu ermöglichen, möglichst wenig zusätzliche Ressourcen einzusetzen. Daher wird die Ressourceneffizienz der Gebäudetechnik in Anlehnung an die DCiE, die sich ausschließlich auf die Energieeffizienz der Gebäudetechnik in der Nutzungsphase bezieht, als das Verhältnis der Ressourceninanspruchnahme der IT zu der Ressourceninanspruchnahme des RZ über den Lebensweg definiert (siehe Formel 8):

Formel 8: Data Center infrastructure Ressource Efficiency (DCiRE): Ressourceneffizienz der Gebäudetechnik

$$(8) \text{DCiRE} = \frac{\text{IT-Ressourcen}}{\text{RZ-Ressourcen}} = \frac{\text{IT-Ressourcen}}{\text{IT-Ressourcen} + \text{GT-Ressourcen}}$$

Die dimensionslose DCiRE bewegt sich zwischen null und eins. Ein höherer Wert bedeutet eine höhere Ressourceneffizienz der Gebäudetechnik, d. h. bei gegebener IT-Leistung und gegebenem Einsatz von Ressourcen für die IT werden weniger zusätzliche Ressourcen für die Gebäudetechnik in Anspruch genommen. Die DCiRE stellt wie die DCiE keinen Bezug zur IT-Leistung her und lässt nur in Verbindung mit der ITRE einen Rückschluss auf die Ressourceneffizienz des gesamten RZ zu.

Problematisch an der Definition der DCiRE nach Formel 8 ist, dass Colocation-Anbieter den Stromverbrauch in der Nutzungsphase der IT messen können, aber keinen Zugriff auf Informationen zum IT-Bestand der Kunden haben. Colocation-Anbieter können die DCiRE nur ermitteln, wenn die Colocation-Kunden die fehlenden Informationen liefern. Da dies in der Praxis nicht durchsetzbar ist, empfiehlt sich für Colocation-Anbieter eine Abwandlung der Berechnungsvorschrift der DCiRE nach Formel 9:

²³ Zur besseren Lesbarkeit wird Ressourceninanspruchnahme in den Formeln durch Ressourcen ersetzt.

Formel 9: DCiRE_{Colo}: Abwandlung der DCiRE für Colocation-Anbieter

$$DCiRE_{Colo} = \frac{IT\text{-Ressourcen}_{Energie\ Nutzung}}{IT\text{-Ressourcen}_{Energie\ Nutzung} + GT\text{-Ressourcen}}$$

Der Colocation-Anbieter bilanziert für die IT anstelle der Ressourceninanspruchnahme über den Lebensweg nur den von ihm messbaren IT-Stromverbrauch²⁴ in der Nutzungsphase. Somit ist ein Informationsaustausch zwischen dem Colocation-Anbieter und den Colocation-Kunden über den IT-Gerätebestand nicht mehr zwingend notwendig. Bei gegebener Ressourceninanspruchnahme für die Gebäudetechnik und die IT ist die DCiRE_{Colo} nach Formel 9 stets geringer als die DCiRE nach Formel 8 (siehe Berechnungsbeispiel in Tabelle 14). Dies schafft für Colocation-Anbieter Anreize, die Informationen zur Bilanzierung der Ressourceninanspruchnahme der Herstellung, der Distribution und der Entsorgung der IT für die Berechnung der DCiRE nach Formel 8 zusammenzutragen, um eine höhere Ressourceneffizienz der Gebäudetechnik ausweisen zu können.

Unabhängig von dieser Differenzierung wird die ITRE nach Formel 10 als das Verhältnis von IT-Leistung zur Ressourceninanspruchnahme durch die IT definiert:

Formel 10: IT Ressource Efficiency (ITRE)

$$ITRE = \frac{IT\text{-Leistung}}{IT\text{-Ressourcen}}$$

Das Produkt der Formel 8 und der Formel 10 kann auf die Definition der Ressourceneffizienz eines RZ nach Formel 6 zurückgeführt werden. Das Produkt der Formel 9 und der Formel 10 ist nicht identisch mit dem Ergebnis der Formel 6. Es wird im Vergleich zum Produkt aus Formel 8 und Formel 10 immer kleiner ausfallen und somit eine im Vergleich geringere Gesamtressourceneffizienz für ein jedes RZ ausweisen (siehe das Berechnungsbeispiel in Tabelle 14).

Tabelle 14: Berechnungsbeispiel für die DCiRE und die DCiRE_{Colo}

	vollständiger Eigenbetrieb	Colocation-Anbieter + Kunde
Ressourcen für die Herstellung, den Transport und die Entsorgung der IT	1 Ressourceneinheit (RE)	1 RE
Ressourcen für die Nutzung der IT	1 RE	1 RE
Ressourcen für die Herstellung, den Transport, die Nutzung und die Entsorgung der Gebäudetechnik	2 RE	2 RE
Ressourceneffizienz Gebäudetechnik (DCiRE bzw. DCiRE _{Colo})	(1 RE + 1 RE) / (1 RE + 1 RE + 2 RE) = 2/4 = 50 %	(1 RE + 0 RE ²⁵) / (1 RE + 0 RE ¹⁸ + 2 RE) = 1/3 = 33,3 %
IT-Leistung	1 Leistungseinheit (LE)	1 LE
Ressourceneffizienz der IT	1 LE / (1 RE + 1 RE) = ½ LE/RE	1 LE / (1 RE + 1 RE) = ½ LE/RE
Ressourceneffizienz des RZ (DCiRE x ITRE bzw. DCiRE _{Colo} x ITRE)	1/4 LE/RE	1/6 LE/RE

Eigene.

²⁴ Die Umweltwirkung der Inanspruchnahme einer Ressource (z. B. Stromverbrauch) wird über Charakterisierungsfaktoren normiert und in die gleiche Einheit umgerechnet (siehe z. B. Berechnung ADP in Abschnitt 2.2.2.1).

²⁵ Der Ressourcenaufwand für die Herstellung, den Transport und die Entsorgung der IT ist vom Colocation-Anbieter nicht messbar und muss daher mit null angesetzt werden.

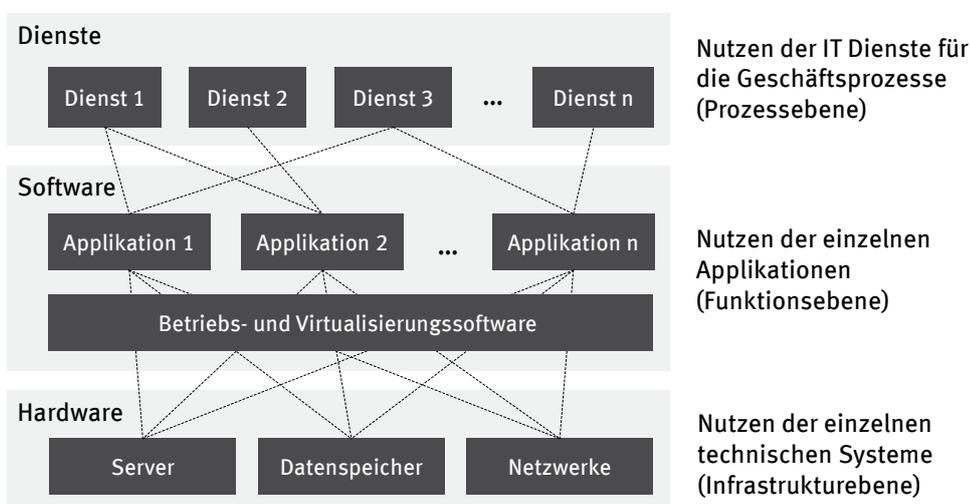
Der Ansatz die Ressourceneffizienz der Gebäudetechnik von der Ressourceneffizienz der IT zu differenzieren, ermöglicht es, bei organisatorisch getrennten Verantwortungsbereichen mit minimalem gegenseitigem Informationsaustausch jeweils eigene Kennzahlen bilden und trotzdem eine systemübergreifende Gesamtressourceneffizienz für das RZ ermitteln zu können. Colocation-Anbieter können alternativ auf Formel 9 zurückgreifen, Colocation-Kunden auf Formel 10.

Von diesen Festlegungen ausgehend werden nachstehend die Ansätze zur Bestimmung der IT-Leistung und der Ressourceninanspruchnahme weiter konkretisiert.

3.3 Ermittlung der IT-Leistung eines Rechenzentrums

Die IT-Leistung eines RZ kann auf verschiedenen Ebenen erfasst und bewertet werden. Abbildung 14 unterscheidet die Möglichkeiten zur Erfassung der IT-Leistung der technischen IT-Systeme auf Infrastrukturebene, der Applikationen auf Funktionsebene und der IT-Dienste auf Geschäftsprozessebene.

Abbildung 14: Ebenen der IT-Leistung



Eigene.

Auf Geschäftsprozessebene bemisst sich die IT-Leistung über die Menge und Wertigkeit der in einer Messperiode abgerufenen IT-Dienste. Die Wertigkeit eines IT-Dienstes hängt von der Art des IT-Dienstes, vom Zeitpunkt der Bereitstellung und von der Ausführungsdauer ab (vgl. [Anderson et al. 2008]). Bspw. hat das Abrufen einer rein informativen Webseite einen anderen Wert als der Kauf eines Produktes über einen Onlineshop. Auch nimmt der Nutzen eines IT-Dienstes aus Sicht eines Kunden ggfs. ab, wenn ein IT-Dienst verzögert abrufbar ist oder eine längere Bearbeitungsdauer benötigt. Derartige Zusammenhänge können für jeden IT-Dienst durch individuelle Nutzenfunktionen ausgedrückt werden. Unter Zuhilfenahme von Normierungsfaktoren kann die vom RZ insgesamt erbrachte IT-Leistung nach Formel 11 ermittelt werden (vgl. [Anderson et al. 2008]):

Formel 11: IT-Leistung eines Rechenzentrums

$$\text{IT-Leistung} = \sum_{i=1}^M V_i \times U_i(t, T) \times T_i$$

M: Anzahl begonnene IT-Dienste im Untersuchungszeitraum

V_i : Normierungsfaktor (individuelle Wertigkeit des IT-Dienstes i)

$T_i = 1$ wenn der IT-Dienst i im Untersuchungszeitfenster abgeschlossen, sonst 0

$U_i(t,T)$: zeitbasierte Nutzenfunktion des IT-Dienstes i

T : Laufzeit (vom Start bis zum Ende) des IT Dienstes i

t : Zeitpunkt (Datum, Uhrzeit) der Beendigung des IT-Dienstes i

Eigene nach [Anderson et al. 2008].

Ein praktisches Beispiel für die Erfassung der IT-Leistung auf Geschäftsprozessebene ist die *Digital Service Efficiency* (DSE) des E-Commerce Unternehmens *eBay* [eBay 2013]. Um die Effizienz der RZ des Unternehmens zu bewerten, stellt *eBay* die über die bereitgestellten Internetplattformen realisierten Käufe und Verkäufe u. a. den Kosten und dem Stromverbrauch der RZ gegenüber. Hierbei wird nur die Anzahl der erfolgreichen Transaktionen erfasst, wohingegen die Art, der Zeitpunkt und die Dauer der Transaktionen nicht in die Bewertung der IT-Leistung eingehen.

Für viele RZ ist eine derartig vereinfachende Erfassung der IT-Leistung auf höchster Ebene nicht ohne weiteres möglich. Denn in der Praxis variieren die Art, Quantität und Qualität der bereitgestellten IT-Dienste stark. Die von den RZ-Betreibern für die bereitgestellten IT-Dienste individuell zu definierenden Normierungsfaktoren und Nutzenfunktionen lassen i. d. R. keinen RZ-übergreifenden Vergleich der IT-Leistung auf Dienstebene zu. Dazu müssten IT-Dienste branchenweit vereinheitlicht und standardisierte Normierungsfaktoren und Nutzenfunktionen abgestimmt werden. Zudem ist das Messen der Anzahl abgeschlossener IT-Dienste oft nur durch nachträgliche softwaretechnische Instrumentierung der laufenden Applikationen oder mit speziellen Monitoring-Tools möglich. Dies ist in heterogenen RZ mit vielen verschiedenen IT-Diensten sehr aufwändig und nicht praktikabel.

Um trotz der Vielfalt an IT-Diensten eine RZ-übergreifend vergleichbare Bewertung der IT-Leistung mit vertretbarem Aufwand zu ermöglichen, empfiehlt The Green Grid die Messung der in Tabelle 15 aufgeführten Hilfsgrößen:

Tabelle 15: Indikatoren zur Erfassung der IT-Leistung von Rechenzentren

Gruppe	Beschreibung des Proxy (Hilfskenngröße)
Gruppe 1	Formel 11a: Useful Work Self-Assessment and Reporting <hr/> $IT\text{-Leistung} = \sum_{i=1}^n N_i \times W_i$ n : Anzahl instrumentierte Applikationen N_i : Normalisierungsfaktor für instrumentierte Applikation i W_i : Anzahl Einheiten nützlicher Arbeit der instrumentierten Applikation i
	Formel 11b: DCeP Subset by Productivity Link <hr/> $IT\text{-Leistung} = \frac{n_{RZ}}{n_{\text{Subset}}} \sum_{i=1}^n W_i$ n : Anzahl instrumentierte Applikationen n_{RZ} : Anzahl der Server des RZ n_{Subset} : Anzahl der Server der Teilmenge W_i : Anzahl Einheiten nützlicher Arbeit der instrumentierten Applikation i

	<p>Formel 11c: DCeP Subset by Sample Workload</p> <hr/> $\text{IT-Leistung} = \frac{n_{\text{RZ}}}{n_{\text{Subset}}} \times W_{\text{Subset}}$ <p>n_{RZ}: Anzahl der Server des RZ n_{Subset}: Anzahl der Server der Teilmenge W_i: Anzahl der Einheiten nützlicher Arbeit der instrumentierten Applikation</p>
<p>Gruppe 2</p>	<p>Formel 11d: Bits pro Kilowattstunde</p> <hr/> $\text{IT-Leistung} = \sum_{i=1}^k b_i$ <p>k: Anzahl der Router an der Schnittstelle des RZ mit der Außenwelt b_i: Anzahl der ausgehenden Bits des Routers i</p>
<p>Gruppe 3</p>	<p>Formel 11e: Weighted CPU Utilization – SPECINT_RATE</p> <hr/> $\text{IT-Leistung} = T \times \sum_{i=1}^n B_i \times A_{i, \text{avg,CPU}} \times \frac{\text{Takt_CPU}_i}{\text{Takt_B}_i}$ <p>T: Dauer des Untersuchungszeitraums n: Anzahl der Server B_i: Benchmark (SPECint_2006_rate)-Wert des Servers i $A_{i, \text{avg,CPU}}$: Auslastung der CPU des Servers i Takt_CPU_i: nominale Taktfrequenz der CPU des Servers i Takt_B_i: Taktfrequenz der CPU, bei dem B_i ermittelt wurde</p>
	<p>Formel 11f: Weighted CPU Utilization – SPECPOWER</p> <hr/> $\text{IT-Leistung} = T \times \sum_{i=1}^n S_i \times A_{i, \text{avg,CPU}} \times \frac{\text{Takt_CPU}_i}{\text{Takt_S}_i}$ <p>T: Dauer des Untersuchungszeitraums n: Anzahl der Server S_i: SPECPower Ops-Wert bei 100 % Auslastung des Servers i (Ops) $A_{i, \text{avg,CPU}}$: Auslastung der CPU des Servers i (%) Takt_CPU_i: nominale Taktfrequenz der CPU des Servers i (MHz) Takt_S_i: Taktfrequenz der CPU, bei dem S_i ermittelt wurde (MHz)</p>
	<p>Formel 11g: Compute Units per Second Trend Curve</p> <hr/> $\text{IT-Leistung} = T \times \sum_{i=M}^k 7^{\left(\frac{i-2002}{5}\right)} \times n_i \times A_i$ <p>T: Dauer des Untersuchungszeitraums M: Jahr des Kaufs des ältesten Servers</p>

	<p>k: Jahr des Kaufs des neuesten Servers</p> <p>n_i: Anzahl der Server, die im Jahr i gekauft wurden</p> <p>A_i: mittlere Auslastung der Server die im Jahr i gekauft wurden (%)</p>
Gruppe 4	<p>Formel 11h: Operating System Workload Efficiency</p> <hr/> <p>IT-Leistung = n_{BS}</p> <p>n_i: Anzahl Instanzen laufender Betriebssysteme</p>

Eigene nach [Hass et al. 2009].

Die Eignung der in Tabelle 15 aufgeführten Hilfskenngrößen zur vergleichenden Erfassung der IT-Leistung haben Experten in einer Pilotstudie bewertet (vgl. [Monroe et al. 2009]). Die Indikatoren der ersten Gruppe sind den Befragten nach schwer zu implementieren, beinhalten viele subjektive Faktoren und brauchen mehr Richtlinien. Diese Hilfsgrößen sind im Vergleich zu den Indikatoren der anderen Gruppen genauer, aber auch aufwändiger zu messen und zu berechnen. Die erste Gruppe erscheint vor allem für homogene RZ nützlich, in denen nur wenige Applikationen laufen, die ähnliche Funktionen erfüllen. Der Indikator der zweiten Gruppe ist dagegen sehr einfach zu messen. Es braucht aber Richtlinien, wann und wie diese Hilfskenngröße genutzt werden sollte, da sie Netzwerk-zentrisch und somit nicht für jedes RZ gleich gut anwendbar ist. Für die dritte Gruppe spricht, dass die CPU-Auslastung bereits in einigen homogenen RZ mit großen monolithischen Anwendungen als Maß der Produktivität genutzt wird. Die Hilfskenngröße der vierten Gruppe ist wie der Indikator der zweiten Gruppe den Befragten nach einfach zu messen, sollte aber nur in Verbindung mit weiteren Kenngrößen genutzt werden. (vgl. [Monroe et al. 2009])

Im Rahmen vertiefender Untersuchungen wurden von der von *The Green Grid* angeführten *Global Task Force* die Vor- und Nachteile drei ausgewählter Ansätze im Detail bewertet (vgl. [Task Force 2014]). Tabelle 16 fasst die wesentlichen Ergebnisse der Untersuchung zusammen:

Tabelle 16: Vor- und Nachteile ausgewählter Indikatoren für die IT-Leistung

Metrik	Vorteile	Nachteile
Weighted CPU utilization – SPECint_rate [Hass et al. 2009]	<ul style="list-style-type: none"> ▶ korreliert gut mit Arbeit ▶ ist einfach zu verstehen ▶ Nutzung eines standardisierten Benchmarks ermöglicht Vergleich 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ umfasst nicht Speicher und Netzwerk ▶ Datenerhebung schwierig (z. B. CPU-Auslastung) ▶ umfasst nicht alle Servermodelle
Network traffic per kilowatt-hour [Hass et al. 2009]	<ul style="list-style-type: none"> ▶ einfache Datenerhebung und Kennzahlenberechnung ▶ gute Korrelation zu Arbeit des RZ und gute Benutzerfreundlichkeit 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ keine Berücksichtigung der im RZ verrichteten Arbeit ▶ Abhängig vom RZ-Typ kann die Relevanz sehr gering sein (z. B. HPC)
ITEE x ITEU [GITPC 2012]	<ul style="list-style-type: none"> ▶ relativ einfache Berechnung ▶ ganzheitlich (bewertet Server, Speicher, Netzwerke) ▶ Benchmark Daten sind verfügbar 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Kritik in Bezug auf Gewichtungsfaktoren ▶ Bedenken in Hinblick auf die Speicher und Netzwerkproduktivitätskennzahlen ▶ Kennzahl beruht stark auf Datenblätter und weniger auf gemessenen Daten

Eigene nach [Task Force 2014].

Während die ersten beiden Ansätze des *The Green Grid Server-* bzw. *Netzwerk-zentrisch* sind und den Nutzen eines RZ je nach Leistungsschwerpunkt mehr oder weniger gut abbilden, versucht die japanische *Green IT Performance Council (GITPC)* im dritten Ansatz in Tabelle 16 den Nutzen der Server, Datenspeicher und Netzwerkgeräte gleichermaßen zu berücksichtigen (vgl. [GITPC 2012]). Formel 12 verdeutlicht das Prinzip der Berechnung der IT-Leistung nach [GITPC 2012]:

Formel 12: IT-Leistung des Rechenzentrums nach (GITPC 2012)

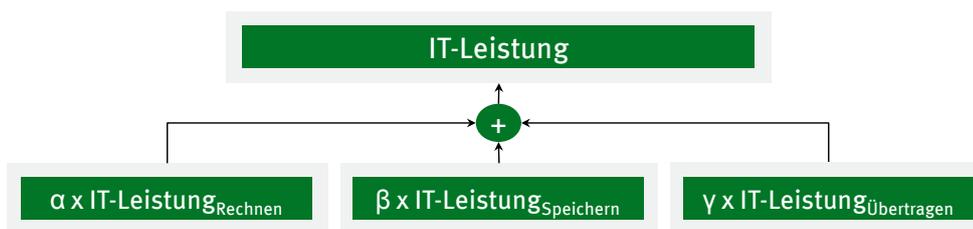
$$\text{IT-Leistung} = \alpha \times \sum_{i=1}^n \text{IT-Leistung}_{\text{Server},i} + \beta \times \sum_{j=1}^m \text{IT-Leistung}_{\text{Speicher},j} + \gamma \times \sum_{k=1}^l \text{IT-Leistung}_{\text{Netzwerk},k}$$

n, m, l: Anzahl der Server, Datenspeicher und Netzwerkgeräte

α , β , γ : Normierungsfaktoren der Teilnutzen der Server, der Datenspeicher und der Netzwerkgeräte

Der Teilnutzen eines jeden IT-Subsystems wird durch Aufsummierung der bei einem definierten Leistungs-Benchmark für jedes Gerät dieses IT-Subsystems erzielten Ergebnisse ermittelt. Der Gesamtnutzen wird als Summe der drei Teilnutzen der IT-Subsysteme Server, Datenspeichersysteme und Netzwerkgeräte unter Zuhilfenahme von Normierungsfaktoren gebildet (siehe Abbildung 15). Da der Ansatz zur Bewertung der Energieeffizienz entwickelt wurde, stellen die Normalisierungsfaktoren das Reziproke der Energieeffizienz ausgewählter Referenzgeräte des Jahres 2005 dar [GITPC 2012].

Abbildung 15: Aggregation der Teilnutzen der IT-Subsysteme



Eigene.

Die Normierungsfaktoren bilden den größten Kritikpunkt des Ansatzes: Die Leistungen der drei IT-Subsysteme Server, Datenspeichersysteme und Netzwerke werden über Referenzsysteme aus dem Jahr 2005 normiert. Der Normierungsfaktor pro IT-Subsystem ist somit statisch. Hierbei wird nicht berücksichtigt, dass sich die Energieeffizienz der IT-Subsysteme im Zeitverlauf aufgrund technologiebedingter Veränderungsrate unterschiedlich entwickeln. Das IT-Subsystem mit der höchsten Veränderungsrate der Energieeffizienz wirkt stärker auf das Gesamtergebnis ein. Je nach spezifischem Leistungsschwerpunkt würden RZ bevor- bzw. benachteiligt. Gleiches gilt für einen Ansatz, die Normalisierungsfaktoren über die Leistungswerte (anstatt über die Effizienzwerte) von Referenzgeräten zu bilden. Auch hier würden unterschiedliche Veränderungsrate der maximalen IT-Leistungen von Servern, Datenspeichern und Netzwerkgeräten zu einer stärkeren bzw. verminderten Berücksichtigung des Nutzens einer Subsystemklasse führen.

Aus diesem Grund wird für die vorliegende Studie auf eine Aggregation der Teilnutzen der Server, Datenspeicher und Netzwerkgeräte zu einem Gesamtnutzen unter Zuhilfenahme von Normalisierungsfaktoren verzichtet. Aber auch die anderen Ansätze in Tabelle 15 fokussieren entweder nur eine der IT-Subsystemklassen oder stellen für sich allein genommen keine belastbaren Leistungsindikatoren dar. Um die IT-Leistung eines RZ ganzheitlich zu bewerten, sollen daher im Rahmen der vorliegenden Studie für die drei generischen Nutzendimensionen Rechen-, Speicher- und Übertragungsleistung jeweils eigene Nutzenindikatoren definiert und die Ressourceneffizienz der IT-Subsysteme Server, Datenspeichersysteme und Netzwerke nach Formel 13 bis Formel 15 jeweils separat ermittelt werden:

Formel 13: Nutzen der Server - Rechenleistung

$$\text{ITRE}_{\text{Server}} = \frac{\text{Rechenleistung}}{\text{Server-Ressourcen}}$$

Formel 14: Nutzen der Datenspeicher - Datenspeicherleistung

$$\text{ITRE}_{\text{Datenspeicher}} = \frac{\text{Datenspeicherleistung}}{\text{Datenspeicher-Ressourcen}}$$

Formel 15: Nutzen des Netzwerks - Datenübertragungsleistung

$$\text{ITRE}_{\text{Netzwerk}} = \frac{\text{Datenübertragungsleistung}}{\text{Netzwerk-Ressourcen}}$$

Im Folgenden werden die in den Praxisstudien untersuchten Nutzenindikatoren für die IT-Subsysteme Server, Datenspeicher und Netzwerke hergeleitet.

3.3.1 Nutzen der Server: Rechenleistung

Diskussion bestehender Ansätze

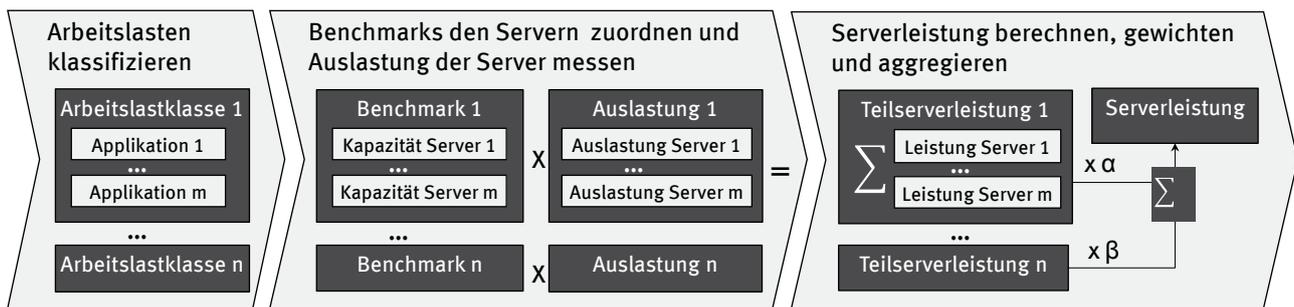
Der durch die Server erbrachte Nutzen bemisst sich nach den von ihnen in einer Messperiode abgeschlossenen Aufgaben. Die Aufgaben variieren in Abhängigkeit von den auf den Servern laufenden Applikationen. Die Vielzahl unterschiedlicher Applikationen verhindert die Definition eines einheitlichen vergleichbaren Leistungsindikators auf Ebene der Applikationen. Vielmehr müssen RZ-Betreiber zur möglichst genauen Erfassung des Nutzens der Server auf Applikationsebene individuelle Leistungsindikatoren für jede Applikation spezifizieren. Dies stellt aufgrund der Komplexität softwaretechnischer Prozesse eine große Herausforderung dar und ist bei vielen Applikationen sehr aufwändig. Selbst wenn sich der Aufwand im Fall einer homogenen Applikationslandschaft in vertretbaren Grenzen bewegt, ist ein auf Applikationsebene ermittelter Leistungswert individuell und nicht mit den Leistungswerten von RZ mit abweichender Applikationslandschaft vergleichbar.

Um die Vergleichbarkeit zu ermöglichen und den Aufwand für RZ-Betreiber zu reduzieren, schlagen [Hass et al. 2009, Hintemann und Ackermann 2015] vor, die von den Servern erbrachte IT-Leistung abstrakt durch standardisierte Benchmarks in Verbindung mit der im Betrieb gemessenen Auslastung der Server zu ermitteln (siehe Formel 11e: Weighted CPU Utilization – SPECINT_RATE und Formel 11f: Weighted CPU Utilization – SPECPower_ssj2008 in Tabelle 15). Mit Benchmarks kann das Leistungsvermögen (Synonym: Kapazität) von Servern in bestimmten Anwendungsbereichen erfasst werden, ohne auf den Servern reale Applikationen installieren und diese im Produktivbetrieb vermessen zu müssen. Wird das bei einem Benchmark erzielte Leistungsvermögen eines Servers mit der im realen Betrieb gemessenen Auslastung des Servers multipliziert, ergibt sich für diesen Server ein abstraktes Maß für die im Betrieb erbrachte IT-Leistung (vgl. [Hass et al. 2009, Hintemann und Ackermann 2015]). Um die durch die Server erbrachte IT-Leistung so zu bestimmen, müssten RZ-Betreiber:

1. entsprechend der Applikationen im RZ repräsentative standardisierte Benchmarks auswählen,
2. für die Server des RZ Benchmark-Werte ermitteln und die Server-Auslastungen im Betrieb messen,
3. die Serverteilleistungen berechnen, normalisieren und zu einem Gesamtnutzen aggregieren.

Abbildung 16 verdeutlicht das Vorgehen bei der Bestimmung der IT-Leistung der Server eines RZ differenziert nach Arbeitslastklassen:

Abbildung 16: Bestimmung der Serverleistung differenziert nach Arbeitslastklassen



Eigene.

Damit dieser Ansatz für die vergleichsorientierte Erfassung der IT-Leistung der Server eines RZ in Frage kommt, müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- ▶ Um den Nutzen der Server richtungssicher zu erfassen, muss jede Arbeitslast(klasse) der Server mit einem standardisierten Benchmark hinreichend genau abbildbar sein.
- ▶ Da Benchmarks nicht auf Servern im Produktivbetrieb durchgeführt werden können, müssen für eine Vielzahl von Modellen und Konfigurationen Benchmark-Testergebnisse frei verfügbar sein.
- ▶ Um mehrere Teilserversleistungen zu einer Gesamtserversleistung aggregieren zu können, müssen transparente und neutrale Normierungsfaktoren spezifiziert werden.
- ▶ Da Server aus mehreren Komponenten wie CPU, RAM, HDD/SSD etc. bestehen, muss eine geeignete Definition für die Serverauslastung getroffen werden.

Standardisierte Benchmarks werden von wissenschaftlichen Einrichtungen, industrienahen Organisationen oder privatwirtschaftlichen Unternehmen herausgegeben. Für den Ansatz der vorliegenden Studie kommen nur Benchmarks in Frage, die das Leistungsvermögen von Servern testen, und nicht solche, mit denen die Kapazität von Gesamtsystemen bestehend aus Servern, Datenspeichern und Netzwerkgeräten ermittelt werden kann. Beispiele für letztere sind die Benchmarks von TPC²⁶, der *SPECvirt_sc2010*-Benchmark²⁷ oder der *VMmark 2.X*-Benchmark²⁸. Zudem muss beachtet werden, dass jede Arbeitslastklasse, die durch einen eigenen Benchmark repräsentiert werden soll, die Genauigkeit, aber auch die Komplexität der Erfassung und der Berechnung steigert. Zudem erfordert eine nach mehreren Arbeitslastklassen differenziert ermittelte Serverleistung den Einsatz von Normierungsfaktoren, um eine Gesamtserversleistung bilden zu können. Da dies immer mit einem Verlust an Transparenz und Neutralität einhergeht, wird in dieser Studie ein Ansatz angestrebt, bei dem das Leistungsvermögen der Server mit nur einem einzigen Benchmark hinreichend genau abgebildet werden kann.

Die zweite Voraussetzung der Anwendbarkeit des Ansatzes ist, dass für den zur Beschreibung des Leistungsvermögens der Server ausgewählten Benchmark Testergebnisse für eine Vielzahl von Modellen und Konfigurationen frei verfügbar sind. SPEC und SAP bieten auf Ihren Webseiten kostenlos zugängliche Datenbanken mit Testergebnissen für Ihre Benchmarks für Server an. Für die folgenden Benchmarks liegt eine Vielzahl von Testergebnissen vor:

- ▶ **SPECpower_ssj2008**²⁹: Der SPECpower_ssj2008-Benchmark besteht aus einer serverseitigen Java-Applikation, wobei eine große Anzahl Nutzer simuliert wird, die in zufälligen Abständen Anfragen an die Applikation stellen. Ausgehend vom initial bestimmten maximalen Durchsatz werden die Server

²⁶ <http://www.tpc.org/>

²⁷ https://www.spec.org/virt_sc2010/

²⁸ <http://www.vmware.com/products/vmmark/>

²⁹ https://www.spec.org/power_ssj2008/

in zehnpromzentiger Abstufung vom Leerlauf bis zur Volllast belastet und jeweils die elektrische Leistungsaufnahmen gemessen, um die Energieeffizienz zu bestimmen. Die Höhe des maximalen Durchsatzes hängt von der Leistungsfähigkeit der CPU, der Caches und des RAM, aber auch von der Implementierung der Java Virtual Machine, der Java-Laufzeitumgebung und dem Betriebssystem ab. Für die vorliegende Studie wird als Leistungsgröße der maximale Durchsatz bei Volllast herangezogen.

► **SPEC CPU 2006**³⁰: Die SPEC CPU 2006 Benchmark Suite beinhaltet verschiedene rechenintensive Arbeitslasten, die primär die Leistungsfähigkeit der CPU und des RAM testen. Die Suite umfasst die SPECint-Benchmarks (12 Einzeltests) und die SPECfp-Benchmarks (17 Einzeltests). Gemessen wird bei jedem Einzeltest, wie schnell ein Server eine Aufgabe bewältigt (Geschwindigkeit) und wie viele Aufgaben der Server in einer gewissen Zeit maximal abschließen kann (Durchsatz). Die Testergebnisse werden über eine Referenzmaschine aus dem Jahr 1997 normiert und aus den Einzelwerten wird jeweils das geometrische Mittel gebildet. Ferner besteht die Möglichkeit durch optimiertes Kompilieren des Quellcodes der Benchmark-Suite die Resultate zu optimieren (peak-Ergebnisse). Für die vorliegende Studie werden die base-Durchsatzwerte der SPECint- und SPECfp-Benchmarks genutzt.

► **SAP Sales and Distribution (SD) Standard Application Benchmark**³¹: Der SAP SD Standard Application Benchmark simuliert ein SAP-gestütztes Lagerverkaufsszenario (Auftragseingang, Auftragsbearbeitung, Auslieferung), wobei die Anzahl der Nutzer bzw. Aufträge solange erhöht wird, bis eine gewisse Antwortzeit überschritten wird. Getestet werden vor allem die Leistungsfähigkeit der CPU und der Speicherhierarchie. Der beim Test maximal erreichte Datendurchsatz wird im SAP Application Performance Standard (SAPS)-Wert ausgewiesen. Für die vorliegende Studie werden die Ergebnisse des Benchmarks für die Zwei-Schichten-Architektur genutzt, bei denen sowohl die SAP-Anwendung als auch die Datenbank auf einem Server betrieben werden.

► **Exkurs SERT**³²: Das SERT-Tool wurde von SPEC im April 2017 in der Version 2.0 herausgegeben und adressiert den Aspekt der Ausführung unterschiedlicher Arbeitslasten (CPU-, RAM- und IO-intensiv), um die Energieeffizienz von Servern ganzheitlich zu bestimmen. Das Tool kann für die vorliegende Studie noch nicht genutzt werden, da noch keine frei verfügbaren Testwerte existieren. Zudem erfüllt das SERT-Tool die Forderung nach standardisierten Testparametern und -prozeduren zur Ermittlung der Leistungswerte im Sinne eines Benchmarks noch nicht. Sollten zukünftig standardisiert ermittelte Testergebnisse öffentlich zugänglich sein, können die mit dem SERT-Tool ermittelten Werte für die Bestimmung des Leistungsvermögens der Server ebenfalls in Betracht gezogen werden.

Tabelle 17: Umfang der Datensätze der Benchmarks für Server

Benchmark	SPECpower	SPECint	SPECfp	SAP SD	CPUMark
Anzahl Datensätze	517	13998	10445	812	450
Anzahl Servermodelle	299	1667	1055	548	-
Anzahl CPU Modelle	116	964	912	164	450

Eigene nach [SPEC 2017a, SPEC 2017b, SAP 2017, Passmark 2017].

Lösungsansatz

Die frei verfügbaren Daten der Benchmarks wurden im Detail analysiert. Deutlich wurde, dass alle Benchmarks CPU-intensive Arbeitslasten darstellen, also vor allem die Rechenleistung der Server charakterisieren. Trotz der Vielzahl an Testfälle (siehe Tabelle 17) deckt kein Datenbestand alle marktverfügbaren Modelle und Konfigurationsmöglichkeiten von Servern ab. Der Grund ist, dass ein Ser-

³⁰ <https://www.spec.org/cpu2006/>

³¹ <https://www.sap.com/solution/benchmark.html>

³² <https://www.spec.org/sert/>

vermodell immer mit in Anzahl und Typ variierenden Einzelkomponenten ausgestattet werden kann. Daher ist es nicht sinnvoll, alle möglichen Permutationen zu testen. Um dennoch den Serverbestand eines jeden RZ in Bezug auf das Rechenleistungsvermögen charakterisieren zu können und so die Anwendbarkeit des Ansatz sicherzustellen, wurde für die vorliegende Studie basierend auf den verfügbaren Benchmark-Daten ein auf dem CPU-Typ und der CPU-Anzahl basierendes Rechenleistungsmodell für Server entwickelt, dessen Entwicklungsschritte nachstehend zusammengefasst werden:

1. Für jeden der oben genannten Benchmarks wurden die für die getesteten Servermodelle ermittelten Leistungswerte über die Anzahl der in dem Server verbauten CPUs normiert. Bspw. wurde das *SPECint_rate*-Ergebnis eines Servers A, der mit vier CPU ausgestattet ist, durch vier geteilt und somit ein CPU-Typ-A-spezifischer *SPECint_rate*-Leistungswert ermittelt (siehe Tabelle 18). Dies wurde für alle verfügbaren Benchmark-Datensätze vollzogen.
2. Ausgehend von der Gesamtmenge der für einen Benchmark verfügbaren Datensätze wurde die relative Streuung der CPU-Typ-spezifischen Leistungswerte untersucht. Das Vorgehen wird an einem Beispiel illustriert (siehe Tabelle 18): Für drei Servermodelle, die alle mit dem Benchmark *SPECint_rate* vermessen wurden und alle mit dem CPU-Typ A ausgestattet waren, wurde der Quartilsdispersionskoeffizient³³ der CPU-Typ-A-spezifischen *SPECint_rate*-Leistungswerte ermittelt:

Tabelle 18: Umfang der Datensätze der Leistungsbenchmarks für Server

	Server A (2 x CPU Typ A)	Server B (1 x CPU Typ A)	Server C (4 x CPU Typ A)	Quartilsdispersions- koeffizient
Server-spezifischer <i>SPECint_rate</i> -Wert	500 Ops / Server	260 Ops / Server	1020 Ops / Server	nicht relevant
CPU-Typ-A-spezifischer <i>SPECint_rate</i> -Wert	250 Ops / CPU Typ A	260 Ops / CPU Typ A	255 Ops / CPU Typ A	2 %

Eigene.

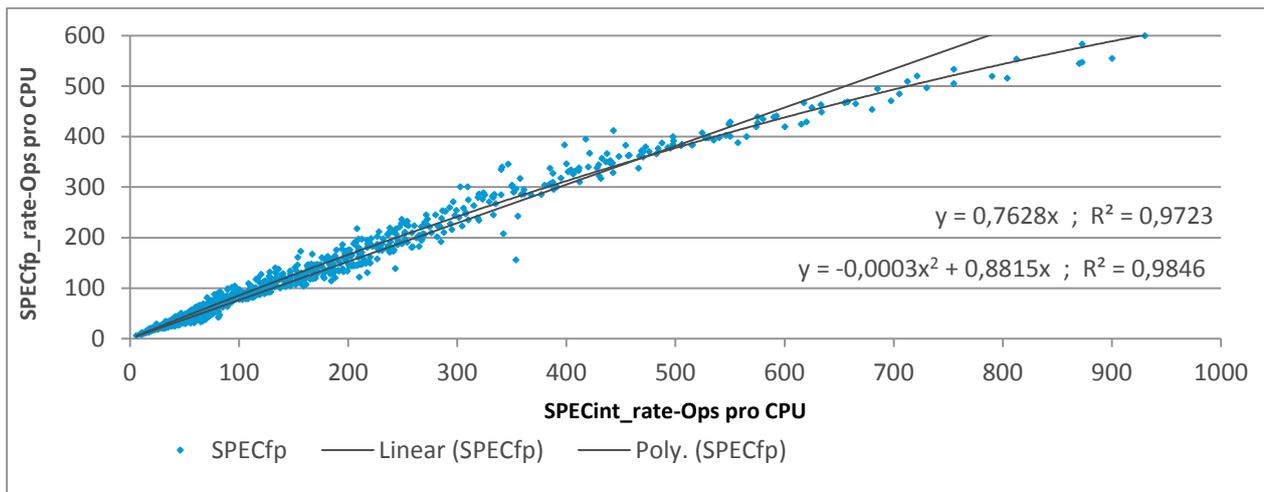
Analog zu diesem Vorgehen wurde pro Benchmark der Quartilsdispersionskoeffizient der CPU-Typ-spezifischen Leistungswerte ermittelt. Die Höhe der Quartilsdispersionskoeffizienten betrug jeweils für mehr als 90 Prozent der CPU-Typen weniger als zehn Prozent. Somit bewegt sich die Abweichung der für einen CPU-Typ bestimmten Leistungswerte vom Durchschnittswert (Median) in vertretbaren Grenzen. Das Rechenleistungsvermögen eines Servermodells kann daher aus den mittleren CPU-Typ-spezifischen Leistungswerten abgeleitet werden. Aus diesem Grund wurde der *CPUMark*-Benchmark in die weiteren Entwicklungsschritte miteinbezogen, da für diesen Benchmark eine frei zugängliche Datenbank mit über 450 getesteten CPU-Modellen für Server existiert.³⁴

3. Im dritten Schritt wurde geprüft, ob die CPU-Typ-spezifischen Leistungswerte für die verschiedenen Benchmarks untereinander korrelieren. Dies wurde geprüft, um aus der Gesamtheit der zur Verfügung stehenden Daten einen in Bezug auf die marktverfügbaren CPUs möglichst vollständigen Datensatz zu modellieren. Zunächst wurde mit einer Regressionsanalyse die Korrelation der mittleren CPU-spezifischen Leistungswerte für den *SPECint_rate*- und den *SPECfp_rate*-Benchmark untersucht, da diese Datensätze die größte Schnittmenge getesteter CPU-Typen aufwiesen. Abbildung 17 zeigt die signifikante Korrelation der CPU-spezifischen Leistungswerte für den *SPECint_rate*- und *SPECfp_rate*-Benchmark:

³³ Der Quartilsdispersionskoeffizient beschreibt die relative Streuung innerhalb einer Stichprobe und wird berechnet aus dem Interquartilsabstand (75 %-Quartil – 25 %-Quartil) geteilt durch den Median.

³⁴ <http://www.cpubenchmark.net/>

Abbildung 17: Korrelation der CPU-spezifischen SPECint_rate- und SPECfp_rate-Leistungswerte



Eigene.

4. Aufgrund der signifikanten Korrelation wurden für die CPU-Modelle, für die ein *SPECfp_rate*-Wert, aber kein *SPECint_rate*-Wert vorlag, die fehlenden Leistungswerte mittels linearer Trendfunktionen approximiert und umgekehrt. Dieses Verfahren wurde iterativ mit den anderen Benchmark-Kombinationen wiederholt, wobei in allen Fällen signifikante Korrelationen nachgewiesen, Trendfunktionen hergeleitet und zur Bestimmung fehlender Leistungswerte verwendet werden konnten. Im Ergebnis konnten *SPECint_rate*-Leistungswerte für mehr als 750 durch ihre Modellnummer eindeutig voneinander unterscheidbare CPU-Typen bestimmt werden. Dies stellt eine hohe Abdeckung des CPU-Marktes und somit eine sehr hohe praktische Anwendbarkeit des Ansatzes sicher.

Mit den CPU-Typ-basierten mittleren *SPECint_rate*-Werten kann die Rechenkapazität der Server über die Anzahl und Art der CPUs bestimmt werden. Die Leistungswerte für 750 CPU-Modelle wurden im EXCEL-basierten KPI4DCE-Tool (siehe Abschnitt 3.5.2) hinterlegt. Die Anzahl und Art der in den Servern verbauten CPUs müssen RZ-Betreiber ihren Beschaffungsunterlagen oder IT-Verwaltungs- und Administrationswerkzeugen wie Configuration Management Databases (CMDB) oder Data Center infrastructure Management (DCIM)-Systemen entnehmen und in das KPI4DCE-Tool einspeisen. Da das Rechenleistungsvermögen der Server über die CPUs bestimmt wird, ist es zur Ermittlung der erbrachten Rechenleistung konsistent, die Serverauslastung im Betrieb über die mittlere CPU-Auslastung zu erfassen. Den Gesamtansatz zur Ermittlung der von den Servern erbrachten Rechenleistung fasst die Formel 16 zusammen:

Formel 16: Definition der Rechenleistung

$$\text{Rechenleistung} = \sum_{i=1}^n S_{i, \text{CPU}} \times A_{i, \text{CPU}}$$

n: Anzahl der CPU des RZ

$S_{i, \text{CPU}}$... Leistungsvermögen des CPU-Typs der CPU i (SPECint_rate-Ops)

$A_{i, \text{CPU}}$... mittlere Auslastung der CPU i (%)

3.3.2 Nutzen der Datenspeicher: Datenspeicherleistung

Diskussion bestehender und möglicher Ansätze

Datenspeichersysteme in RZ bedienen sehr unterschiedliche Anwendungsbereiche, die jeweils charakteristische Zugriffsmuster und Anforderungen an die Zugriffsgeschwindigkeit mit sich bringen. Bei den Zugriffsmustern werden das Lesen und Schreiben und der zufällige und sequentielle Zugriff unterschieden. Tabelle 19 klassifiziert ausgewählte Speicheranwendungen nach dem Zugriffsmuster:

Tabelle 19: Typische Zugriffsmuster unterschiedlicher Speicheranwendungen

Applikation	Zugriffsmuster und Blockgröße
File Copy (Server Message Block, SMB)	zufällig, 50 % Lesen, 50 % Schreiben, Blöcke 64 kB
File Server (SMB)	zufällig, 67 % Lesen, 33 % Schreiben, Blöcke 64 kB
Datenbank (Transaktional)	zufällig, 67 % Lesen, 33 % Schreiben, Blöcke 8 kB
Mail Server	zufällig, 67 % Lesen, 33 % Schreiben, Blöcke 8 kB
Web Server	zufällig, 100 % Lesen, Blöcke 64 kB
Datenbank (Logfile)	sequentiell, 100 % Schreiben, Blöcke 64 kB
Backup	sequentiell, 100 % Lesen, Blöcke 64 kB
Restore	sequentiell, 100 % Schreiben, Blöcke 64 kB
Video Streaming	sequentiell, 100 % Lesen, Blöcke >= 64 kB

[FUJITSU 2010b]

SNIA unterscheidet Datenspeichersysteme zudem nach der Zugriffsgeschwindigkeit (engl.: Maximum Time to first Data, MaxTTFD) in vier Kategorien (siehe Tabelle 20):

Tabelle 20: Datenspeichersystemklassen nach Zugriffsmuster und MaxTTFD

Attribute	Kategorie			
	Online	Near Online	Removable Media Library	Virtual Media Library
Zugriffsmuster	zufällig / sequentiell	zufällig / sequentiell	sequentiell	sequentiell
MaxTTFD	t < 80 ms	t > 80 ms	80 ms < t < 5 min	t < 80 ms

[SNIA 2016]

Für diese Studie werden zur Erfassung der Leistung der Datenspeicherung eines RZ auf HDD- und SSD-basierende Datenspeichersysteme (vorwiegend Online, Near Online) betrachtet. Auf diesen Speichermedien basierende Datenspeichersysteme erlauben einen unmittelbaren (sofortigen) Zugriff auf die gespeicherten (aktiven) Daten. Datenspeichersysteme, die Daten auf Magnetbänder (Tapes) oder optische Medien (Blue-Ray etc.) speichern und ausschließlich für Datensicherungen (engl: Backup) oder die Archivierung unveränderlicher Daten eingesetzt werden, gewähren i. d. R. keinen unmittelbaren Zugriff auf die gespeicherten Daten. Diese Datenspeichersysteme haben einen eher geringen Marktanteil (vgl. [Stobbe et al. 2015]), zudem einen sehr geringen Stromverbrauch in der Nutzungsphase und somit keinen nennenswerten Einfluss auf die Ressourceninanspruchnahme eines RZ. Daher werden diese Datenspeichersysteme in dieser Studie nicht in die Untersuchung mit einbezogen.

Zur Bestimmung der Leistung der Datenspeichersysteme eines RZ ist ein Ansatz wie bei den Servern nicht zielführend. Für in Frage kommende Datenspeichersystem-Benchmarks wie dem *SFS 2008-Benchmark*³⁵ von SPEC und dem *SPC-1-Benchmark*³⁶ von SPC stehen vergleichsweise wenige Tester-

³⁵ <http://www.spec.org/sfs2008/> (letzter Zugriff: 15.07.2017)

gebnisse zur Verfügung. Zudem ist die Variabilität der Konfigurationsmöglichkeiten von Datenspeichersystemen sehr hoch, so dass mit den verfügbaren Daten nicht alle in der Praxis verbreiteten Modelle und Ausstattungsvarianten hinreichend genau abgebildet werden können. Zur Bewertung der Speicherleistung sollten vielmehr die folgenden Indikatoren mittels geeigneter Monitoring-Systeme auf Ebene der Speicher-Controller direkt gemessen werden (vgl. [Fujitsu 2010b, SPC 2013, Blackburn 2012, SNIA 2016]):

- ▶ der Datendurchsatz als die Menge an Daten, die in einem bestimmten Zeitintervall gelesen oder geschrieben wird (Einheit: GB/s)
- ▶ Transaktionsrate als die Anzahl der Lese- und Schreibvorgänge, die in einem bestimmten Zeitintervall bearbeitet wird (Einheit: IO/s)
- ▶ die Antwortzeit (Latenz), die für die Bearbeitung eines Auftrags benötigt wird (Einheit: ms)
- ▶ der belegte Speicherplatz (Einheit: GB oder TB)

Um die Leistung quantitativ zu beschreiben, wird bei Datenspeichersystemen

- ▶ mit sequentiellem Zugriff auf aktive Daten mit großer Blockgröße wie beim Video-Streaming der Datendurchsatz und
- ▶ bei vielen zufälligen Zugriffen auf Daten mit kleinen Blockgrößen wie bei transaktionalen Datenbanken die Anzahl der Lese- und Schreibvorgänge

gemessen [Fujitsu 2010b]. Beachtet werden muss, dass bei konstanten Blockgrößen die Transaktionsrate und der Datendurchsatz nach Formel 17 proportional zueinander sind [Fujitsu 2010b]:

Formel 17: Speicherleistung – Zusammenhang von Datendurchsatz und Transaktionsrate

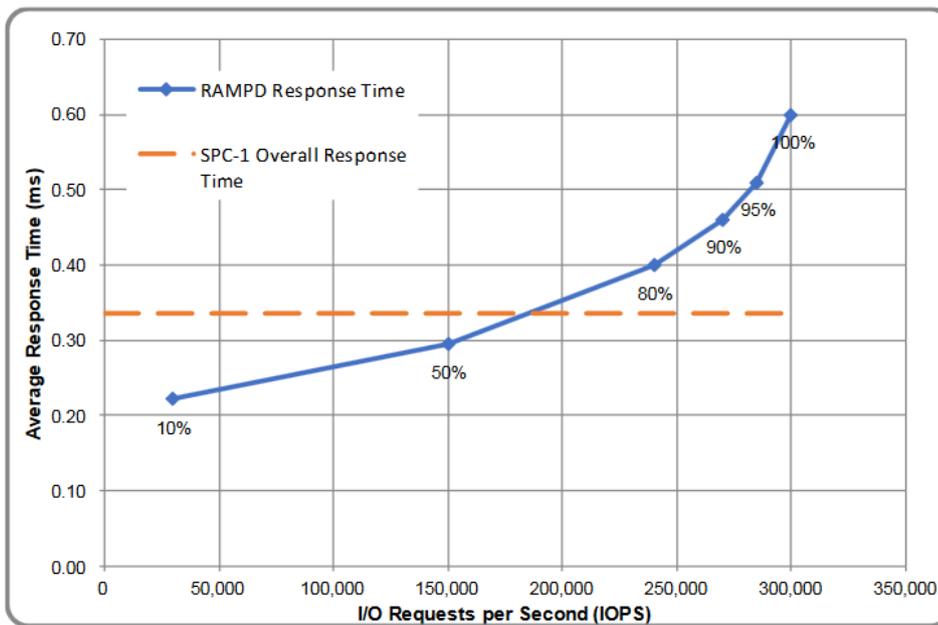
Datendurchsatz = Transaktionsrate × Blockgröße

[Fujitsu 2010b]

Um die Leistung eines Datenspeichersystems zu bewerten, sollten der Durchsatz und die Transaktionsrate idealerweise in Verbindung mit der mittleren Antwortzeit (Latenz) erfasst werden. Die Antwortzeit bestimmt, wie lange z. B. Applikationen auf die Beendigung von Speichervorgängen warten müssen. Eine geringe Latenz weist tendenziell auf eine höhere Leistung eines Datenspeichersystems hin, wobei Datenspeichersysteme bei wenigen Zugriffen i. d. R. eine geringere Latenz als bei vielen Zugriffen aufweisen (siehe Abbildung 18).

³⁶ http://www.storageperformance.org/results/#spc1_overview (letzter Zugriff: 15.07.2017)

Abbildung 18: Zusammenhang zwischen Transaktionsrate und Latenz von Datenspeichersystemen



[SPC 2017]

Indikatoren zur Bewertung der Datenspeicherleistung sollten dieses Verhalten im besten Fall in geeigneter Form abbilden. Ein Ansatz ist den Durchsatz und die Transaktionsrate nach Formel 18 (am Beispiel der Transaktionsrate) z. B. mit dem Kehrwert der Latenz zu gewichten.

Formel 18: Speicherleistung – Mit der Latenz gewichtete Anzahl der Lese- und Schreibvorgänge

$$\text{Speicherleistung}_{\text{Transaktionsrate}} = \sum_{i=1}^n S_{i, \text{Transaktionsrate}} \times \frac{1}{L_i}$$

n: Anzahl der Datenspeichersysteme

$S_{i, \text{Transaktionsrate}}$: mittlere Anzahl der Lese- und Schreibvorgänge des Datenspeichersystems i (IO/s)

L_i : Latenz des Datenspeichersystems i (s)

Aus der Literatur konnte nicht bestimmt werden, ob der Kehrwert der Latenz den Durchsatz und die Transaktionsrate eines Datenspeichersystems im Sinne des Nutzens richtungssicher gewichtet oder ob ein anderer funktionaler Zusammenhang die Leistung der Datenspeichersysteme besser erfasst. Auch bei den Experten des Begleitkreises bestand hierzu Uneinigkeit, insbesondere auch da die Latenz nicht für alle Anwendungsbereiche von Datenspeichersystemen gleichermaßen relevant ist.

Lösungsansatz

Ziel der vorliegenden Studie ist es, die IT-Leistung vor allem mengenmäßig zu erfassen. Daher werden nach Formel 19 und Formel 20 der Durchsatz und die Transaktionsrate zunächst ohne (gewichtende) Berücksichtigung der Latenz als Indikatoren der IT-Leistung der Datenspeichersysteme definiert. Diese zwei Indikatoren können mit entsprechenden Monitoringsystemen direkt von den Controllern der Datenspeichersysteme ausgelesen werden.

Formel 19: Speicherleistung – Anzahl der Lese- und Schreibvorgänge (Transaktionsrate)

$$\text{Speicherleistung}_{\text{Transaktionsrate}} = \sum_{i=1}^n S_{i, \text{Transaktionsrate}}$$

n: Anzahl der Datenspeichersysteme

$S_{i, \text{Lese-/Schreibvorgänge}}$: mittlere Anzahl der Lese- und Schreibvorgänge des Datenspeichersystems i (IO/s)

Formel 20: Speicherleistung – Lese- und Schreibdurchsatz

$$\text{Speicherleistung}_{\text{Datendurchsatz}} = \sum_{i=1}^n S_{i, \text{avg, Datendurchsatz}}$$

n: Anzahl der Datenspeichersysteme

$S_{i, \text{Durchsatz}}$: mittlerer Datendurchsatz (Lesen und Schreiben) des Datenspeichersystems i (GB/s)

Neben dem mittleren Datendurchsatz und der mittleren Anzahl der Lese- und Schreibvorgänge wird der mittlere belegte Speicherplatz als Nutzenindikator der Datenspeichersysteme definiert. Der belegte Speicherplatz ist vom Durchsatz und von der Transaktionsrate der Datenspeichersysteme unabhängig und spiegelt eine eigene Leistungsdimension wider. Der belegte Speicherplatz als Maßeinheit für den Nutzen von Datenspeichersystemen lässt eine Aussage darüber zu, welche Menge an Daten von den Anwendern im RZ abgelegt werden. Je mehr Daten (E-Mails, Videos, Dokumente etc.) in einem RZ gespeichert werden, desto größer ist tendenziell der Nutzen der Datenspeichersysteme in Bezug auf den Speicherplatz. Der im RZ belegte Speicherplatz wird nach Formel 21 erfasst. Ein Ansatz wie bei der CPU, d. h. die installierte Kapazität eines Datenspeichersystems über dessen Speicherplatzauslastung zu normieren, ist nicht notwendig, da der belegte Speicherplatz eines Datenspeichersystems als Indikator der erbrachten IT-Leistung wie auch der mittlere Datendurchsatz und die Transaktionsrate mit eintsprechenden Monitoringsystemen direkt gemessen werden kann.

Formel 21: Datenspeicherleistung – belegter Speicherplatz

$$\text{Speicherleistung}_{\text{Speicherplatz, belegt}} = \sum_{i=1}^n S_{i, \text{Speicherplatz, belegt}}$$

n: Anzahl der Datenspeichersysteme

$S_{i, \text{Speicherplatz, belegt}}$: belegter Speicherplatz des Datenspeichersystems i (GB)

3.3.3 Nutzen der Netzwerke: Datenübertragungsleistung

Diskussion bestehender und möglicher Ansätze

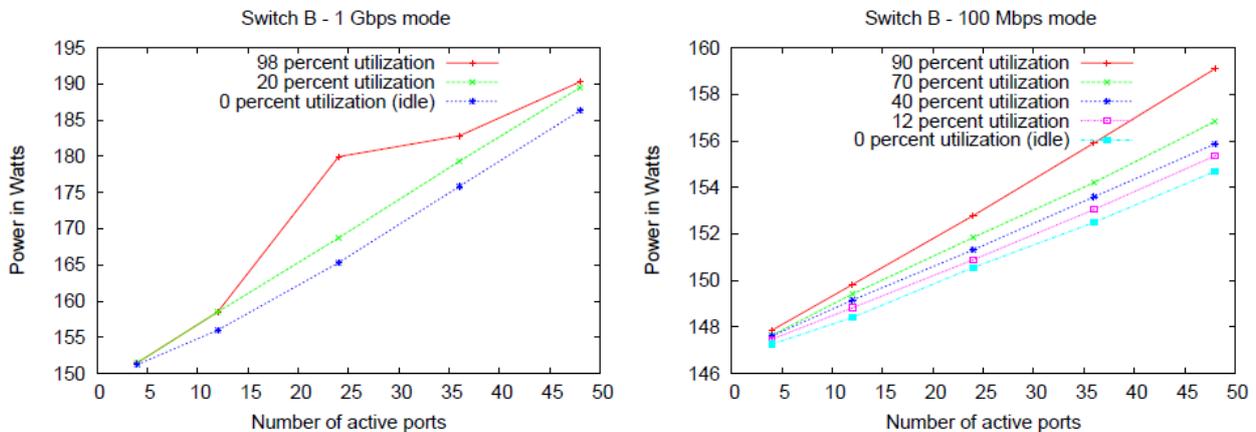
In RZ koexistieren verschiedene Netzwerke (LAN, SAN und WAN), die jeweils eigene Übertragungsprotokolle (Ethernet, Fibre Channel, Fibre Channel over Ethernet, InfiniBand) und Übertragungsmedien (Kupfer, Glasfaser) umfassen. Der Nutzen der verschiedenen Netzwerke besteht in der

- ▶ schnellen (hoher Durchsatz, geringe Latenz),
- ▶ zuverlässigen (Vermeidung von Ausfällen der Leitungen und Vermittlungsknoten) und
- ▶ sicheren (Vermeiden des Abhörens und der Manipulation von Daten)

Übertragung von Daten von einem Quellsystem zu einem Zielsystem. Der Durchsatz und die Latenz spiegeln die Netzwerkleistung quantitativ wider. Eine flächendeckende Messung der Latenz der Netzwerke in Rechenzentren ist sehr aufwändig, da dies auf der Basis der einzelnen Netzwerkverbindun-

gen erfolgen müsste und hiervon in RZ beliebig viele existieren. Trotzdem die Latenz eine zentrale Leistungsgröße der Netzwerke ist, kommt sie für dieses Forschungsvorhaben nicht in Frage.

Abbildung 19: Leistungsaufnahme von Netzwerk-Switches in Abhängigkeit von der Anzahl und der Übertragungsrate der aktivierten Ports



[Mahadevan et al. 2009]

Verbreitet bei Energieeffizienzbewertungen einzelner Netzwerkgeräte und des Netzwerkes ist die Messung des Durchsatzes (vgl. [ECR 2008, ATIS 2009, Hass et al. 2009]). Abbildung 19 zeigt die Leistungsaufnahme eines Netzwerkswitches in Abhängigkeit der konfigurierten Portbandbreite, der Anzahl der aktivierten Ports und der Auslastung der aktivierten Ports. Deutlich wird, wie wichtig in Hinblick auf die Ressourceneffizienz eine möglichst hohe Auslastung (hohe Übertragungsrate) der Geräte ist, da sich der Energieverbrauch der Netzwerk-Switches bei geringer Last nur geringfügig reduziert.

Lösungsansatz

Aus diesem Grund wird für die vorliegende Studie der Durchsatz der Netzwerkgeräte als Indikator für die Leistung des Netzwerkes gemessen. Hierbei können

- ▶ der Datenverkehr eines jeden Netzwerkgerätes / ausgewählter Netzwerkgeräte
- ▶ die Menge der vom RZ gesendeten und empfangenen Daten oder
- ▶ der RZ-interne Datenverkehr

erfasst werden. Da alle vom RZ mit der Außenwelt ausgetauschten Daten i. d. R. auch die internen Netzwerkebenen passieren, wurde entschieden, im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nur den Datenaustausch mit der Außenwelt zu messen. Dabei wurde bewusst in Kauf genommen, dass die mit der Außenwelt ausgetauschte Datenmenge für die Bewertung des Nutzens der Netzwerke nicht für alle RZ gleichermaßen repräsentativ ist. Für RZ, die einen sehr hohen internen Datenaustausch zwischen den Servern und den Datenspeichersystemen haben, ohne viel mit der Außenwelt zu interagieren (wie z. B. bei komplexen Simulationsrechnungen im Anwendungsbereich HPC), wird der Indikator wenig aussagekräftig sein. In derartigen Fällen sollte sowohl der interne, als auch der externe Datenaustausch gemessen werden. Für das Forschungsvorhaben wurde aber zur Begrenzung des Messaufwandes darauf verzichtet, auch weil die untersuchten RZ ihre Anwendungsschwerpunkte nicht im Bereich HPC haben. Die Datenübertragungsleistung der Netzwerke eines RZ wird demnach nach Formel 22 erfasst.

Formel 22: Datenübertragungsleistung – Externer Datenverkehr

$$\text{Datenübertragungsleistung}_{\text{extern}} = \sum_{i=1}^n S_{i, \text{Datenverkehr, extern}}$$

n: Anzahl der Netzwerkgeräte an der Schnittstelle zur Außenwelt (Produktivnetzwerk)

$S_{i, \text{Datenverkehr, extern}}$: RZ-externer Datenverkehr des Netzwerkgerätes i (Gb/s)

3.3.4 Eingabegrößen für die Bewertung der IT-Leistung

Tabelle 21 fasst die von den RZ-Betreibern für die Bewertung der IT-Leistung zu messenden und anzugebenden Parameter zusammen.

Tabelle 21: Eingabegrößen für die Bewertung der IT-Leistung

IT-Subsystem	Bezugsgröße	Eingabegrößen
Server	CPU	Modellbezeichnung
	CPU	Anzahl (-)
	CPU	Auslastung (%)
Datenspeicher	Gerät	Anzahl Lese- und Schreibvorgänge (Transaktionsrate) (IO/s)
	Gerät	Datendurchsatz Lese- und Schreibvorgänge (GB/s)
	Gerät	Speicherplatz belegt (GB)
Netzwerkgerät	Gerät	gesendete / empfangene Bits (extern) (Gb/s)

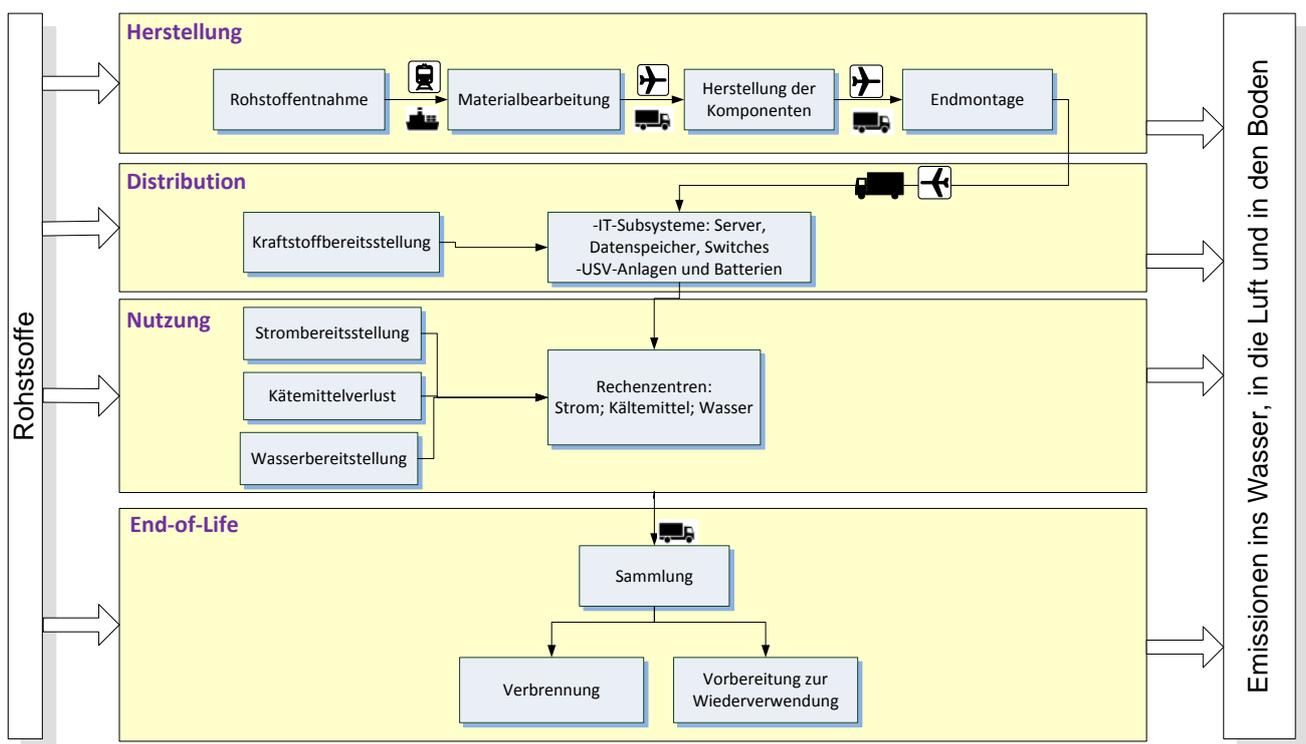
Eigene.

3.4 Ermittlung abiotischer Rohstoffverbrauch und Umweltauswirkungen

3.4.1 Systemgrenze der Ökobilanz

Mit den Systemgrenzen in Abschnitt 1.5 wurde der grobe Untersuchungsrahmen für das Forschungsvorhaben festgelegt. Aus der Festlegung folgt, welche Prozesse des betrachteten Produktsystems in die ökobilanzielle Betrachtung aufgenommen werden und welche nicht. Grundsätzlich ist angestrebt, den gesamten Lebensweg eines RZ von der Rohstoffgewinnung bis zur Entsorgung einzubeziehen und mit entsprechenden Prozessmodulen abzubilden (siehe Abbildung 20). Wichtig ist, dass die ergebnisrelevanten Prozesse berücksichtigt werden bzw. Lücken transparent dargestellt und in der Interpretation entsprechend berücksichtigt werden. In Abbildung 20 ist dargestellt, welche Prozesse entlang des RZ-Lebensweges in dieser Studie berücksichtigt werden.

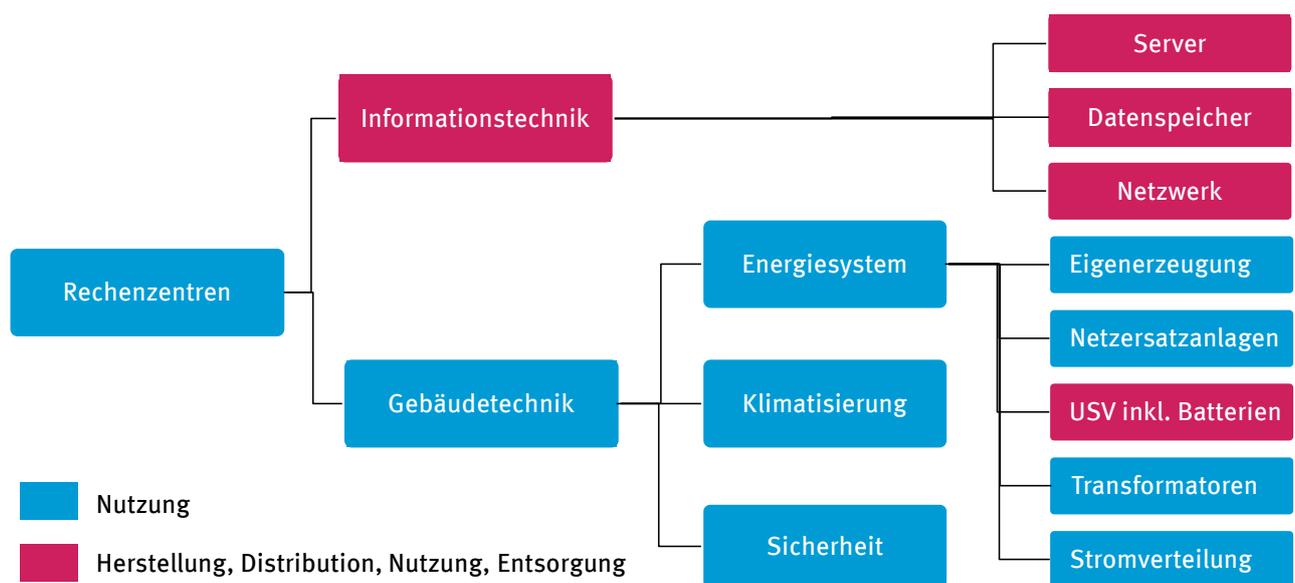
Abbildung 20: Schematische Darstellung der Systemgrenzen



Eigene

Ein RZ umfasst die Räumlichkeiten und alle zur zuverlässigen und dauerhaften Bereitstellung von IT-Leistungen notwendigen Infrastrukturen. Hierzu zählen die Gebäudetechnik (Kühlsystem, Energiesystem, Sonstiges) und die IT-Geräte (Server, Datenspeicher, Netzwerke). Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens werden nicht alle RZ-Komponenten hinsichtlich der Herstellung und Entsorgung betrachtet. In Abbildung 21 wird dargestellt, welche Einschränkungen in Bezug auf die betrachteten RZ-Komponenten vorgenommen werden.

Abbildung 21: Betrachtete RZ-Ausrüstung



Eigene. Die rot markierten Kästchen bedeuten, dass der ganze Lebensweg untersucht wird. Für die blau markierten Kästchen wird dagegen nur die Nutzungsphase betrachtet.

Die Einschränkung auf die wesentlichen Komponenten erfolgt unter Auswertung der Ergebnisse der RZ-Ökobilanz der *London South Bank University* „The life cycle assessment of a UK data centre“ [Whitehead et al. 2015]. [Whitehead et al. 2015] haben ein Tier III³⁷ RZ in Großbritannien mit einer elektrischen Anschlussleistung von 13 Megawatt (MW_{el}) auf der Basis einer Lebenszyklusanalyse des gesamten Systems untersucht. Hinsichtlich der Herstellung wurde nicht nur die Herstellung der IT, sondern auch der Gebäudetechnik wie die Sicherheitsvorkehrungen, die mechanischen Anlagen und das Gebäude selbst betrachtet. Das Gebäude hat eine Lebensdauer von 60 Jahren. Im Betrachtungsraum von 60 Jahren werden die IT-Geräte alle drei Jahre und die Batterien alle zehn Jahre erneuert. Tabelle 22 zeigt die Ergebnisse. Die Nutzungsphase des RZ trägt mit einem Anteil von 92 Prozent zum Schutzgut „Ressourcenverbrauch“ bei. Die Herstellungsphase macht acht bis 26 Prozent aus, je nach betroffenem Schutzgut. Die Entsorgung (engl.: end-of-life) schlägt mit weniger als einem Prozent zu Buche. Innerhalb der Herstellungsphase dominieren die IT-Geräte die Ergebnisse.

Tabelle 22: Ergebnisse einer Ökobilanz für ein Rechenzentrum in Großbritannien

Eco-Indicator 99-Methode (Endpoint-Methode)	Summe	menschliche Gesundheit	Ökosystemqualität	Ressourcenverbrauch
Herstellung	19,8 %	26,0 %	17,7 %	8,0 %
Elektrisch: Beleuchtung, USV, Batterie, Schaltanlage, Verteilung	1,6 %	1,7 %	1,2 %	1,4 %
Äußere Infrastruktur: Kabelkanäle, Kabel, Kanalisation	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
Brandschutz: Brandschutzsystem, Verrohrung	0,1 %	0,1 %	0,0 %	0,1 %
IT: Server, Datenspeicher, Netzwerke	16,9 %	22,8 %	15,7 %	5,3 %
Mechanisch: Kälteanlage, Ventilatoren für freie Kühlung, Befeuchtungsanlage, Druckbelüftungsventilator, Lüfter	1,0 %	1,1 %	0,6 %	0,8 %
PH (public health): Prozesswasserpumpen, Pumpen für Regenwassersammlung	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %
Gebäude: Stahl, Stahlbeton, Aluminium, Wände, Türen, Sand, Isolierung etc.	0,2 %	0,2 %	0,2 %	0,3 %
Nutzung	80,0 %	74,1 %	80,3 %	92,0 %
IT: Server, Speicher, Netzwerke	68,7 %	63,7 %	69,3 %	78,9 %
Elektrisch: Beleuchtung, USV, Schaltanlage, Verteilung	7,0 %	6,4 %	6,7 %	8,1 %
Mechanisch: Kälteanlage, Ventilatoren für freie Kühlung, Befeuchtungsanlage, Druckbelüftungsventilator, Lüfter	4,2 %	3,9 %	4,3 %	4,8 %
PH (public health): Prozesswasserpumpen, Pumpen für Regenwassersammlung	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %

³⁷ Die TIER-Klassifizierung wurde vom Uptime Institut aus den USA für die RZ-Infrastruktur definiert. Es gibt insgesamt vier Stufen, die jeweils Auskunft über die Verfügbarkeit des Rechenzentrums geben. Tier I - 99,67 % Verfügbarkeit = 28,8 h Ausfallzeit p.a.; Tier II - 99,75 % Verfügbarkeit = 22,0 h Ausfallzeit p.a.; Tier III - 99,98 % Verfügbarkeit = 1,6 h Ausfallzeit p.a.; Tier IV - 99,99 % Verfügbarkeit = 0,8 h Ausfallzeit p.a.; <http://www.prorz.de/de/lexikon/tier.html>

Entsorgung	0,1 %	0,1 %	2,0 %	0,1 %
Summe	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %

[Whitehead et al. 2015].

[Whitehead et al. 2015] bestätigen zum einen die in diesem Forschungsvorhaben getroffene Festlegung, dass die Umweltauswirkungen der Herstellung der IT mit betrachtet werden müssen, da sie fast 20 Prozent der gesamten Umweltauswirkung verursachen. Zum anderen kommen [Whitehead et al. 2015] zu dem Ergebnis, dass der Bau und die Entsorgung des Gebäudes eines RZ und die Herstellung der Gebäudetechnik aufgrund der langen Nutzungsdauer nur eine geringe Rolle spielen.

Deshalb gehen die Autoren dieser Studie davon aus, dass in der Produktionsphase (engl.: production stage), Distributionsphase (engl.: distribution stage) und Entsorgungsphase die IT-Geräte Server, Datenspeichersysteme und Netzwerke zu dem überwiegenden Anteil am Ressourcenverbrauch führen. Weiterhin sind die USV-Anlagen durch ihre Verschleißteile (bleihaltige Batterien) relevant. Die Herstellungsphase der anderen Gebäudetechnik, wie Sicherungsanlagen und die HLK-Anlagen und des Gebäudes wurde aufgrund des geringen Einflusses auf das Endergebnis nicht betrachtet.

Die Nutzungsphase (engl.: use stage) von RZ zeichnet sich vor allem durch einen Verbrauch an (elektrischer) Energie aus.

Die in der vorliegenden Studie betrachteten Prozesse sind daher:

- ▶ Herstellung: Server, Datenspeicher und Netzwerkgeräte, USV-Anlagen und Batterien
- ▶ Distribution: Server, Datenspeicher und Netzwerkgeräte, USV-Anlagen und Batterien
- ▶ Nutzungsphase: Energie-, Kältemittel- und Wasserverbrauch des RZ
- ▶ Entsorgung: Server, Datenspeicher und Netzwerkgeräte, USV-Anlagen und Batterien

3.4.2 Betrachtete Umweltaspekte

Im Rahmen der Wirkungsabschätzung dieser Studie werden folgende Wirkungskategorien betrachtet:

3.4.2.1 Abiotischer Rohstoffverbrauch

Die Bewertung des ADP steht im Rahmen dieses Projekts im Vordergrund. In Abschnitt 2.2.3, Tabelle 9 werden die vorhandenen Methoden zusammenfassend dargestellt. Unter Abwägung der Vor- und Nachteile der verschiedenen Methoden wurde die ILCD-Methode (Version 1.0.10, August 2016) (siehe Tabelle 8) für die Berechnung des ADP ausgewählt. Dies beinhaltet die 43 Rohstoffe der CML-Methode, 16 Seltene Erden und weitere 19 Rohstoffe der ILCD-Methode, die fossile Energieträger beinhalten.

Die Auswertung der Ressourcen ist ein eingabebezogener Indikator. Der Indikator gibt keinen Hinweis auf die mit der Rohstoffentnahme verbundenen Umweltauswirkungen (z. B. Toxizität bei der Rohstoffgewinnung). Die ausgabebezogenen Umweltauswirkungen aus der Rohstoffentnahme werden in Kontext der Ökobilanz durch andere Indikatoren erfasst (z. B. Humantoxizität, Ökotoxizität, Treibhauseffekt, Versauerungspotenzial etc.).

Außerdem adressiert die hier verwendete Methode nur die geologische Verfügbarkeit, was seit Jahren üblicherweise in Ökobilanzen gemacht wird. Die neue Methode zur Bewertung der Kritikalität der Rohstoffe, der anthropogenen Verfügbarkeit und der sozio-ökonomischen Verfügbarkeit der Ressourcen, ist bei der Ökobilanzierung zurzeit noch nicht üblich und hat auch nur eine begrenzte Anzahl an Charakterisierungsfaktoren. Dies kann sich aber in Zukunft ändern.

3.4.2.2 Kumulierter Energieaufwand

Der KEA stellt den gesamten Verbrauch an energetischen Ressourcen dar, der alle nicht-erneuerbaren (fossil und nuklear) und erneuerbaren (Sonne, Wind, Wasserkraft und Biomasse) Energieverbräuche als Primärenergiewerte ausweist.

[Giegrich et al. 2012] hat die Korrelation des KEA mit verschiedenen anderen Indikatoren untersucht. Demnach besteht zwischen dem KEA und dem THG mit 89 Prozent die beste Korrelation. Außerdem weisen der KEA und die anderen Indikatoren mit Senkenfunktionen mit 77 Prozent bzw. 79 Prozent eine ausgeprägte Korrelation auf. Wesentlich geringer ist die Korrelation von Wasser und der Fläche mit dem KEA.

3.4.2.3 Treibhausgaspotenzial

Unter dem Treibhauseffekt wird die klimarelevante Veränderung der Atmosphäre durch den anthropogenen Beitrag von Treibhausgasemissionen verstanden, die zu einer Erwärmung der Erde führt. Zur Erfassung des THG werden die in der Sachbilanz erfassten Treibhausgase mit so genannten Charakterisierungsfaktoren³⁸ multipliziert, die ihre Klimarelevanz in Relation zu CO₂ mit dem Charakterisierungsfaktor abbilden, und die einzelnen Beiträge addiert. Auf diese Weise wird das THG in Form von CO₂-eq. errechnet. Für die Berechnung des THG liegt IPCC 2013 [Myhre et al. 2013] als methodische Grundlage vor.

3.4.2.4 Wasserverbrauch

Diese Kategorie berechnet die Inanspruchnahme der Ressource Wasser. Das Berechnungsmodell basiert auf *Swiss Ecoscarcity* [Frischknecht et al. 2009; ILCD Handbuch 2012]. Die Bewertung des Wasserverbrauchs erfolgt mit der ILCD-Methode (v1.0.10, August 2016). Der hierbei verwendete Indikator beschreibt nur die Auswirkung auf die Verfügbarkeit des Wassers und nicht die Verschmutzung von Gewässern, welche durch andere Wirkungskategorien wie das Eutrophierungspotenzial oder das Versauerungspotenzial berücksichtigt werden.

3.4.2.5 Für die Modellierung verwendete Software

Die Erstellung der Ökobilanz erfolgt mit der Software OpenLCA (v. 1.6.3), 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.

3.4.3 Bezugsgröße der Bilanz

Als Bezugsgröße der Bilanz ist die Nutzung eines RZ über den Zeitraum eines Jahres definiert. Das bedeutet, die Ergebnisse zu den Umweltwirkungen werden auf ein einzelnes Nutzungsjahr bezogen. Der Aufwand eines Gerätes für die Herstellung, Distribution und Entsorgung wird auf die Jahre der Nutzungsdauer aufgeteilt.

Für die Nutzungsdauer der untersuchten IT-Geräte werden als Vorgabewerte deren geplante technische Lebensdauern angenommen (siehe Tabelle 91 im Anhang). Die tatsächliche Nutzungsdauer der IT-Geräte hat einen Einfluss auf deren Ressourceneffizienz. Um dies zu berücksichtigen, wird im KPI4DCE-Tool das Datum der Inbetriebnahme abgefragt. Anhand des Bilanzierungsdatums wird eine effektive Nutzungsdauer der IT-Geräte berechnet. Liegt die effektive Nutzungsdauer höher als der Vorgabewert (die geplante technische Lebensdauer) so wird der Ressourcenaufwand auf den längeren Zeitraum (nämlich die effektive Nutzungsdauer) bezogen und senkt damit den spezifischen Ressour-

³⁸ Ein Charakterisierungsfaktor ist ein Faktor, der aus einem Charakterisierungsmodell abgeleitet wird, das für die Umwandlung der zugeordneten Sachbilanzergebnisse in die gemeinsame Einheit des Wirkungsindikators angewendet wird [DIN EN ISO 14044]

cenaufwand. Liegt die effektive Nutzungsdauer dagegen niedriger als die geplante Lebensdauer, so wird der Ressourcenaufwand anteilig auf die geplante Nutzungsdauer verteilt. Je länger die Geräte genutzt werden, desto geringer ist der Herstellungsaufwand pro Jahr. Das entsprechende Rechenmodell berücksichtigt die langjährige Nutzung von IT-Geräten dadurch positiv.

3.4.4 Modellierung der Herstellungsphase

Die vom UBA geförderten Forschungsvorhaben (UFOPLAN 2009 FKZ 3709 95 308 und UFOPLAN FKZ 3712 95 301) haben die spezifischen Datensätze für die Komponenten (CPU, Speicherchips, unbestückte Leiterplatte und HDDs) für die *Prozessorientierte Datenbank für Basisdaten (ProBas)*³⁹ des UBAs erstellt [Prakash et al. 2013; Prakash et al. 2016]. Im Ergebnis der Studie wurde festgestellt, dass der große Anteil an der Gesamtumweltbelastung von Computern und Notebooks die elektronischen Komponenten ICs und Leiterplatte sind [Prakash et al. 2016; Stutz et al. 2012; Weber 2012]. Aus Ressourcengesichtspunkten sind zudem HDD interessant, die hochwertige Edel- und Sondermetalle mit hohem Materialwert enthalten. Die Ergebnisse der Datensätze wurden in den Begleitkreisen unter Berücksichtigung des bestehenden Expertenwissens sowohl zu technischen als auch umweltbezogenen Aspekten diskutiert. Die Datensätze besitzen somit eine gute Qualität und werden daher in der Modellierung verwendet. Die Datengrundlage für die Modellierung der Herstellung ist in den entsprechenden Abschnitten 3.4.4.1 (Prozessor); 3.4.4.2 (Speicherchips); 3.4.4.3 (unbestückte Leiterplatte) und 3.4.4.4 (HDD) dokumentiert. Derzeit verfügen die ecoinvent⁴⁰ und die ProBas-Datenbank über keinen belastbaren Datensatz für die Herstellung einer SSD. Daher wird die Herstellung von SSDs auf Basis der Literatur und eigener Annahmen modelliert. Die erforderlichen Daten sind im Abschnitt 3.4.4.5 dokumentiert.

3.4.4.1 Auf Komponentenebene: Prozessoren

Die diesem Forschungsvorhaben zugrunde liegenden Datensätze für die Herstellung der CPU stammen aus [Prakash et al. 2016]. Die Herstellung der CPU ist differenziert nach Front-End-Prozessen und Back-End-Prozessen. Als Front-End-Prozess wird die Strukturierung, Beschichtung und Dotierung von Silizium-Wafer verstanden, bei der die eigentlichen Halbleiterstrukturen gefertigt werden. Dieser Fertigungsschritt muss unter sehr aufwändigen Reinraumbedingungen erfolgen, da geringste Verunreinigungen die Halbleiterstruktur zerstören können. Im weniger aufwändigen Backend-Prozess werden die strukturierten Silizium-Wafer zersägt, mit Anschlussdrähten versehen und zu integrierten Schaltkreisen zusammengefügt. Tabelle 81 und Tabelle 82 im Anhang zeigen die in der Modellierung verwendeten Eingabe- und Ausgabedaten aus [Prakash et al. 2016]. Die in [Prakash et al. 2016] ermittelten Emissionen ins Wasser und in den Boden aus den Front-End-Prozessen sind für dieses Forschungsvorhaben nicht relevant.⁴¹ Somit sind sie nicht in Tabelle 81 dargestellt. Darüber hinaus basiert die Modellierung für die Herstellung des Silizium-Wafers (Vorkette für die Herstellung einer CPU) auf einem anderen ProBas-Datensatz aus [Prakash et al. 2012].

Das weltweit führende Unternehmen für Mikroprozessoren ist Intel mit einem Marktanteil von ca. 80 Prozent, gefolgt von AMD mit ca. zehn Prozent [iSuppli 2016]. Im Jahre 2014 wurden 70 Prozent der Intel-Prozessoren in den USA (Arizona, New Mexico, Oregon und Massachusetts) produziert. Die restlichen 30 Prozent kamen aus China und Israel. Die Prozesse für die Montage und den Test finden in Malaysia, China und Vietnam statt [Intel 2015]. Daten zur Produktionsverteilung nach Ländern sind nicht vorhanden. In diesem Forschungsvorhaben wird für die Modellierung daher die Annahme getrof-

³⁹ ProBas ist eine öffentlich verfügbare Datenbank des UBA, die kostenlos Sachbilanzdaten zu Energie, Materialien, Produkte, Transporte und Prozesse zur Verfügung stellt: www.probas.umweltbundesamt.de

⁴⁰ Die ecoinvent ist eine vom schweizerischen ecoinvent-Zentrum zur Verfügung gestellte Datenbank, die kostenpflichtig Sachbilanzdaten zu Energie, Materialien, Produkte, Transporte und Prozesse anbietet.

⁴¹ Die betrachteten Umweltkategorien sind ADP, KEA, THG und Wasserverbrauch.

fen, dass für den Frontend-Prozess der amerikanische Strommix und für den Backend-Prozess der chinesische Strommix bilanziert werden.

Als Bezugsgröße des Datensatzes wird ein Quadratmeter der „Die“-Fläche⁴² für die CPU-Herstellung definiert. Allerdings ist die „Die“-Fläche der CPUs für RZ-Betreiber ein unbekannter Parameter. Die Parameter, die für RZ-Betreiber bekannt sind, sind die Anzahl der CPUs, die Anzahl der Kerne pro CPU, der Modellname und die Taktrate (Megahertz, MHz). Hier muss eine Relation zwischen „Die“-Fläche und den dem RZ-Betreiber bekannten Parametern abgebildet werden. Aber die „Die“-Fläche der CPUs ist von mehreren Parametern wie z. B. der Technologiegeneration⁴³, der Anzahl der Kerne und der Cachegröße abhängig und die Parameter beeinflussen sich zudem gegenseitig. Ein einfacher Zusammenhang zwischen der „Die“-Fläche und den technischen Parametern ist nicht gegeben.

Intel trägt zur Transparenz bei, indem das Unternehmen die „Die“-Fläche der CPU auf ihrer Website zum großen Teil veröffentlicht. Somit können die „Die“-Flächen durch Modellnamen der CPU zugeordnet werden. Tabelle 77 im Anhang listet die Intel CPU der Produktfamilien auf, die in Servern verwendet werden (Stand: Mai 2016). Jede Produktfamilie umfasst mehrere Modelle, die die verschiedenen technischen Parameter und Technologiegeneration repräsentieren. Insgesamt sind mehr als 500 Intel-CPU-Typen mit wesentlichen technischen Parametern („Die“-Fläche, Strukturbreiten, Codename, Modellnummer, Einführungsdatum, Pufferspeichergröße (Cache), Anzahl der Kerne, etc.) aufgelistet. Die Daten sind sehr umfangreich, daher wurde Abstand davon genommen, die Daten im Anhang dieses Berichtes aufzuführen. Sie sind im KPI4DCE-Tool als Hintergrunddatenbank dargestellt.

Anzumerken ist, dass die „Die“-Flächen mit einer Strukturbreite⁴⁴ (engl.: technology node) ab 32 Nanometern nicht in der Spezifikation der Produkte auf der Intel-Website zu finden sind. Die fehlenden Daten der „Die“-Fläche wurden durch eigene Annahmen oder durch andere Quellen ergänzt.

Bezüglich der AMD-Modelle der Serverprozessoren (siehe Tabelle 78 im Anhang) ist die im Internet abrufbare Information über die „Die“-Fläche sehr begrenzt. Hier wurde mithilfe eines konservativen Ansatzes die „Die“-Fläche der AMD-CPU's anhand der Technologiegenerationen der AMD-CPU's eines anderen Modells oder der Intel-CPU's vereinfacht abgeleitet. Tabelle 79 und Tabelle 80 im Anhang fassen die „Die“-Fläche der Intel- und AMD-Prozessoren jeweils nach technischen Parametern zusammen.

Der Transport der Chips umfasst folgende Abschnitte:

- ▶ von der Silizium-Wafer-Herstellung zum Front-End-Prozess
- ▶ vom Front-End- zum Back-End-Prozess
- ▶ vom Back-End-Prozess zur Endmontage

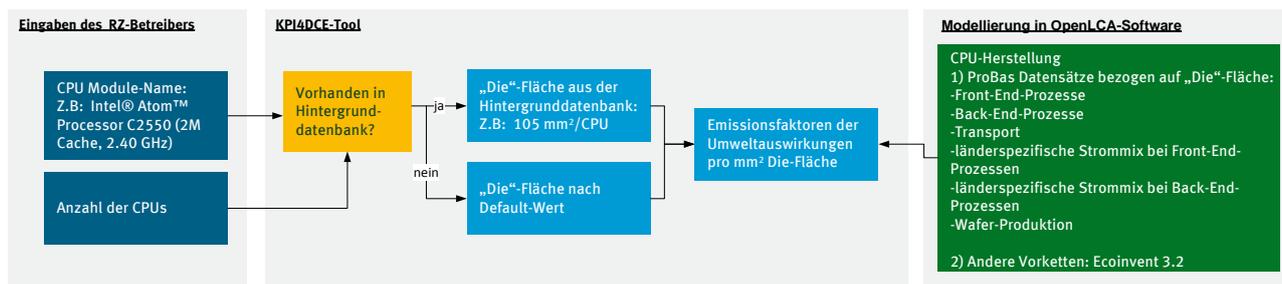
Für die Modellierung wird nach [Prakash et al. 2012] angenommen, dass der Transport per Flugzeug 6.250 km umfasst (Durchschnittswert Asien–Asien: ca. 2.500 km und USA–Asien: ca. 10.000 km).

⁴² Vor der Verkapselung werden Chips im Englischen als „Die“ bezeichnet. Man kann sie auch als unverkapselte oder „nackte“ Chips bezeichnen. Es gibt keine deutsche Übersetzung des Wortes „Die“.

⁴³ Die Technologiegeneration ist ebenfalls ein technischer Parameter wie die „Die“-Fläche. Dieser Parameter ist für RZ-Betreiber ohne eigenes Recherchieren unbekannt.

⁴⁴ Charakterisiert den Entwicklungsstand der Halbleitertechnologie und beschreibt die minimal fertigen Strukturen im Nanometer Bereich. Mit abnehmender Strukturbreite werden somit ICs mit immer mehr Transistoren und immer höheren Schaltfrequenzen möglich [Nissen 2001]. Gleichzeitig sinken die Betriebstemperatur und der Energieverbrauch pro Transistor.

Abbildung 22: Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools: Herstellung der CPUs



Eigene.

Abbildung 22 illustriert den Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools. In der Anwendung des KPI4DCE-Tools wählen die RZ-Betreiber aus einer Dropdown-Liste (darin enthalten sind Intel- und AMD-CPU-Typen) die entsprechenden CPU anhand der Modellnamen aus und geben in einem weiteren Eingabefeld die Anzahl der CPU ein. Durch die Angabe des Modellnamens wird im KPI4DCE-Tool mittels der Hintergrunddaten automatisch eine entsprechende „Die“-Fläche ausgewählt und zugeordnet.

Die „Die“-Fläche ist die Bezugsgröße für die Berechnung der Umweltauswirkungen. D. h. die „Die“-Fläche ist verknüpft mit den Wirkungsfaktoren pro Quadratmeter „Die“-Fläche. Für den Fall, dass ein CPU-Typ nicht in der Dropdown-Liste vorhanden ist, kann über Vorgabewerte die „Die“-Fläche ermittelt werden (siehe Tabelle 23). Die Vorgabewerte der „Die“-Flächen basieren auf eigenen Annahmen. Die CPU wurden allgemein nach der Anzahl der CPU-Kerne in drei Gruppen klassifiziert und differenziert. Anhand eines konservativen Ansatzes (basierend auf den Intel-CPU mit den größten „Die“-Flächen) wurden die „Die“-Flächen den jeweiligen Gruppen zugeordnet.

Tabelle 23: Vorgabewerte für die „Die“-Fläche der CPU nach Anzahl der Kerne

Vorgabewerte	„Die“-Fläche in mm ²	Annahme basiert auf
Anzahl der Kerne (8-10)	596	Intel, Montecito
Anzahl der Kerne (<8)	513	Intel, Westmere EX
Anzahl der Kerne (>10)	662	Intel, Haswell

Eigene.

3.4.4.2 Auf Komponentenebene: Integrierte Schaltkreise

Die Eingabe- und Ausgabedaten für die Herstellung von Integrierten Schaltkreisen (engl.: integrated circuits, ICs) stammen aus einem Forschungsprojekt des UBAs [Prakash et al. 2013] und liegen diesem Forschungsvorhaben zugrunde. Die Herstellung der Speicherchips ist differenziert nach Front-End-Prozessen und Back-End-Prozessen.

Ein Samsung-Speicherchip wurde als Referenz für die Modellierung von [Prakash et al. 2013] herangezogen. Der Samsung-Speicherchip ist ein Ein-Gigabyte (GB) Double Data Rate 3 (DDR3) Dynamic Random Access Memory (DRAM) Arbeitsspeicher mit Fine Pitch Ball Grid Array (FBGA) Packaging-Typ (Tabelle 24). DRAM-Chips werden gewöhnlich in Reihe auf einem sogenannten Speicherriegel zu größeren Arbeitsspeicher-Modulen verschaltet.

Tabelle 24: Spezifikation der Speicherchips

Name	Spezifikation
Produkt-Typ	DRAM DDR3

Part Nummer	Samsung K4B1G0846E-HCH9
Packaging-Typ	78FBGA (Fine Pitch Ball Grid Array)
Speicher	1 GB
"Die"-Fläche (Chip ohne Verkapselung)	43 mm ²
Gewicht	0,162 g

[Prakash et al. 2013].

Tabelle 83 und Tabelle 84 im Anhang zeigen die Eingabe- und Ausgabedaten für die Front-End-Prozesse und Back-End-Prozesse. Die Bezugsgröße für die Front-End-Prozesse ist die „Die“-Fläche der Speicherchips und die Bezugsgröße für die Back-End-Prozesse ist ein einzelner Chip.

Der Stromverbrauch für die Herstellung des Silizium-Wafers (Vorkette für die Herstellung eines Speicherchips) wurde entsprechend [Prakash et al. 2012] modelliert. Die durchschnittlichen Strommische in Anlehnung an die weltweite Produktionsverteilung der Front-End-Prozesse und der Back-End-Prozesse wurden in [Prakash et al. 2012] ermittelt, so dass die länderspezifischen Strommische in der entsprechenden Modellierung berücksichtigt wurden. Die Produktionsverteilung der Front-End-Prozesse und der Back-End-Prozesse nach Ländern ist in Tabelle 85 und Tabelle 86 aufgelistet.

Die Modellierung der ICs auf der Hauptplatine teilt sich in RAM-Module und sonstige ICs auf. RAM-Module wurden in [Bio by Deloitte 2015] separat betrachtet (siehe Tabelle 29), weshalb die RAM-Module in diesem Forschungsvorhaben ebenfalls separat erfasst werden. Die Anzahl der Speicherchips auf einem Speicherriegel (RAM-Modul) ist unterschiedlich. Die RZ-Betreiber können die Anzahl der RAM-Module erfassen. Allerdings ist die Erfassung der Anzahl der Speicherchips, die auf den RAM-Modulen enthalten sind, sehr aufwendig. Hier wurde vereinfacht angenommen, dass ein RAM-Modul mit neun Speicherchips ausgestattet ist. Im Gegensatz zu den RAM-Modulen für Desktop-Computer gibt es bei RAM-Modulen für Server i. d. R. noch einen zusätzlichen Speicherchip als Paritätsbit⁴⁵. Deshalb muss eine weitere Leiterplatte und der Aufwand für die Bestückung der Leiterplatte in der Modellierung berücksichtigt werden.

Für die Einschätzung der Fläche der Leiterplatte liegt der Referenzwert aus [Peiró und Ardenete 2015] zugrunde. Sie beträgt 30 cm² (0,003 m²) für einen Rack Server mit zwei HE. Der Bestückungsaufwand wird durch den ecoinvent-Datensatz v3.2 „mounting, surface mount technology, Pb-containing solder“ bezogen auf die Fläche der Leiterplatte abgebildet. Der Datensatz mit den bleihaltigen Loten wurde ausgewählt, da Blei in Loten für Server, Datenspeichersystemen sowie Netzinfrastrukturausrüstungen eine Ausnahme der RoHS-Direktive ist (Ausnahme 7b in Anhang III der RoHS).

Der andere Bereich der Integrierten Schaltkreise umfasst die sonstigen ICs auf der Hauptplatine, die verschiedene Aufgaben übernehmen (z. B. Schnittstellenbausteine, Controller). Eine genaue Differenzierung wird im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht vorgenommen, so dass sie pauschal betrachtet wurden. In der Bilanz wird für die sonstigen ICs eine „Die“-Fläche von 889 mm² pro Leiterplatte angenommen. Diese Daten basieren auf der Komponentenliste von [Teehan und Kandlikar 2013], in der ein Rack Server des Herstellers Dell untersucht wurde.

Der Transport der Chips umfasst folgende Abschnitte:

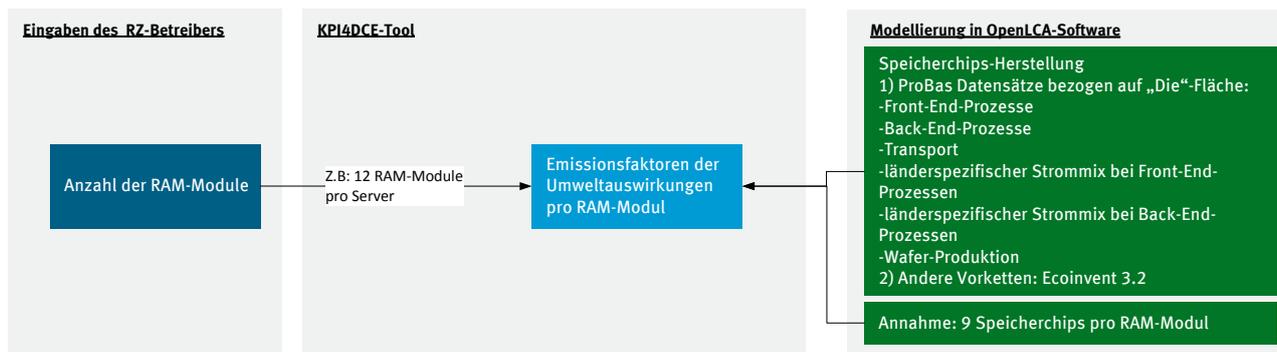
- ▶ von der Silizium-Wafer-Herstellung zum Front-End-Prozess,
- ▶ vom Front-End- zum Back-End-Prozess,
- ▶ vom Back-End-Prozess zur Endmontage.

⁴⁵ Das Paritätsbit (engl.: parity bit) dient als Paritätskontrolle für Übertragungsfehler oder Speicherdefekte.

Für die Modellierung wird nach [Prakash et al. 2012] angenommen, dass der Transport per Flugzeug 6.250 km umfasst (Durchschnittswert Asien–Asien: ca. 2.500 km und USA–Asien: ca. 10.000 km).

Abbildung 23 illustriert den Berechnungsablauf des im Rahmen dieses Forschungsvorhabens erstellten KPI4DCE-Tools. Im KPI4DCE-Tool geben die RZ-Betreiber die Anzahl der RAM-Module an. Die Anzahl der RAM-Module wird mit den Wirkungsfaktoren der Umweltauswirkungen pro RAM-Modul verknüpft und die Umweltauswirkungen werden automatisch berechnet.

Abbildung 23: Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools: Herstellung der Speicherchips



Eigene.

3.4.4.3 Auf Komponentenebene: Unbestückte Leiterplatte

Der Datensatz für die Herstellung der unbestückten Leiterplatte stammt aus einem ProBas-Datensatz [Prakash et al. 2016]. Tabelle 25 dokumentiert den zeitlichen, geografischen und technischen Bezug des Datensatzes, der einer FR4-Multilayer-Leiterplatte mit sechs Lagen entspricht. Die Eingabe- und Ausgabedaten sind in Tabelle 87 im Anhang dargestellt. Der Datensatz stellt ausschließlich direkte Prozesse dar. Die erforderlichen Vorketten wurden durch ecoinvent-Datensätze v3.2 modelliert. Einige Chemikalien wurden zur Vereinfachung und aufgrund der mangelnden Datensätze als allgemeine organische oder anorganische Chemikalien zusammengefasst und entsprechend modelliert.

Tabelle 25: Repräsentativität des Leiterplatten-Datensatzes

Datensatz in ProBas	Zeitlicher Bezug	Geografischer Bezug	Technologischer Bezug
Herstellung Leiterplatte	2012-2013	Europa	Lagenzahl: 6
			Substrat: FR4
			Oberflächenbeschichtung: Ni-Au
			Abmessungen: Europakarte-Standardmaß 0,016 m ²
			Produktionsjahr: 2012
			Systemgrenzen: Produktion und Abwasseraufbereitung

[Prakash et al. 2016].

Die Bezugsgröße des Datensatzes ist ein Quadratmeter unbestückte FR4-Leiterplatte mit sechs Lagen und einem Ni-Au-Oberflächenfinish. Dabei beziehen sich alle Flüsse des Referenzprodukts auf die Bezugsgröße ein Quadratmeter. Allerdings ist die Flächenangabe der Leiterplatte für RZ-Betreiber i. d. R. unbekannt. Eine belastbare Einschätzung der Fläche der Leiterplatte auf der Grundlage von technischen Parametern eines Servers (z. B. elektrische Anschlusswerte; Abmessungen; Konfiguration; etc.) kann nicht ermittelt werden. Aus diesem Grund wurde vereinfachend angenommen, dass die Fläche

der Leiterplatte eines Rack Servers über die HE und die Fläche der Leiterplatte eines Blade Systems über die Anzahl der Blade Server Module skaliert werden kann.

Die Flächen der Leiterplatten eines Rack Servers und eines Blade Server Moduls werden jeweils mit 0,10 m² angenommen. Dies entspricht der Standardbauform „Enterprise Electronics Bay“ (EEB) wie sie der Industrieverband *Server System Infrastructure* (SSI) Forum definiert (siehe Tabelle 26). Das SSI-Forum definiert und spezifiziert die Standardformfaktoren für Motherboards der Server. Ein SSI EEB Motherboard hat die Maße 305 × 330 mm. Zum Vergleich: die Fläche der Leiterplatte eines Rack Servers mit zwei HE beträgt 0,168 m² [Peiró und Ardenete 2015].

Informationen über die Modellierung und Materialzusammensetzung der Leiterplatten des Blade System Gehäuses sind im Abschnitt Blade Systeme: Blade Server Module und Blade System Gehäuse ausführlich beschrieben.

Für die Modellierung der Leiterplatten eines Rack Servers wird nach [Prakash et al. 2012] angenommen, dass der Transport per Flugzeug vom Produktionsstandort nach Montagestandort 6.250 km umfasst (Durchschnittswert Asien–Asien: ca. 2.500 km und USA–Asien: ca. 10.000 km).

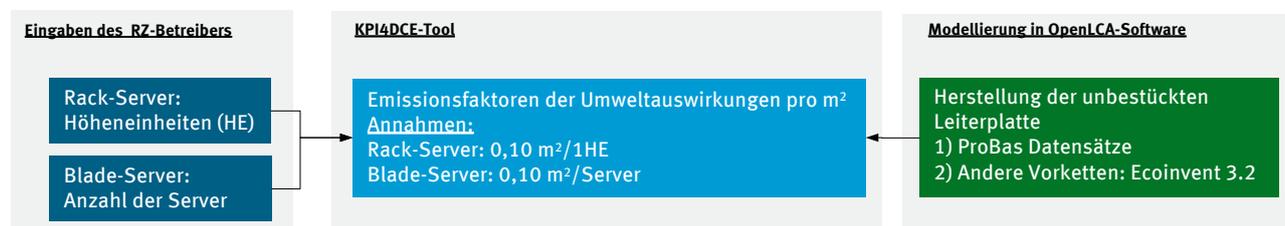
Tabelle 26: Standardformfaktoren für Motherboards von Servern

SSI: Server	Formfaktor	Maße Motherboard	Fläche in m ²
Compact Electronics Bay Specification (CEB)	SSI CEB (Breite x Tiefe: 12" x 10,5")	305 mm × 267 mm	0,081435
Enterprise Electronics Bay (EEB)	SSI EEB (Breite x Tiefe: 12" x 13")	305 mm × 330 mm	0,100650
Midrange Electronics Bay (MEB)	SSI MEB (Breite x Tiefe: 13" x 16")	330 mm × 406 mm	0,133980
Durchschnittlicher Wert pro Server			0,110000

Eigene nach Definition des Industrieverbands Server System Infrastructure (SSI) Forum

Abbildung 24 illustriert den Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools. In der Anwendung des KPI4DCE-Tools werden die Vorgabewerte für die Fläche der Leiterplatte nach dem Formfaktor der Server zugrunde gelegt. Diese Werte werden mit den Wirkungsfaktoren der Umweltauswirkungen pro Quadratmeter verknüpft und die Umweltauswirkungen werden automatisch berechnet.

Abbildung 24: Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools: Herstellung der Leiterplatte



Eigene.

3.4.4.4 Auf Komponentenebene: Hard Disk Drive

Der Datensatz für die Herstellung der internen 3,5"-HDD stammt aus [Prakash et al. 2016] und liegt diesem Forschungsvorhaben zugrunde. Die Bezugsgröße des Datensatzes ist eine 3,5"-HDD. Tabelle 27 dokumentiert den zeitlichen, geografischen und technischen Bezug des Datensatzes. Die in der Modellierung verwendeten Eingabe- und Ausgabedaten sind in Tabelle 88 im Anhang dargestellt. Die Her-

stellung der 3,5"-HDD umfasst die Erfassung der Sachbilanzdaten auf Komponentenebene und für die Produktion (Gate-to-Gate). Die Vorketten wurden durch ecoinvent-Datensätze v3.2 modelliert.

Tabelle 27: Repräsentativität des 3,5"-HDD-Datensatzes

Datensatz in ProBas	Zeitlicher Bezug	Geografischer Bezug	Technologischer Bezug
Fertigung / interne Festplatte	2008-2013	Weltmix	Formfaktor: 3,5" Kapazität: 1 TB Puffergröße: 16 MB Spindelgeschwindigkeit: 5400 RPM Schnittstelle: SATA II Technische Merkmale: Externe Datenübertragungsrate 300 Megabyte pro Sekunde Interne Datenübertragungsrate 144,5 Megabyte pro Sekunde Abmessungen: Höhe 2,62 cm (1,03 in.); Breite 10,16 cm (4 in.); Tiefe 14,71 cm (5.79 in.) Gewicht: 0,605 kg Anzahl der Medien: 3 Produktionsjahr: 2008

[Prakash et al. 2016]

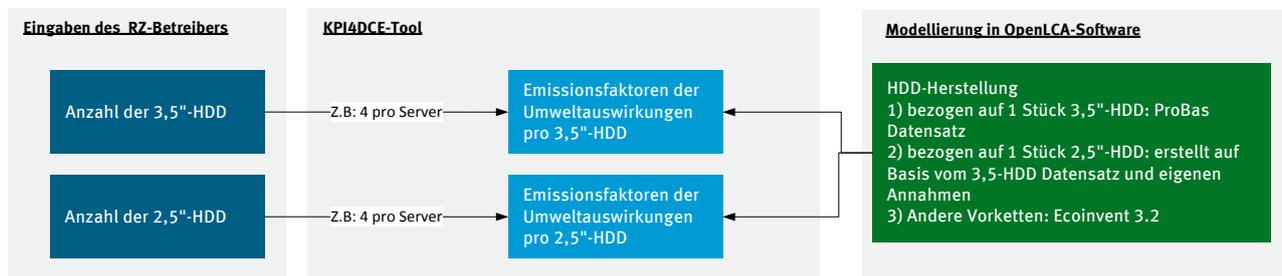
Im Gegensatz zu 3,5"-HDD mit aluminiumbasierten Medien (rotierende, magnetisierbare Scheiben) sind 2,5"-HDD mit glasbasierten Medien ausgestattet (siehe Tabelle 89 im Anhang). Die anderen Komponenten der 2,5"-HDD sind denen der 3,5"-HDD sehr ähnlich. Sie haben nur eine kleinere Bauform und weniger Gewicht [Prakash et al. 2016]. Allerdings weisen [Prakash et al. 2016] darauf hin, dass sich ein Datensatz für 3,5"-HDD nicht einfach auf einen Datensatz für 2,5"-HDD übertragen lässt.

Abgesehen von der unterschiedlichen Materialzusammensetzung zwischen dem aluminiumbasierten Medium und dem glasbasierten Medium sind zwei der Mikrochips (Prozessor und Speicherchips) identisch für die 2,5"-HDD und die 3,5"-HDD. Für die Modellierung der Herstellung einer 2,5"-HDD in diesem Forschungsvorhaben wurde daher ein Datensatz nach folgenden Ansätzen erstellt:

- ▶ Die Fläche der Hauptplatine einer 2,5"-HDD ist mit 40 cm² angenommen. Der Wert stammt aus der Messung eines Referenzprodukts (Western Digital 7500BPVT 750 GB)
- ▶ Das Gewicht einer 2,5"-HDD in der Modellierung beträgt 150 Gramm. Die Bandbreite des Gewichts der 2,5"-HDDs liegt in etwa zwischen 90 - 190 Gramm (WD Datenblatt 2017; Seagate Barracuda 2016).
- ▶ Die 2,5"-HDD ist mit zwei glasbasierten Medien ausgestattet. Die Materialzusammensetzung ist in Tabelle 89 im Anhang dargestellt.
- ▶ Die „Die“-Flächen des Prozessors und der Speicherchips von der 2,5"-HDD auf der Hauptplatine werden mit denen der 3,5"-HDD gleichgesetzt.
- ▶ Die sonstigen Komponenten (mit Ausnahme von Hauptplatine, Medien, Prozessor und Speicherchips) einer 2,5"-HDD sind anhand der Masse auf eine 3,5"-HDD hochgerechnet.
- ▶ Der Stromverbrauch in der Herstellung einer 2,5"-HDD liegt bei 2/3 von dem einer 3,5"-HDD. Die 2/3 basiert auf der Anzahl der Medien (genaue Diskussion siehe [Prakash et al. 2016])

Abbildung 25 illustriert den Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools.

Abbildung 25: Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools: Herstellung der HDD



Eigene.

3.4.4.5 Auf Komponentenebene: Solid State Drive

Bei einer HDD werden die Daten auf der Oberfläche der rotierenden, magnetisierbaren Medien gelesen oder geschrieben. HDD werden in RZ allmählich durch halbleiterbasierende Solid-State Drives (SSD) ersetzt, die durch einen Flash-Speicher, also eine nichtflüchtige Halbleiter-Speichertechnik und entsprechend hohe Übertragungsgeschwindigkeiten charakterisiert sind.

Die Informationslage zu ökobilanziellen Daten für die Herstellung von SSD ist derzeit noch unbefriedigend. Weder in der ecoinvent-Datenbank noch in der ProBas-Datenbank sind entsprechende Datensätze verfügbar. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens werden daher für SSD vereinfachende Annahmen getroffen, die nachfolgend dokumentiert sind.

Der Hersteller Seagate hat im Jahr 2011 eine Lebenszyklusanalyse für die SSD „Pulsar 2“ durchgeführt [Seagate Technology LLC 2011]. Die funktionelle Einheit wurde in der Studie als ein Stück „Pulsar 2“ SSD mit einer Lebensdauer von drei Jahren definiert. Eine Zusammenfassung der Untersuchung zeigt, dass diese SSD in ihrer Lebensdauer von drei Jahren insgesamt 205 kg CO₂-eq. verursacht, 66 Prozent davon während der Nutzungsphase, 32 Prozent während der Produktionsphase. Innerhalb der Produktionsphase dominiert die bestückte Leiterplatte mit einem Anteil von 96 Prozent am THG-Ergebnis [Seagate Technology LLC 2011]. Eine weitere Aufteilung des Beitrags auf Komponentenebene wurde nicht publiziert. Auch eine Komponentenzusammensetzung ist in der Studie nicht veröffentlicht.

Aus Konsistenzgründen zu den übrigen Komponenten wurde hier eine eigene überschlägige LCA für SSDs durchgeführt. Dabei wurde unterstellt, dass die Herstellung der Speicherchips einen großen Einfluss auf das Ergebnis hat. Auf Grundlage von Internetrecherchen und der Einschätzung von Experten wurde eine Komponentenliste in Tabelle 28 erstellt. Diese Liste liegt der Modellierung zugrunde. Speicherchips und unbestückte Leiterplatten wurden mit den entsprechenden ProBas-Datensätzen modelliert. Die weiteren elektronischen Komponenten auf der Leiterplatte konnten aufgrund der schlechten Datenlage nicht bilanziert werden. Nach Einschätzung der Autoren spielen sie für das Gesamtergebnis eine untergeordnete Rolle, da die Speicherchips die dominierenden elektronischen Komponenten auf der Leiterplatte sind.

Tabelle 28: Komponenten einer SSD

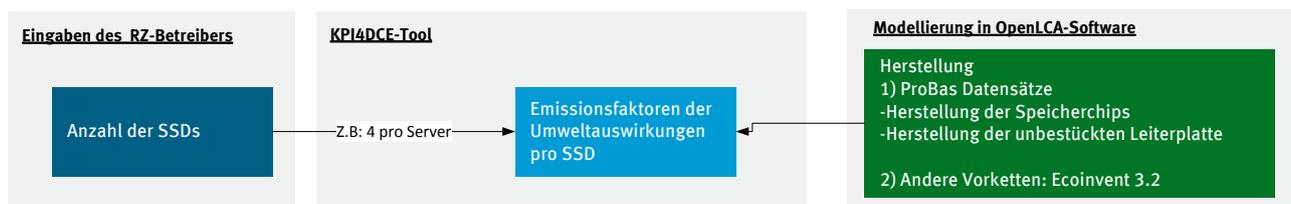
Parameter	Wert	Quelle	Annahme in der vorliegenden Studie	Modellierung
Gewicht	62 g/ SSD	[Hintemann et al. 2010]	150 g /SSD	-
	56 g/ SSD	[Samsung 2012]		
	64 g/ SSD	Samsung: Enterprise SSD PM863 SATA 960GB for		

	177 g/ SSD	Business ⁴⁶		
	187 g/SSD	Hitachi: Ultrastar SSD1600MR SAS SSD ⁴⁷		
„Die“-Fläche der Speicherchips	25-45 cm ² /SSD	[E. A. Olivetti, persönl. Mitteilung, 03.08.3016]	35 cm ² /SSD (Mittelwert)	ProBas Front-End-Prozesse: Tabelle 83 und Tabelle 85 Back-End-Prozesse: Tabelle 84 und Tabelle 86
Unbestückte Leiterplatte	66,4 cm ² /PCB; Oft werden zwei PCBs in einem Gehäuse verbaut.	[M. Berger, persönl. Mitteilung, 18.07.2016]	133 cm ² /SSD	ProBas: Tabelle 87
Aufwand der Bestückung	-	-	133 cm ² /SSD	Ecoinvent-Datensatz V3.2: mounting, surface mount technology, Pb-containing solder
Gehäuse: Aluminium	60 % des Gesamtgewichts	Eigene Annahme	90 g/SSD	ecoinvent V3.2

Eigene.

Abbildung 26 illustriert den Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools.

Abbildung 26: Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools: Herstellung einer SSD



Eigene.

3.4.4.6 Auf Produktebene: Server

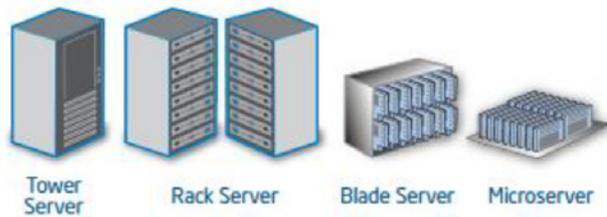
Abbildung 27 zeigt häufig verwendete Servertypen nach der EU-Ökodesign Vorstudie „Lot 9“ für Server [Bio by Deloitte 2015]. Von diesen Servertypen kommen in RZ aktuell am häufigsten Rack Server und Blade Systeme zum Einsatz (Einschätzung der Experten des Begleitkreistreffens am 20.04.2016). [Stobbe et al. 2015] prognostizieren, dass sich zwischen 2015 und 2025 die Zahl der Blade Server Mo-

⁴⁶ <http://www.samsung.com/us/business/computing/solid-state-drives/MZ-7LM960E> (Stand: 02.11.2016)

⁴⁷ <https://www.hgst.com/products/solid-state-solutions/ultrastar-ssd1600mr> (Stand: 02.11.2016)

dule um 45 Prozent und die Zahl der Rack Server und Tower Server um 15 Prozent erhöhen wird. Für die Modellierung werden daher die Servertypen Rack Server und Blade Systeme betrachtet.

Abbildung 27: Häufig verwendete Serverformfaktoren



[Bio by Deloitte 2015].

Die Modellierung des Servers erfolgt im Prinzip auf folgender Datengrundlage:

- ▶ Die Materialzusammensetzung (engl: bill of materials) der Rack Server und Blade Systeme wird [Bio by Deloitte 2015] entnommen. Der Serverschrank (Rack) wird nicht bilanziert.
- ▶ Die Datengrundlage für die Modellierung der CPU, der RAM-Module, der unbestückten Leiterplatte und der HDD stammt aus der ProBas-Datenbank. Sie sind in den Abschnitten 3.4.4.1 (Hauptprozessor), 3.4.4.2 (RAM-Module), 3.4.4.3 (unbestückte Leiterplatte) und 3.4.4.4 (HDD) dokumentiert.
- ▶ Die Herstellung der anderen Komponenten und deren Materialverarbeitung einschließlich der Vorketten wird anhand der ecoinvent-Datenbank v3.2 [ecoinvent V3.2 2015] modelliert. Bei manchen Komponenten oder Chemikalien (z. B. SSD) gibt es in der ecoinvent-Datenbank keine entsprechenden Datensätze. In diesem Fall werden sie anhand Literaturdaten und eigenen Annahmen modelliert und in den entsprechenden Abschnitten dokumentiert.

Rack Server

Der in der Ökodesign-Vorstudie zu Lot 9 betrachtete durchschnittliche Rack Server wiegt einschließlich Verpackung 27,8 kg [Bio by Deloitte 2015]. Die Zusammensetzung der Komponenten ist in Tabelle 29 dargestellt. Das Gehäuse hat einen Anteil von knapp der Hälfte des Gewichts, gefolgt von der Verpackung mit 17 Prozent, zwei Netzteilen mit zwölf Prozent und vier Festplatten mit sechs Prozent. Der Rack Server ist kein realer Server, da sich die Daten aus einer Reihe von vergleichbaren Produkten (Fujitsu, Dell, HP) im Mittel zusammensetzen. Baujahr, Gewicht, CPU und Speicher Konfiguration verweisen auf einen Rack Server mit zwei HE [Stobbe 2016]. CPU, CPU-Kühlkörper und Speicherchips sind in [Bio by Deloitte 2015] separat erfasst und zählen somit nicht zu der bestückten Hauptplatine.

Eine Abweichung der Komponentenzusammensetzung in Tabelle 29 zu [Bio by Deloitte 2015] liegt darin, dass das Eigengewicht der unbestückten Leiterplatte von der Gruppe „bestückte Hauptplatine“ abgezogen wurde, da die Herstellung der unbestückten Leiterplatte in diesem Forschungsvorhaben mit einem ProBas-Datensatz separat modelliert wurde. Die Berechnung des Gewichts der unbestückten Leiterplatte in [Bio by Deloitte 2015] beruht auf der methodischen Grundlage MEErP [Kemna et al. 2011]. Dort wird angenommen, dass die unbestückte Leiterplatte 35 Prozent des Gesamtgewichts einer bestückten Leiterplatte ausmacht. Darüber hinaus wurde die Lithium-Ionen-Batterie gemäß der Material-Liste nach [Peiró und Ardente 2015] ergänzt. Der in [Peiró und Ardente 2015] untersuchte Rack Server hat eine fast identische Materialliste wie der in [Bio by Deloitte 2015]. Allerdings hat [Peiró und Ardente 2015] nach der Demontage der Server festgestellt, dass noch zwei Batterien (eine Lithium-Ionen-Batterie und eine CR2032 Knopfzellen-Lithium-Batterie), die als Back-Up-Batterien bei Versagen des Netzteiles dienen, in [Bio by Deloitte 2015] fehlen. Die Knopfzellenbatterie mit 1,6 Gramm wird in der Bilanz wegen des fehlenden Datensatzes vernachlässigt. Für den Herstellungsaufwand der anderen prismatischen Lithium-Ionen-Batterie mit 43 Gramm liegt der ecoinvent-Datensatz „market for battery, Li-ion, rechargeable, prismatic“ zugrunde.

Tabelle 30 listet die für die Modellierung eines Rack Servers verwendete Materialienzusammensetzung und die Quellen der Datensätze. Der Stromverbrauch in der Herstellungsphase für Montage und Test wurde von [Peiró und Ardente 2015] mit 6,5 Kilowattstunden (kWh_{el}) pro Server angegeben. Dieser Wert wurde in diesem Forschungsvorhaben mit dem chinesischen Strommix modelliert.

Tabelle 29: Komponenten eines Rack Servers

Komponente / engl. Bezeichnung in [Bio by Deloitte 2015]	Gewicht in Gramm	Anteil in %
Gehäuse / Chassis	13.454	48,4 %
4 Lüfter / 4 Fans	946	3,4 %
4 Festplatten / 4 HDDs	1.748	6,3 %
Optisches Laufwerk / ODD	189	0,7 %
2 Prozessoren / 2 CPUs	54	0,2 %
2 Netzteile / 2 PSUs	3.426	12,3 %
CPU-Kühlkörper / CPU heat sink	582	2,1 %
Bestückte Hauptplatine ⁴⁸ / populated Mainboard	1.084	3,9 %
Unbestückte Leiterplatte / unpopulated printed circuit boards	583	2,1 %
Arbeitsspeicher / Memory	135	0,5 %
Erweiterungskarte / Expansion Card	349	1,3 %
Kabel / Cables	470	1,7 %
Li-Ion Batterie (nach [Peiró und Ardente 2015])	43	0,2 %
Verpackung / Packaging	4.733	17,0 %
Summe (mit Verpackung)	27.796	100,0 %

Eigene. [Bio by Deloitte 2015] und [Peiró und Ardente 2015]

Tabelle 30: Materialienzusammensetzung eines Rack Servers

Komponente	Komponente/ Material	Gewichtsanteil	Quelle des Materialeinsatzes	Datensätze für die Modellierung
Gehäuse	Metallteil: Stahl	91 %	[Bio by Deloitte 2015]	ecoinvent V3.2
	Kunststoffe (Acrylnitril-Butadien-Styrol)	3 %		
	Kunststoffe (Polycarbonate)	2 %		
	Aluminium	2 %		
	Kupfer	1 %		
	Elektronische Komponente	1 %		
Lüfter	Stahl	41 %	[Bio by Deloitte 2015]	ecoinvent V3.2
	Kupfer	8 %		

⁴⁸ beinhaltet elektronische Komponenten ohne CPU, ICs und ohne unbestückte Leiterplatte.

	Eisen	6 %		
	Kunststoffe (Polyethylen-terephthalat)	22 %		
	Kunststoffe (Acrylnitril-Butadien-Styrol)	23 %		
Festplatten	3,5"-HDD: Tabelle 88		[Prakash et al. 2016]	ProBas + ecoinvent V3.2
	2,5" HDD: Tabelle 89, Tabelle 90			
	SSD: Tabelle 28		siehe Tabelle 28	ecoinvent V3.2
Optisches Laufwerk	-	-	ecoinvent V3.2	ecoinvent V3.2: market for disk drive, CD/DVD, ROM, for desktop computer
Prozessoren	Front-End-Prozesse: Tabelle 81 Back-End-Prozesse: Tabelle 82		[Prakash et al. 2016]	ProBas + ecoinvent V3.2
Netzteile	Stahl	39,3 %	[Kemna et al. 2011; Peiró und Ardente 2015]	ecoinvent V3.2
	Aluminium	6,6 %		
	Lüfter	4,5 %		
	Kunststoffe (EVA)	2,2 %		
	Kunststoffe (Polycarbonate)	1,5 %		
	PCB	45 %		
	Kabel	0,9 %		
CPU-Kühlkörper	Kupfer	75,9 %	[Bio by Deloitte 2015]	ecoinvent V3.2
	Stahl	24,1 %		
Elektronische Komponenten auf bestückter Leiterplatte (ohne CPU, Speicherchips und Leiterplatte selber)	PCB	-	ecoinvent V3.2	Modifizierter ecoinvent V3.2 Datensatz: market for printed wiring board, mounted mainboard, desktop computer, Pb containing ⁴⁹ (Ohne CPU, ICs und PCB)

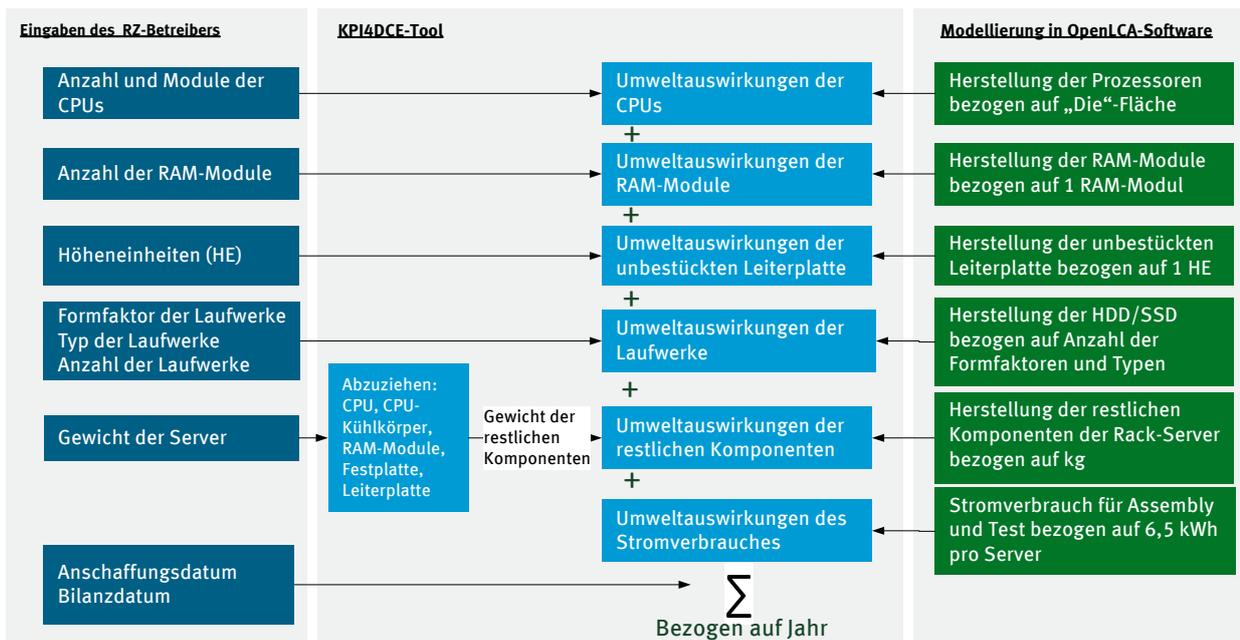
⁴⁹ Der Datensatz der Leiterplatte mit den bleihaltigen Loten wurde ausgewählt, da Blei in Loten für Server, Datenspeichersysteme und Netzinfrastrukturausrüstungen eine Ausnahme der RoHS-Direktive ist (Ausnahme 7b in Anhang III der RoHS). Darüber hinaus haben die Tantal-Kondensatoren mit einer THT (Through-Hole-Technology)-Bestückung im ecoinvent V3.2 Datensatz "printed wiring board, mounted mainboard, desktop computer, Pb containing" einen Gewichtsanteil von 4,5 Prozent der bestückten Leiterplatte. Das entspricht 45 Gramm Tantal-Kondensatoren pro Kilogramm Leiterplatte. Die Angabe der Tantal-Kondensatoren eines Desktop-Computers ist nicht übertragbar auf einen Server. Denn der von der JRC-Studie betrachtete Rack Server hat nur zwei Tantal-Kondensatoren mit der SMT (Surface-Mounted-Technology)-Bestückung und wiegt jeweils 500 mg (Peiró 2017) bezogen auf eine bestückte Leiterplatte mit einem Gewicht von 1856 Gramm. Daher wurde der Gewichtsanteil an Tantal-Kondensatoren in dem Datensatz auf ein Gramm pro Kilogramm Leiterplatte modifiziert.

Unbestückte Leiterplatte	Tabelle 87	-	ProBas [Prakash et al. 2016]	ProBas + ecoinvent V3.2
RAM-Modul	Front-End-Prozesse: Tabelle 83 und Tabelle 85 Back-End-Prozesse: Tabelle 84 und Tabelle 86	-	ProBas [Prakash et al. 2016]	ProBas + ecoinvent V3.2
Erweiterungskarte	PCB	-	[Bio by Deloitte 2015]	ecoinvent V3.2: market for printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb containing
Kabel	Messing	1,5 %	[Bio by Deloitte 2015]	ecoinvent V3.2
	Kupfer	17,2 %		
	Zink	20,4 %		
	Polyethylen (hohe Dichte)	22,1 %		
	Polyvinylchlorid (PVC)	30,9 %		
	Polyurethane (PUR)	0,4 %		
	Synthesekautschuk	7,4 %		
Li-Ion Batterie	Li-Ion Batterie	-	[Peiró und Arden- te 2015]	ecoinvent V3.2: market for battery, Li-ion, rechargeable, prismatic“
Verpackung	Karton	76,7 %	[Bio by Deloitte 2015]	ecoinvent V3.2
	HDPE Folien	1,6 %		
	GPPS/ Polystyrol	21,7 %		

Eigene.

Abbildung 28 illustriert den Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools. Auf Komponentenebene geben die RZ-Betreiber den Namen, die Anzahl der CPU, die Anzahl der RAM-Module, den Typ, den Formfaktor, die Anzahl der Festplatten, und das Gewicht sowie die HE des Rack Servers an. Die Angaben werden automatisch mit den entsprechenden Wirkungsfaktoren verknüpft. Das Gewicht der sonstigen Komponenten (Gehäuse, Lüfter, optisches Laufwerk, Netzteile, Kühlkörper, Erweiterungskarte, Kabel und Verpackung) wird ermittelt, in dem die Gewichtsanteile der Komponenten CPU, CPU-Kühlkörper, RAM-Module, Festplatte und Leiterplatte vom Gesamtgewicht des Referenz Rack Servers aus [Bio by Deloitte 2015] abgezogen werden (siehe Tabelle 29). Das bedeutet, es wurde vereinfacht angenommen, dass die prozentualen Anteile der sonstigen Komponenten bei allen Modellen der Rack Server gleich sind. Außerdem sind entsprechend [Bio by Deloitte 2015] jeweils zwei Netzteile pro Rack Server eingesetzt. Die Wirkungsfaktoren der Komponenten resultieren aus der Modellierung in der OpenLCA-Software. Die nach spezifischen Angaben berechneten Umweltauswirkungen werden dann aufsummiert. Daraus ergeben sich die Umweltauswirkungen eines Rack Servers. Um die Ergebnisse pro Jahr zu berechnen, muss noch das Anschaffungsdatum des Rack Servers eingegeben werden.

Abbildung 28: Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools: Herstellung der Rack Server



Eigene.

Blade Systeme: Blade Server Module und Blade System Gehäuse

Ein Blade System besteht aus Blade Server Modulen und einem Blade System Gehäuse (engl.: blade chassis). Das Blade System Gehäuse umfasst u. a. gemeinsam genutzte Netzteile und Lüfter. Die Ökodesign-Vorstudie Lot 9 zu Servern [Bio by Deloitte 2015] hat ein Blade System Gehäuse mit 16 Einbauplätzen (engl.: slots) betrachtet. Es wurde angenommen, dass 50 Prozent der Einbauplätze eines Blade System Gehäuses, dies entspricht acht Blade Server Module, bestückt werden [Bio by Deloitte 2015]. Die Komponentenzusammensetzung des betrachteten Blade Systems ist in Tabelle 31 dargestellt. Eine Abweichung der Materialzusammensetzung zu [Bio by Deloitte 2015] liegt darin, dass das Eigengewicht der unbestückten Leiterplatte aus der Gruppe „bestückte Hauptplatine“ abgezogen wurde, da die Herstellung der unbestückten Leiterplatte in der vorliegenden Studie mit dem ProBas-Datensatz separat modelliert wurde. Die Berechnung des Gewichts der unbestückten Leiterplatte in [Bio by Deloitte 2015] beruht auf der methodische Grundlage MEERP [Kemna et al. 2011]. Dort wird angenommen, dass die unbestückte Leiterplatte 35 Prozent des Gesamtgewichts einer bestückten Leiterplatte ausmacht. Darüber hinaus wurde das Gewicht der CPU-Kühlkörper auf Basis von [Berwald 2017b] modifiziert, da die Angabe der CPU-Kühlkörper bei Blade Server Modulen in [Bio by Deloitte 2015] unterschätzt wird.

Tabelle 31: Komponenten eines Blade Systems mit acht Blade Server Modulen

Komponente auf Deutsch / Bezeichnung in [Bio by Deloitte 2015] auf Englisch	Gewicht in Gramm	Anteil in %
Servergehäuse (16 Einbauplätzen)/ enclosure (16 slots)	105.981	59 %
Gehäuse / Chassis	87.000	82 %
Lüfter / Fans	2.361	2 %
4 Netzteile / 4 PSUs	16.620	16 %
8 Blade Server Module/ 8 blade servers	72.735	41 %

	Gehäuse / Chassis		33.600		46 %
	16 Prozessoren / 16 CPUs		432		1 %
	CPU-Kühlkörper / CPU heat sink		4.656*		6 %
	RAM-Modul/ Memory		1.080		1 %
	16 HDDs / 16 HDDs		6.993		10 %
	Bestückte Hauptplatine / populated Mainboard		4.193		6 %
	Unbestückte Leiterplatte / unpopulated printed circuit boards		2.258		3 %
	Verpackung / Packaging		19.523		27 %
Summe			178.716		100 %

Eigene. [Bio by Deloitte 2015]. *Die Angabe ist modifiziert auf Basis von [Berwald 2017b]

Tabelle 32 und Tabelle 33 stellen die für die Modellierung verwendete Materialienzusammensetzung und die Quellen der Datensätze für die Blade Server Module und für das Blade System Gehäuse dar. Der Stromverbrauch in der Herstellungsphase für Montage und Test wurde in Anlehnung an den Stromverbrauch eines Rack Servers mit 6,5 kWh_{el} pro Server nach [Peiró und Ardenete 2015] angenommen. Dieser Wert wurde in diesem Forschungsvorhaben mit dem chinesischen Strommix modelliert.

Das in [Bio by Deloitte 2015] betrachtete Blade System stellt eine Ausstattung mit 50 Prozent der Besetzung von 16 Einbauplätzen dar. Hinsichtlich der individuellen Ausstattung in RZ werden die Ergebnisse der Umweltbelastung differenziert nach Blade Server Modulen und Blade System Gehäuse im KPI4DCE-Tool eingebaut. Es wird davon ausgegangen, dass RZ-Betreiber die Anzahl und das Gewicht der Blade Server Module und des Blade System Gehäuses erfassen können, so dass RZ-Betreiber mithilfe des KPI4DCE-Tools die Umweltbelastung nach ihrer individuellen Besetzung der Blade Systeme ermitteln können. Die Blade System Gehäuse enthalten noch zwei Leiterplatten, die Mittelplatine (engl.: midplane) und die Rückplatine (engl.: backplane). Die Mittelplatine verbindet die IO-Module mit den Blade Server Modulen. Die Stromversorgung erfolgt über die Rückplatine. [Bio by Deloitte 2015] hat die zwei Platinen unter der Komponente „Elektronische Bauelemente“ in der Tabelle 32 erfasst [Berwald 2017]. Daher werden sie in der vorliegenden Studie mit dem ecoinvent-Datensatz modelliert, da die Platinen nicht separat erfasst sind.

Tabelle 32: Materialienzusammensetzung eines Blade System Gehäuses und Quellen der für die Modellierung verwendeten Datensätze

Komponente	Komponente/Material	Anteil in %	Quelle des Materialeinsatzes	Datensätze für die Modellierung
Gehäuse (100 %)	Stahl	100 %	[Bio by Deloitte 2015]	ecoinvent V3.2
Lüfter (100 %)	Stahl	41 %	[Bio by Deloitte 2015]	ecoinvent V3.2
	Kupfer	8 %		
	Eisen	6 %		

PSUs (100 %)	Kunststoffe (Polyethylen-terephthalat)	22 %	[Bio by Deloitte 2015]	ecoinvent V3.2
	Kunststoffe (Acrylnitril-Butadien-Styrol)	23 %		
	Niedriglegierter Stahl,	30,0 %		
	Chromstahl	1,9 %		
	Messing	1,2 %		
	Kupfer	0,3 %		
	Zink	0,2 %		
	Aluminium	14,3 %		
	Polyethylen (HDPE)	5,4 %		
	Polyvinylchlorid (PVC)	2,7 %		
	Paper	1,5 %		
	Elektronische Bauelemente	32,1 %		
	Bleilot	0,9 %		
	Leiterplatte	9,5 %		

Eigene.

Tabelle 33: Materialienzusammensetzung eines Blade Server Moduls und Quellen der für die Modellierung verwendeten Datensätze

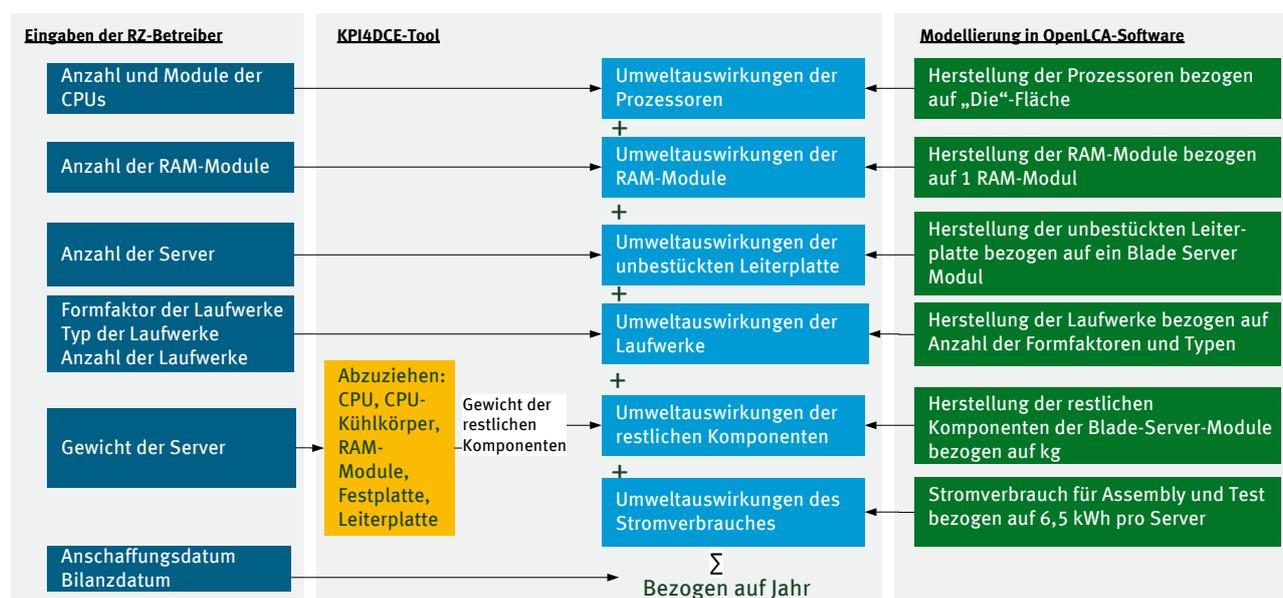
Komponente	Komponente/Material	Anteil	Quelle des Materialeinsatzes	Datensätze für die Modellierung
Gehäuse	Stahl	100 %	[Bio by Deloitte 2015]	ecoinvent V3.2
Prozessoren	Front-End-Prozesse: Tabelle 81	-	[Prakash et al. 2016]	ProBas + ecoinvent V3.2
	Back-End-Prozesse: Tabelle 82	-		
CPU-Kühlkörper	Kupfer	75,09 %	[Bio by Deloitte 2015]	ecoinvent V3.2
	Stahl	24,91 %		
RAM-Modul	Front-End-Prozesse: Tabelle 83 und Tabelle 85	-	[Prakash et al. 2016]	ProBas + ecoinvent V3.2
	Back-End-Prozesse: Tabelle 84 und Tabelle 86	-		
Festplatte	3,5"-HDD: Tabelle 88	-	[Prakash et al. 2016]	ProBas + ecoinvent V3.2
	2,5" HDD: Tabelle 90	-		
	SSD: Tabelle 28	-	siehe Tabelle 28	ecoinvent V3.2
Unbestückte	Tabelle 87	-	[Prakash et al.]	ProBas + ecoinvent V3.2

Leiterplatte			2016]	
Elektronische Komponenten auf bestückter Leiterplatte (ohne CPU, CPU-Kühlkörper, Speicherchips und Leiterplatte selber)	PCB	-	Ecoinvent V3.2	Modifizierter ecoinvent V3.2 Datensatz: market for printed wiring board, mounted main-board, desktop computer, Pb containing (Ohne CPU, ICs und PCB)
Verpackung	Karton	76,70 %	[Bio by Deloitte 2015]	ecoinvent V3.2
	HDPE Folien	1,60 %		
	GPPS/ Polystyrol	21,70 %		

Eigene.

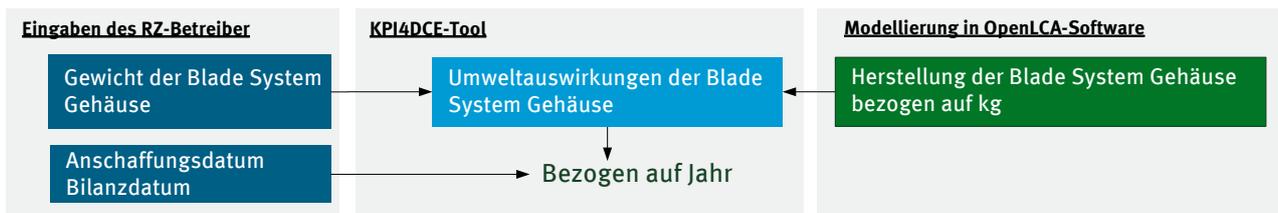
Abbildung 29 und Abbildung 30 illustrieren den Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools für die Blade Server Module und die Blade System Gehäuse. Die Berechnung unterscheidet sich von der Berechnung bei den Rack Servern dadurch, dass die Blade Server Module einzeln erfasst werden und die Blade System Gehäuse ergänzend dazu gerechnet werden. Auf Komponentenebene geben die RZ-Betreiber den Namen und die Anzahl der CPU, die Anzahl der RAM-Module, den Typ, den Formfaktor und die Anzahl der Festplatten sowie das Gewicht der Blade Server Module an. Die Angaben werden mit den entsprechenden Wirkungsfaktoren verknüpft. Die Wirkungsfaktoren resultieren aus der Modellierung in der OpenLCA-Software. Die berechneten Umweltauswirkungen werden aufsummiert. Daraus ergeben sich die Umweltauswirkungen der Blade Server Module. Bezüglich der Blade System Gehäuse wird das von RZ-Betreibern im KPI4DCE-Tool angegebene Gewicht der Blade System Gehäuse mit den Wirkungsfaktoren bezogen auf ein Kilogramm verknüpft, so dass die Umweltauswirkungen der Herstellung der Blade System Gehäuse berechnet werden. Um die Ergebnisse pro Jahr zu berechnen, müssen die Anschaffungsdaten der Blade Server Module und Blade System Gehäuse hinzugefügt werden.

Abbildung 29: Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools: Herstellung der Blade Server Module



Eigene.

Abbildung 30: Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools: Herstellung der Blade System Gehäuse



Eigene.

3.4.4.7 Auf Produktebene: Datenspeichersysteme

Ein Datenspeichersystem besteht aus Controller Enclosure, Drive Array Enclosures (DAE) und Speichermedien. Das in der EU-Ökodesign Vorstudie „Lot 9“ für Server [Bio by Deloitte 2015] betrachtete generische Datenspeichersystem besteht aus einem halben Controller Enclosure, zwei DAE und 16,66 3,5"-HDD, 12,07 2,5"-HDD und 2,87 SSD. Tabelle 34 und Tabelle 35 liegen für die Modellierung der Herstellung des Controller Enclosure und der DAEs zugrunde. Anzumerken ist, dass die Modellierung der Herstellung der in Controller Enclosure und DAEs beinhalteten Leiterplatten mit den ecoinvent V3.2 Datensätzen durchgeführt wurde, anstatt mit ProBas-Datensätzen wie die Modellierung der Herstellung der Server. Denn die Fläche der Leiterplatte und der Mikrochips der DAEs sind unbekannt.

Tabelle 34: Materialienzusammensetzung und Anteil des Controller Enclosures

Komponente	Material	Gewicht in kg	Anteil in %
Controller	Stahl	7,450	41,35 %
	Edelstahl	1,680	9,32 %
	Aluminiumblech	0,287	1,59 %
	Kupfer	0,520	2,89 %
	ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol)	0,510	2,83 %
	PET (Polyethylenterephthalat)	0,039	0,22 %
	HDPE / Polyethylen	0,087	0,48 %
	PP (Polypropylen)	0,018	0,10 %
	PC (Polycarbonate)	0,031	0,17 %
	Nylon 6	0,005	0,03 %
	PVC (Polyvinylchlorid)	0,085	0,47 %
	andere Kunststoffe	0,012	0,07 %
	Leiterplatte	0,577	3,20 %
PSU Controller	Hauptplatine	0,825	4,58 %
	Kabel	0,020	0,11 %
	Chassis	0,889	4,93 %
PSU-Lüfter	Stahl	0,110	0,61 %
	Kupfer	0,065	0,36 %
	Eisen	0,013	0,07 %
	Nylon 6	0,009	0,05 %
	PC (Polycarbonate)	0,035	0,19 %

Verpackung	ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol)	0,019	0,11 %
	Karton	3,629	20,14 %
	HDPE / Polyethylen	0,078	0,43 %
	GPPS/ Polystyrol	1,026	5,69 %
Summe		18,02	100,00 %

Eigene nach [Bio by Deloitte 2015]

Tabelle 35: Materialienzusammensetzung und Anteil der Disc Array Enclosures

Komponente	Material	Gewicht in kg	Anteil in %
Chassis	PC (Polycarbonate)	0,406	1,4 %
	ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol)	0,092	0,3 %
	Stahlblechteil	15,374	52,0 %
	Zinkteil	0,298	1,0 %
	Stahlteil	0,003	0,0 %
PSUs in DAEs (4)	Hauptplatine	4,217	14,3 %
	Kabel	0,104	0,4 %
	Chassis	4,546	15,4 %
PSU-Lüfter (8)	Stahl	0,563	1,9 %
	Kupfer	0,332	1,1 %
	Eisen	0,066	0,2 %
	Nylon 6	0,047	0,2 %
	PC (Polycarbonate)	0,177	0,6 %
	ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol)	0,095	0,3 %
Controller-Karte bzw. Leiterplatte	Elektronik	3,228	10,9 %
Summe		29,55	100,0 %

Eigene nach [Bio by Deloitte 2015]

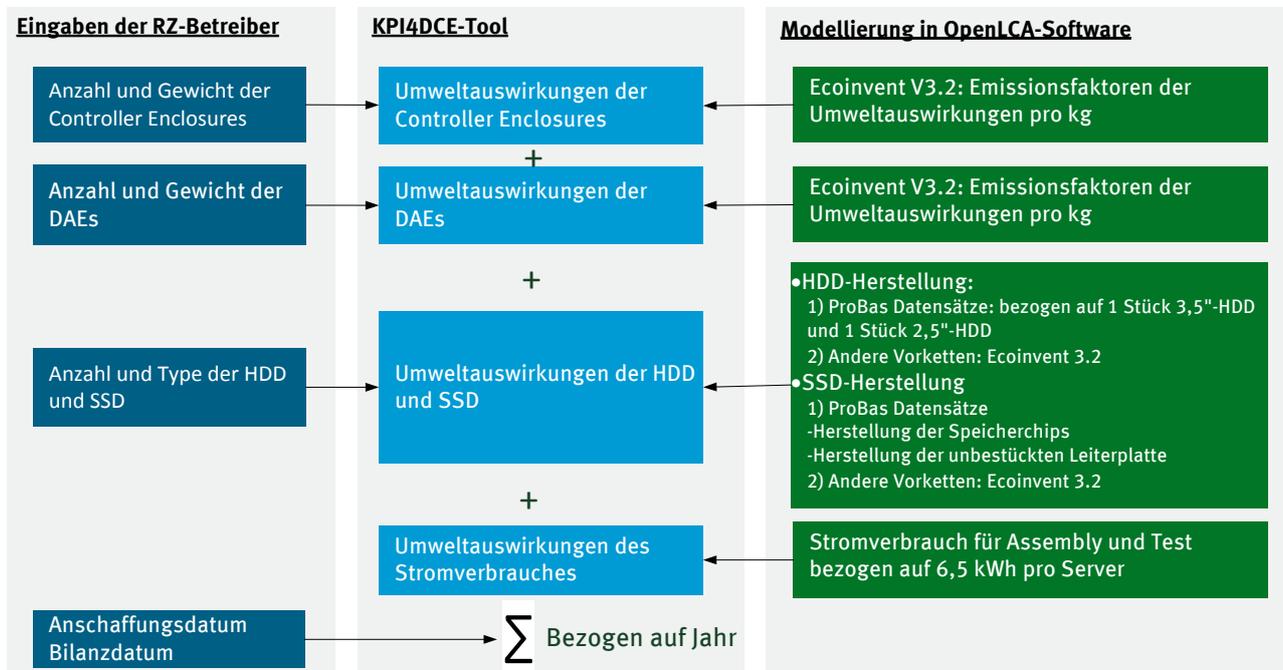
Die Modellierung der Herstellung der HDDs und der SSDs erfolgte in Anlehnung an Abschnitt 3.4.4.4 und Abschnitt 3.4.4.5.

Das in der EU-Ökodesign Vorstudie „Lot 9“ für Server [Bio by Deloitte 2015] betrachtete Datenspeichersystem stellt eine durchschnittliche Ausstattung dar. Hinsichtlich der individuellen Ausstattung in RZ werden im KPI4DCE-Tool die Ergebnisse der Umweltauslastung differenziert nach Controller Enclosure, DAEs und Speichermedium eingebaut. Es wird davon ausgegangen, dass RZ-Betreiber die Anzahl und das Gewicht des Controller Enclosure und der DAEs sowie die Anzahl der Speichermedien erfassen können, so dass RZ-Betreiber die Umweltauslastung ihrer individuellen Ausstattung des Datenspeichersystems mithilfe des KPI4DCE-Tools berechnen können. Der Stromverbrauch in der Herstellungsphase für Montage und Test des Datenspeichersystems wurde aufgrund der mangelnden Daten auf Basis des Rack Servers modelliert. Er beträgt 6,5 kWh_{el} pro Modell. Dieser Wert wurde in diesem Forschungsvorhaben mit dem chinesischen Strommix modelliert.

Abbildung 31 illustriert den Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools. Die von RZ-Betreibern angegebene Anzahl und das Gewicht des Controller Enclosure, der DAEs und der Festplatten werden im

KPI4DCE-Tool mit den Wirkungsfaktoren bezogen auf ein Kilogramm bei Controller Enclosure und DAEs bzw. auf ein Stück bei Festplatten verknüpft, so dass die Umweltauswirkungen der Herstellung des Datenspeichersystems des RZ berechnet werden. Um die Ergebnisse pro Jahr zu berechnen, muss noch das Anschaffungsdatum der Datenspeichersysteme eingegeben werden.

Abbildung 31: Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools: Herstellung der Datenspeichersysteme



Eigene.

3.4.4.8 Auf Produktebene: Netzwerk-Switches

Server und Datenspeicher im RZ werden mittels Netzwerktechnik miteinander verbunden, die typischerweise Switches, Router, Gateways, Kupferkabel, Glasfaserkabel etc. umfasst. [Stobbe et al. 2009] nehmen vereinfacht an, dass der Materialbestand der Netzwerktechnik in RZ etwa zehn Prozent der Servertechnik entspricht. In der Ökobilanz eines RZ in Großbritannien von [Whitehead et al. 2015] wurde die Herstellung der Netzwerkgeräte vereinfacht mit dem ecoinvent-Datensatz „Router“ modelliert. Einen vergleichbaren, vereinfachenden Ansatz verfolgt die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführte Modellierung, indem sie die große Bandbreite an Netzwerkgeräten durch die Bilanzierung von Switches als Referenzprodukte für das Netzwerk annimmt. Denn Switches dominieren die Netzwerkausrüstung im RZ. Grundsätzlich ist bei Switches zu unterscheiden, ob sie für das LAN oder das SAN verwendet werden. Dies hat unterschiedliche Übertragungsprotokolle und -medien (Kupferkabel vs. Glasfaserkabel) zur Folge. Zudem unterscheiden sich Switches dadurch, dass sie für die Ebene in der Netzwerk-Topologie (Zugriff, Aggregation, Kern) verwendet werden. Daraus resultieren verschiedene Typen der Switches (Rack-Switches, Aggregation-Switches, Kern-Switches) und verschiedene Portdichten.

Für die Modellierung der Herstellung eines Switches benötigt man die Komponenten bzw. Materialzusammensetzung. Diese Informationen stehen nur sehr begrenzt zur Verfügung. [Mahadevan et al. 2010] haben drei Switches (1HE Rack-Switch, 4HE Aggregation-Switch und ein Kern-Switch) hinsichtlich des Energieaufwands entlang des Lebenszyklus untersucht. Das Baujahr der Rack Switches ist 2009 [A. Shah, persönl. Mitteilung, 01.08.2016]. Eine Komponenten- bzw. Materialliste des Rack-Switches wurde anhand der Demontage des Switches abgeleitet (Tabelle 36). Der Aggregationsswitch und der Kern-Switch wurden auf der Basis von Daten des Rack-Switches hochgerechnet. Das Gewicht

der bestückten Steckplatine und das gesamte Gewicht des Switchs sind nicht in [Mahadevan et al. 2010] dokumentiert. Um das gesamte Gewicht abzuschätzen wurde angenommen, dass die Steckplatine zirka 25 Prozent an dem Gesamtgewicht eines Switches ausmacht. Das Gesamtgewicht wurde unter Einbeziehung der Steckplatine auf 9,5 kg ergänzt. Die Mikrochips auf der Steckplatine wurden von [Mahadevan et al. 2010] nicht nach der „Die“-Fläche sondern nach dem Gewicht modelliert. [Teehan und Kandlikar 2013a, 2013b] haben die Umweltauswirkung eines Switches mit einem Gewicht von ca. 2,2 kg (Baujahr: 2003) in der Herstellungsphase untersucht. Die Komponentenzusammenfassung ist ebenfalls in (Tabelle 36) dargestellt. Die prozentuelle Aufteilung der Komponenten ist bei beiden Literaturquellen [Mahadevan et al. 2010; Teehan und Kandlikar 2013a, 2013b] ähnlich. Eine Ausnahme bilden die Netzteile. [Teehan und Kandlikar 2013b] geben noch zusätzlich die „Die“-Fläche der ICs an.

Tabelle 36: Komponentenzusammensetzung eines Switches

Komponente/Material	(Mahadevan et al. 2010)		(Teehan und Kandlikar 2013b)	
	Absolute Werte	Gewichtsanteil	Absolute Werte	Gewichtsanteil
Netzteil	2,1 kg	22,1 %	0,193 kg	9,1 %
Steckplatine	1632 cm ²		480,5 cm ²	-
Mikrochips	0,0127 kg	0,13 %	0,047 kg / 366 mm ² „Die“-Fläche	2,2 %
Unbestückte Leiterplatte	0,73 kg (eigene Annahme)	7,7 %	0,186 kg	8,8 %
andere mikroelektronische Komponenten	1,52 kg (eigene Annahme)	16,0 %	0,274 kg	12,9 %
Gehäuse, Kabel und Lüfter	5,11 kg	53,8 %	1,42 kg	67,0 %
Summe (ohne Gewicht der Steckplatine) pro Switch	7,2 kg	-	1,612 kg	-
Summe (mit Gewicht der Steckplatine) pro Switch	9,5 kg	100 %	2,119 kg	100 %
Baujahr des Switchs	2009		2003	

Eigene auf Basis von [Mahadevan et al. 2010] und [Teehan und Kandlikar 2013]

Tabelle 37 liegt für die Modellierung der Herstellung eines Switches zugrunde. Die prozentuelle Aufteilung der Komponenten für die Modellierung des Netzwerk-Switches im Rahmen des vorliegenden Vorhabens orientiert sich an [Mahadevan et al. 2010], da diese einen vergleichsweise aktuellen Switch betrachten haben. Für die Herstellung einer unbestückten Leiterplatte der Steckplatine wurde der ProBas-Datensatz verwendet. Die Herstellung der elektronischen Komponenten auf der Leiterplatte wurde näherungsweise mithilfe des ecoinvent-Datensatzes „printed wiring board production, surface mounted, unspecified, Pb containing“ modelliert. Die „Die“-Fläche der ICs ist auf Basis von 366 mm², die von [Teehan und Kandlikar 2013] für ein kleines Switch eingeschätzt wurde, hochskaliert. Der von [Mahadevan et al. 2010] betrachtete Switch hat eine größere Leiterplatte und ein höheres Gewicht. Die „Die“-Fläche wurde in der Modellierung vereinfacht nach dem Verhältnis der Fläche der Leiterplatte zwischen den beiden Switchen hochskaliert, in der Annahme, dass auf einer größeren Leiterplattenfläche entsprechend mehr ICs montiert sind. Dies stellt eine starke Vereinfachung dar und führt zu entsprechenden Unsicherheiten. Der Stromverbrauch der Herstellung für Montage und Test des Switches

wurde aufgrund der mangelnden Daten auf Basis des Rack Servers modelliert. Er beträgt 6,5 kWh_{el} pro Modell. Dieser Wert wurde mit dem chinesischen Strommix modelliert.

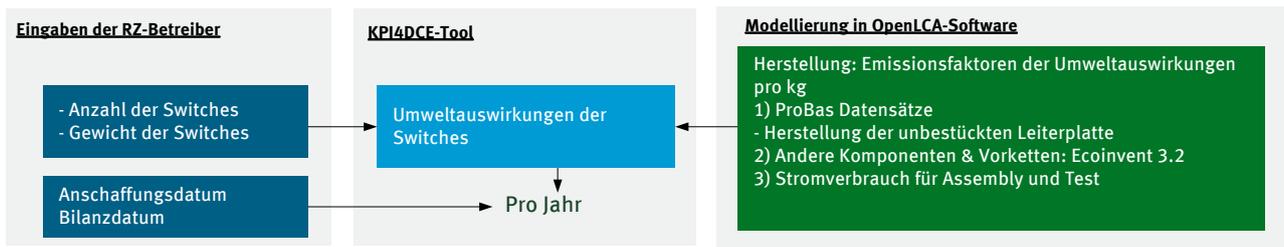
Tabelle 37: Materialienzusammensetzung und Datenquellen für die Modellierung der Herstellung eines Switches

Komponente/Material	Anteil (% Gewicht)	Quelle	Modellierung	
PSU (2,1 kg)				
Stahl	39,3 %	[Kemna et al. 2011; Peiró und Ardente 2015]		
Aluminium	6,6 %			
Lüfter	4,5 %			
Kunststoffe (EVA)	2,2 %			
Kunststoffe (Polycarbonate)	1,5 %			
PCB	45 %			
Kabel	0,9 %			
Unbestückte Leiterplatte (0,73 kg)	Tabelle 87	-	[Prakash et al. 2016]	Unbestückte Leiterplatte (1632 cm ²)
ICs (0,0127 kg)	ICs	-	angenommen auf Basis von [Teehan und Kandlikar 2013b]	„Die“-Fläche: 1243 mm ²
Elektronische Komponenten auf Steckplatine (ohne Leiterplatte und ICs) (1,52 kg)	bestückte Linecard	-	[Mahadevan et al. 2010]	Elektronische Komponenten auf bestückter Leiterplatte (ohne Leiterplatte und ICs) (1,52 kg)
Gehäuse, Kabel und Lüfter (5,11 kg)				
Stahl	82,2 %	[Mahadevan et al. 2010]	ecoinvent V3.2	
Aluminium	0,1 %			
Kupfer	0,3 %			
Nickel	0,3 %			
Zink	0,2 %			
Kunststoffe	16,9 %			

Eigene.

Abbildung 32 illustriert den Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools. Die von RZ-Betreibern angegebene Anzahl der Switches und das Gewicht der Switches werden im KPI4DCE-Tool mit den Wirkungsfaktoren bezogen auf ein Kilogramm verknüpft, so dass die Umweltauswirkungen der Herstellung der Switches des RZ berechnet werden. Um die Ergebnisse pro Jahr zu berechnen, wird noch die Angabe über das Anschaffungsdatum benötigt. Daraus werden die Umweltindikatoren bezogen auf die Nutzungsdauer in Jahren berechnet.

Abbildung 32: Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools: Herstellung der Switches



Eigene.

3.4.4.9 Auf Produktebene: USV-Anlagen und Batterien

USV-Anlagen und Batterien sorgen dafür, dass bei einem Stromausfall im RZ die IT und andere Anlagen unterbrechungsfrei mit Strom versorgt werden, bevor die NEAs automatisch gestartet werden. In Serie hergestellte USV-Anlagen sind ab einer Leistung von kleiner als 1,5 Kilovoltampere (kVA) bis hin zu mehr als 200 kVA erhältlich [Boulos et al. 2014].

Der Modellierung liegt die aus der EU-Ökodesign-Vorstudie zu „Lot 27 - Uninterruptible Power supplies“ erstellte Materialliste (engl: bill of material) von USV-Anlagen zugrunde [Boulos et al. 2014]. In der Studie wurden USV-Anlagen nach ihrem Leistungsbereich in vier Gruppen kategorisiert: <1,5 kVA, 1,5-5 kVA, 5,1-10 kVA, 10,1-200 kVA. Nach Experteneinschätzung werden in RZ USV-Anlagen ab einer elektrischen Leistung von 10 kVA eingesetzt. In kleinen Serverräumen werden USV-Anlagen mit max. 5 kVA direkt in den Racks untergebrachte. Den Bereich zwischen 5 kVA bis 10 kVA gibt es selten. Vor diesem Hintergrund wurden in der vorliegenden Untersuchung zwei Gruppen von USV-Anlagen (≤ 10 kVA und >10 kVA) differenziert modelliert. Die Materialzusammensetzung des Leistungsbereichs ≤ 10 kVA beruht auf [Boulos et al. 2014] für den Leistungsbereich von 1,5-5 kVA. Für den Leistungsbereich >10 kVA beruht die Materialzusammensetzung aus [Boulos et al. 2014] für den Leistungsbereich 10,1-200 kVA. Die Daten wurden jeweils als Referenz verwendet (Tabelle 38 und Tabelle 39). Über den Energieverbrauch der Montage der Anlage liegen keine Daten vor. Er wurde daher nicht berücksichtigt. Allerdings dokumentiert die *Product Environmental Footprint Category Rules* (PEFCR) für USV-Anlagen [Garnier 2016], dass die Montage keinen signifikanten Beitrag für die Umweltwirkungen hat.

Tabelle 38: Gewicht und Verpackung von USV-Anlagen

Gewicht in kg und Anteil der Verpackung in %	1,5 - 5 kVA	10,1 - 200 kVA
Anlage	10,6 kg	335,0 kg
Verpackung	1,8 kg	9,8 kg
LDPE	31 %	-
HDPE	-	0,1 %
PP	2 %	2 %
EPS	6 %	3 %
PVC	-	5 %
Karton	53 %	90 %
Papier	8 %	-

Eigene nach [Boulos et al. 2014]

Tabelle 39: Materialienzusammensetzung von USV-Anlagen

Material	1,5 - 5 kVA	10,1 - 200 kVA
LDPE (Polyethylen)	-	0,02 %
HDPE (Polyethylen)	-	0,40 %
PVC/ Polyvinylchlorid	2,46 %	1,79 %
ABS/ Acrylnitril-Butadien-Styrol	5,15 %	1,55 %
PA6/ Polycaprolactam	0,19 %	0,02 %
PC/ Polycarbonat	0,70 %	0,01 %
PMMA/ Polymethylmethacrylat	0,00 %	0,00 %
Epoxidharz	0,18 %	0,02 %
Glasfaser	0,13 %	0,001 %
Aramidfaser	-	0,50 %
Stahlblech	47,85 %	46,89 %
Gusseisen	12,01 %	9,55 %
Ferrite	2,85 %	5,61 %
Aluminiumfolie/ Extrusion	6,18 %	6,43 %
Kupfer-Wickeldraht/ -Draht/ -Platte	8,60 %	19,75 %
CuZn38 Beschichtung	0,98 %	0,87 %
Pulverbeschichtung	0,19 %	0,45 %
Aluminiumfolie/ Extrusion	12,34 %	6,13 %
Talkfüller	0,01 %	-
Stahl-Rohr/-Profil	0,07 %	-

Eigene nach [Boulos et al. 2014]

Die Batterien der USV-Anlagen für die Notstromversorgung müssen immer geladen sein. Ihr Zustand wird permanent überprüft. Sinkt die maximale Kapazität einer Batterie zu stark ab, wird sie ausgetauscht. Die Batterien der USV-Anlagen sind typischerweise für Ausfallzeiten der Netzversorgung von fünf bis zehn Minuten ausgelegt. Die Modellierung der Materialzusammensetzung der Bleibatterien beruht ebenfalls auf [Boulos et al. 2014]. Der Energieaufwand für den Herstellungsprozess der Batterie ist nicht in [Boulos et al. 2014] dokumentiert. Daher basiert der Energieaufwand in der Herstellungsphase der Batterie auf [Sullivan und Gaines 2012]. Er beträgt 2,67 kWh_{el} pro kg produzierte Batterien. Dieser Wert wurde in diesem Forschungsvorhaben mit dem asiatischen Strommix modelliert.

Tabelle 40: Materialzusammensetzung von Batterien

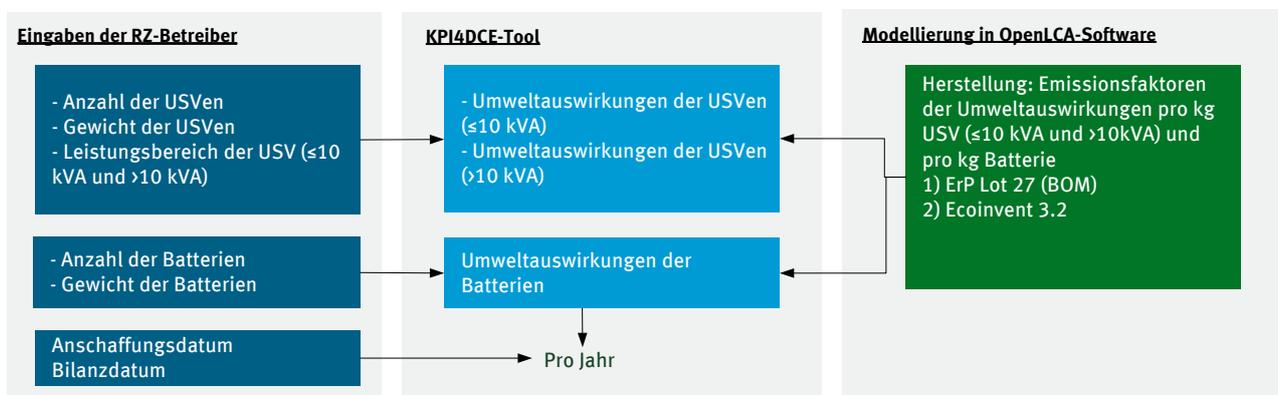
Material	Gewichtsanteil
Blei/ Bleioxid, primär	24 %
Blei/ Bleioxid, sekundär	36 %
PP	10 %
Schwefelsäure	10 %
Wasser	16 %
Glas	2 %

Antimon	1 %
Summe	100 %

Eigene nach [Boulos et al. 2014]

Als von den RZ-Betreibern anzugebender Parameter wurde das Gewicht der Batterien gewählt und nicht deren Ladungskapazität. Die Gewichtsdaten sind nach Auskunft von RZ-Betreibern (Begleitkreistreffen) vorhanden, weil es bei der Planung der Tragfähigkeit der Böden und Regale mitberücksichtigt werden muss. Bezüglich des zusätzlichen Betriebsstoffeinsatzes (Wasser, Säure) gibt es die Einschätzung, dass normalerweise keine Betriebsstoffe zu Wartungszwecken hinzugefügt werden müssen. Falls die Batterien nicht funktionstüchtig sind, wird entweder die Zelle oder der komplette Block ausgetauscht. Die Batterien können eine Lebensdauer von zehn Jahren erreichen.

Abbildung 33: Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools: Herstellung der USV-Anlagen und Batterien



Eigene.

Abbildung 33 illustriert den Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools. Die Anzahl, der Leistungsbereich und das Gewicht der USV-Anlagen sowie die Anzahl und das Gewicht der Batterien werden im KPI4DCE-Tool mit den Wirkungsfaktoren bezogen auf jeweils ein Kilogramm USV-Anlage und ein Kilogramm Batterie verknüpft, so dass die Umweltwirkungen der Herstellung der USV-Anlagen und der Batterien des RZ berechnet werden. Um die Ergebnisse pro Jahr zu ermitteln, wird das Anschaffungsdatum benötigt. Daraus werden die Umweltindikatoren bezogen auf die Nutzungsdauer in Jahren berechnet.

3.4.4.10 Modellierung des Transports der Komponenten nach der Endmontage

Die Hersteller beziehen die Komponenten für die IT zum einen von ihren Lieferanten. Zum anderen haben sie eigene Fertigungsprozesse. Bezüglich des Transports der Komponenten nach der Endmontage liegt die allgemeine Annahme zugrunde, dass die Komponenten durch Lastkraftwagen (LkW) größer 16 t - 32 t, Euro 4 mit einer Auslastung von 50 Prozent und einer Entfernung von 2000 km nach der Endmontage transportiert werden. Der Transportdatensatz aus ecoinvent v3.2 wurde verwendet.

3.4.5 Modellierung der Distribution der Produkte von der Endmontage bis zum Rechenzentrum

Die in der Distribution betrachteten Produkte sind Server, Datenspeichersysteme, Switches, USV-Anlage und Batterien. Für die Modellierung der Distribution werden die Transportentfernung und das Transportmittel sowie die Auslastung für den Lkw-Transport benötigt. Tabelle 41 gibt die Literaturwerte für die Distribution nach Produkten an. Die [Peiró und Ardente 2015] gehen davon aus, dass die Produktion der Server in China stattfindet und sie per Schiff nach Europa transportiert werden. [Stutz

et al. 2012] modellieren im Rahmen einer Carbon-Footprint-Studie eines Dell-Servers die Distribution bei zehn Prozent der Server mit dem Transportmittel Flugzeug und bei 90 Prozent mit dem Transportmittel LKW, wobei der Ort der Endmontage und der Nutzungsstandort jeweils die USA sind. [FUJITSU 2010a] weist über die Ökobilanz eines Servers darauf hin, dass die Produkte von der Zwischenmontage in China zur Endmontage in Augsburg per Schiff und Flugzeug transportiert werden. Der prozentuale Anteil der Transporte mit dem Schiff und dem Flugzeug wird in der Studie jedoch nicht angegeben. [Prakash et al. 2016] dokumentieren, dass laut Herstellerangaben die fertigen HDD per Flugzeug nach Europa transportiert werden. Bezüglich der Distribution eines Switches sind [Mahadevan et al. 2010] davon ausgegangen, dass die Distributionsroute bzw. Transportmittel von Servern und von Switchs sehr ähnlich sind. Die PEF-FCR Version 1.7 für USV-Anlagen weist darauf hin, dass die Endmontage der kleinen USV-Anlage (≤ 10 kVA) in Asien stattfindet, während die der großen USV-Anlage (> 10 kVA) in Europa [Garnier 2016].

Tabelle 41: Literaturwerte für die Distribution der Server, Datenspeichersysteme und USV-Anlagen

Transportgüter	Transportweg	Transportmittel	Entfernung	Auslastung	Quelle
Server	Inlandtransport vom Herstellungsstandort zum Überseehafen (China)	Lkw, 22 t	400 km	k.A.	[Peiró und Ardente 2015]
	China -> Europa	Schiff	19000 km	-	
	Inlandtransport bis zu Rechenzentren	Lkw, 22 t	1100 (600km zum Lager; 500km bis zum Kunde)	k.A.	
Server	Innerhalb der USA (End-Montage und Nutzungsstandort sind alle in der USA)	Lkw: 90 % der Server	1500 km	k.A.	[Stutz et al. 2012]
		Flug: 10 % der Server	1500 km	-	
Server	Zwischenmontage von China nach Endmontage in Augsburg	Schiff und Flug	k.A.	k.A.	[FUJITSU 2010a]
	Weitere Verteilung bis zu Kunden	Lkw	k.A.	k.A.	
Datenspeichersysteme	HDD	Laut Herstellerangaben werden die fertigen Festplatten per Flugzeug nach Europa transportiert.	k.A.	-	[Prakash et al. 2016]

Netzwerk: Switches	-	Schiff	92088 kg-km ⁵⁰	-	[Mahadevan et al. 2010]
	-	Flug	72 kg-km	-	
	-	Lkw	960 kg-km	k.A.	
USV-Anlage und Batterie (≤10 kVA)	Der Endmontage-Prozess findet in Asien statt	Schiff	19000 km		[Garnier 2016]
		Lkw (>32t, Euro 4)	1000 km	k.A.	
USV-Anlage und Batterie (>10 kVA)	Der Endmontage-Prozess findet in Europa statt	k.A.	k.A.		

Eigene.

RZ-Betreiber haben i. d. R. keine Informationen darüber, wie und mit welchen Transportmitteln die Lieferung vom Produktionsstandort bis zu ihren RZ erfolgt ist. Daher wurde zur Vereinfachung angenommen, dass die Distribution der betrachteten IT-Geräte entsprechend den in [Peiró und Ardente 2015] angenommenen Distributionsdaten von Servern erfolgt und zusätzlich noch ein Anteil an Luftfracht mitberücksichtigt wird (Tabelle 42).

Tabelle 42: Modellierung der Distribution

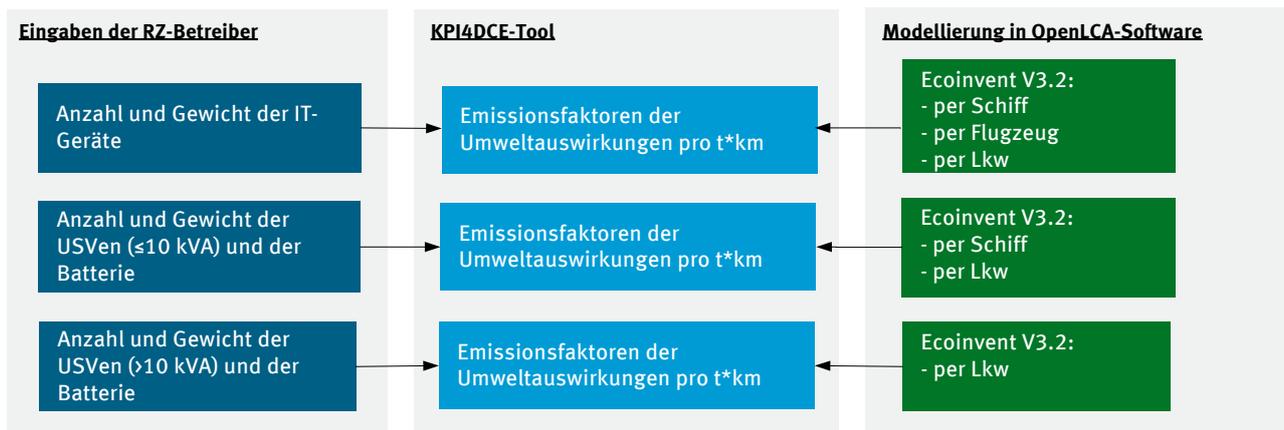
Transportgut	Transportmittel	Entfernung in km	Quelle
IT (Server, Datenspeichersysteme, Switches)	Schiff	19000 km (80 %)	[Peiró und Ardente 2015] und eigene Annahme
	Flugzeug	8000 km (20 %)	Eigene Annahme
	Lkw	1500 km	[Peiró und Ardente 2015]
USV-Anlage und Batterie (≤10 kVA)	Schiff	19000 km	[Garnier 2016]
	Lkw	1000 km	
USV-Anlage und Batterie (>10 kVA)	Lkw	1500 km	Eigene Annahme

Eigene.

Abbildung 34 illustriert den Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools. Die von RZ-Betreibern angegebene Anzahl und das Gewicht der IT, der USV-Anlagen und der Batterien werden im KPI4DCE-Tool mit den Wirkungsfaktoren bezogen auf jeweils einen Tonnenkilometer (t*km) verknüpft, so dass die Umweltauswirkungen der Distribution berechnet werden. Die Entfernungen der jeweiligen Transportmittel beruht auf Tabelle 42. Um die Ergebnisse pro Jahr zu berechnen, wird noch die Lebensdauer der betrachteten Produkte benötigt. RZ-Betreiber können die Lebensdauer im KPI4DCE-Tool selbst angeben. Falls ihnen diese Angabe nicht bekannt ist, steht ihnen der Vorgabewert für die Lebensdauern zur Verfügung. Die für die IT, USV-Anlagen und Batterien angenommenen Vorgabewerte der Lebensdauer sind in Tabelle 91 im Anhang dargestellt.

⁵⁰ Die von [Mahadevan et al. 2010] angegebene Entfernung bezieht sich auf kg*km. Geht man bei dem betrachteten Switch von 8 kg aus, so ergibt sich die Entfernung pro Switch: 11511 km per Schiff, 9 km per Flug, und 120 km per Lkw.

Abbildung 34: Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools: Distribution



Eigene.

3.4.6 Modellierung der Nutzungsphase

3.4.6.1 Stromverbrauch

Die RZ-Betreiber beziehen ihren Strom als Mittelspannungsstrom (1 kV bis 35 kV), der in den RZ auf Niederspannung (230 V oder 400 V) transformiert wird. Für die Berechnung der Umweltwirkungen der Energiebereitstellung stehen Datensätze für den deutschen Strommix aus GEMIS und ecoinvent 3.2 zur Verfügung. Gemis hat gegenüber ecoinvent eine aktuellere Aufteilung der Energieträger, was dazu führt, dass der Datensatz zum deutschen Strommix in ecoinvent einen zehn Prozent geringeren Anteil an erneuerbaren Energien aufweist. Der Datensatz in ecoinvent berechnet neben dem THG auch andere Wirkungskategorien wie ADP, die wiederum in Gemis nicht berechnet werden. Der für die Berechnung zugrunde gelegte deutsche Strommix für Mittelspannungsstrom stammt somit aus der ecoinvent-Datenbank v3.2. Der von den RZ-Betreibern erfasste Stromverbrauch ist differenziert nach Gebäudeinfrastruktur, Servern, Datenspeichersystemen und Netzwerk. Somit können die Kennzahlen und Indikatoren für die Beurteilung der Ressourceneffizienz im jeweiligen Bereich differenziert berechnet und dargestellt werden.

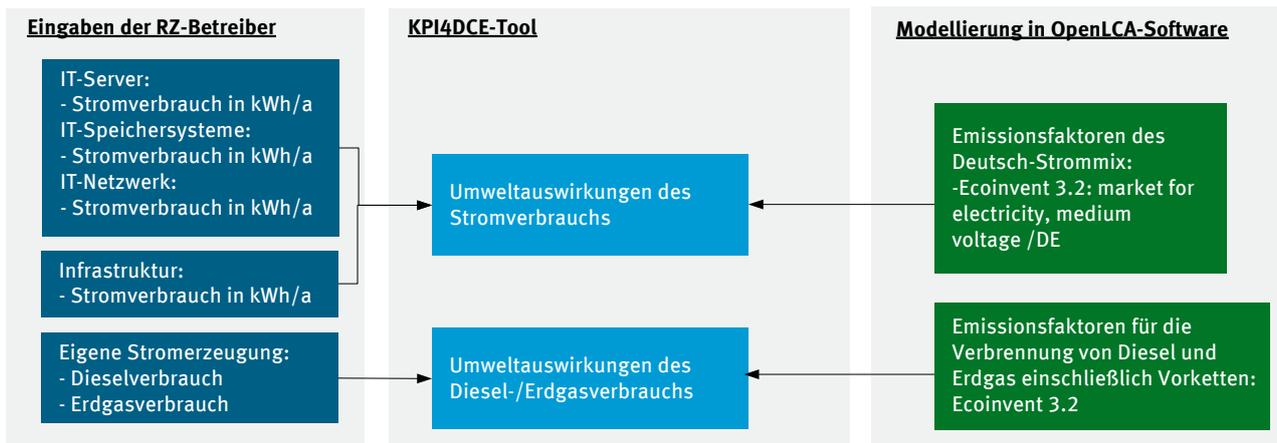
Auf dem Begleitkreistreffen wurde diskutiert, welche Möglichkeiten der Strombezüge in der Praxis auftreten, z. B. Strombezug entsprechend dem deutschen Strommix, Bezug von Ökostrom und eigene Stromerzeugung mit PV-Anlagen oder Blockheizkraftwerken (BHKW). Eigene Stromerzeugung gibt es, ist aber nicht verbreitet. Für eigene Stromerzeugung wurden im KPI4DCE-Tool die entsprechenden Wirkungsfaktoren für die Verbrennung von Diesel und Erdgas einschließlich Vorketten eingebaut. Betreibt der RZ-Betreiber ein BHKW, so muss der selbst erzeugte und genutzte Strom beim Strombezug nicht angegeben werden. Stattdessen wird der Verbrauch an Brennstoff angegeben.

Die von RZ-Betreibern erfassten Daten umfassen folgendes:

- ▶ Server: Stromverbrauch (Einheit: kWh_{el}/a)
- ▶ Datenspeicher: Stromverbrauch (Einheit: kWh_{el}/a)
- ▶ Netzwerke: Stromverbrauch (Einheit: kWh_{el}/a)
- ▶ Gebäudeinfrastruktur: Stromverbrauch (Einheit: kWh_{el}/a)
- ▶ Eigenerzeugung Diesel (Einheit: l/a)
- ▶ Eigenerzeugung Erdgas (Einheit: m³/a)

Abbildung 35 illustriert den Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools. Der von RZ-Betreibern für ein Jahr angegebene Stromverbrauch wird mit den Wirkungsfaktoren bezogen auf pro kWh_{el} Strom verknüpft, so dass die Umweltauswirkungen des Stromverbrauchs des RZ berechnet werden.

Abbildung 35: Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools: Stromverbrauch in der Nutzungsphase



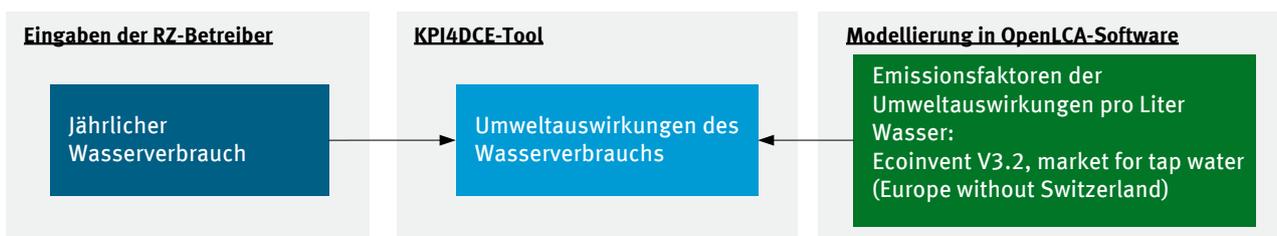
Eigene.

3.4.6.2 Wasserverbrauch

Die im Betrieb der IT und der Gebäudetechnik (z. B. USV-Anlagen) entstehende Wärme muss abgeführt werden. Das Kühlsystem benötigt je nach Ausstattungsvariante Wasser (z. B. wassergekühlte Racks; Klimaanlage mit zentraler Kaltwassererzeugung, kombiniertes Umluft- und Kaltwassersystem, Kühltürme), damit die Wärme durch die Verdunstungskälte des Wassers effizient abgeführt werden kann. Ein SAP RZ⁵¹ berichtet, dass sechs Tanks mit jeweils 50.000 Liter kaltem Wasser (bei einer Temperatur von vier Grad) bereitstehen, falls eine Kältemaschine ausfällt, damit die Zeit bis zum Anlaufen der Ersatzmaschine überbrückt werden kann. Im Sommer wird mehr Wasser verbraucht. [Shehabi et al. 2016] berichten, dass der jährliche Wasserverbrauch in großen RZ in den USA zwischen 313 und 509 Mio. Liter beträgt, bezogen auf eine elektrische Leistungsaufnahme der IT von 15 MW_{el}. Umgerechnet ergibt sich ein Wasserverbrauch von 2,3 Litern bezogen auf eine kWh des Energieverbrauchs der RZ. [Shehabi et al. 2016] haben in ihrer Studie 1,8 Liter Wasser pro kWh Energieverbrauch der RZ angenommen. Der Wasserverbrauch in deutschen RZ wurde bislang selten untersucht. Ein Referenzwert ist nicht zu finden. Für die Modellierung der Wasserbereitstellung wird der ecoinvent v.3.2-Datensatz „market for tap water (Europe without Switzerland)“ zugrunde gelegt. Ein Datensatz bezogen auf Deutschland ist in ecoinvent v.3.2 nicht vorhanden. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass der Aufwand der Wasserbereitstellung in Europa auf Deutschland übertragbar ist.

Abbildung 36 illustriert den Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools. Die von RZ-Betreibern angegebene Wasserverbrauchsmenge wird im KPI4DCE-Tool mit den Wirkungsfaktoren bezogen auf einen Liter Wasser verknüpft, so dass die Umweltauswirkungen der Wasserbereitstellung berechnet werden.

Abbildung 36: Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools: Wasserverbrauch in der Nutzungsphase



Eigene.

⁵¹ http://www.sapdatacenter.com/de/article/rechenzentrum_funktion/ (Stand: 04.11.2016)

3.4.6.3 Kältemittelverbrauch

Kältemittel werden im chemischen Sinn in halogenierte und nicht-halogenierte Kohlenwasserstoffe eingeteilt. In RZ sind vor allem sechs fluorierte Kältemittel und vier natürliche Kältemittel (siehe Tabelle 43) im Einsatz [Offermann et al. 2016]. In diesem Forschungsvorhaben wird nur die jährliche Verlustmenge der Kältemittel berücksichtigt. Denn anders als bei Heimklimaanlagen kann in professionellen RZ-Umgebungen davon ausgegangen werden, dass bei Außerbetriebnahme einer Kälteanlage anfallende Kältemittelfüllmengen nicht in die Atmosphäre entweichen, sondern dass diese Kältemittelfüllmengen aufgefangen und anderen Zwecken zugeführt werden, die nicht mehr dem RZ-Betrieb zuzuordnen sind. Die im Forschungsvorhaben berücksichtigte jährliche Verlustmenge entspricht der jährlichen Leckage-Rate nach Gerätetyp multipliziert mit der Kältemittelfüllmenge. Die Modellierung umfasst die Herstellung und den Transport der jährlichen Verlustmenge des Kältemittels sowie als relevanteste Einflussgröße das THG der jährlichen Verlustmenge, die in die Atmosphäre entweicht. Das THG berechnet sich als Produkt aus der jährlichen Verlustmenge und dem kältemittelspezifischen Wirkungsfaktor [Offermann et al. 2016].

Die Leckage-Rate stammt aus dem Nationalen Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2015 (UNFCCC) und berücksichtigt sowohl die Nutzungsphase als auch die Entsorgungsphase. Dazu kommen zwei verschiedene Verlustraten in Abhängigkeit vom Typ der Kälteanlage zum Einsatz [De Graaf 2016]:

1. Kälteanlagen, bei denen sich Verflüssiger und Verdampfer im gleichen Gerät befinden und deren Kühlmedium Wasser ist (Flüssigkeitskühler): jährliche Leckage-Rate 3,4 Prozent
2. Kälteanlagen, bei denen Verflüssiger und Verdampfer örtlich getrennt sind (Direktverdampfer bzw. Splitgeräte): jährliche Leckage-Rate fünf Prozent

Da nicht für jedes der zehn verwendeten Kältemittel spezifische Datensätze für die Herstellung vorliegen, mussten Vereinfachungen vorgenommen werden. In Anlehnung an die chemischen Formeln der Kältemittel bzw. an die Anzahl der Fluor- und Kohlenstoffatome wurden Daten von möglichst ähnlichen Kältemitteln für die Bilanzierung des Herstellungsaufwandes herangezogen (siehe Tabelle 43). Bezüglich des Kältemittels R718 (Wasser) wurde das Leitungswasser ohne Nachbehandlung nach [Safarik 2016] verwendet.

Tabelle 43: Chemische Zusammensetzung der in Rechenzentren verwendeten Kältemittel

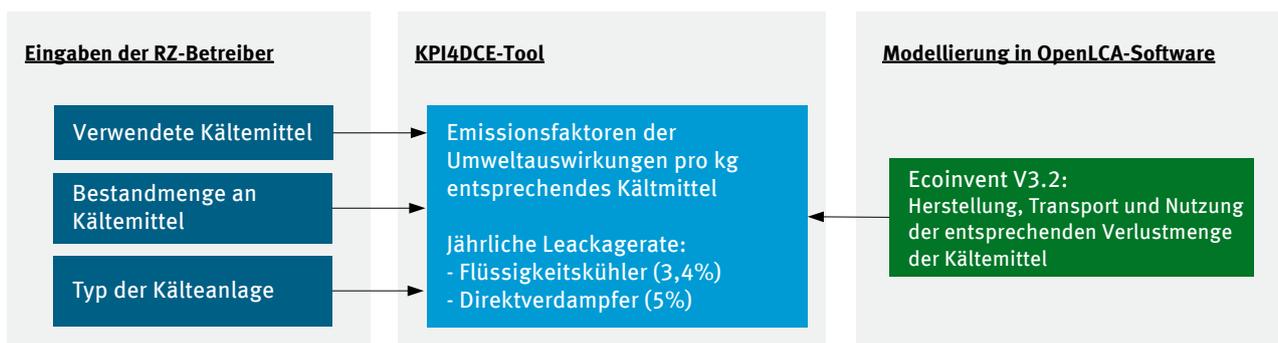
Kältemittel	Zusammensetzung	Datensätze bzw. referenziertes Kältemittel für die Modellierung des Herstellungsaufwandes
R134A	1,1,1,2-Tetrafluorethan, C ₂ H ₂ F ₄	ecoinvent V3.2: refrigerant R134a
R290	Propan, C ₃ H ₈	ecoinvent V3.2: propane
R32	CH ₂ F ₂	ecoinvent V3.2 Trifluoromethane als Näherung
R404A	R143a: C ₂ H ₃ F ₃ (52 %), R125: CHF ₂ CF ₃ (44 %), R134a: (C ₂ H ₂ F ₄ 4 %)	R143a: ecoinvent V3.2 tetrafluoroethane als Näherung R125: ecoinvent V3.2 hexafluoroethane als Näherung R134a: ecoinvent V3.2 refrigerant R134a
R407A	R32: CH ₂ F ₂ (20 %), R125: CHF ₂ CF ₃ (40 %), R134a: (C ₂ H ₂ F ₄ 40 %)	R32: ecoinvent V3.2 Trifluoromethane als Näherung R125: ecoinvent V3.2 hexafluoroethane als Näherung R134a: ecoinvent V3.2 refrigerant R134a
R407C	R32: CH ₂ F ₂ (23 %),	R32: ecoinvent V3.2 Trifluoromethane als Näherung

	R125: CHF ₂ CF ₃ (25 %), R134a: (C ₂ H ₂ F ₄ 52 %)	R125: ecoinvent V3.2 hexafluoroethane als Näherung R134a: ecoinvent V3.2 refrigerant R134a
R410A	R32: CH ₂ F ₂ (50 %), R125: CHF ₂ CF ₃ (50 %)	R32: ecoinvent V3.2 Trifluoromethane als Näherung R125: ecoinvent V3.2 hexafluoroethane als Näherung
R717	Ammoniak, NH ₃	ecoinvent V3.2: ammonia, liquid als Näherung
R718	Wasser	ecoinvent V3.2: tap water
R744	CO ₂	ecoinvent V3.2: carbon dioxide, liquid als Näherung

Eigene.

Abbildung 37 illustriert den Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools. Die von RZ-Betreibern angegebene Kältemitteltypen, Kälteanlagentyp und die Bestandmenge an Kältemittel werden mit den entsprechenden Wirkungsfaktoren bezogen auf ein Kilogramm Kältemittel im KPI4DCE-Tool verknüpft, so dass die Umweltauswirkungen des Kältemittelverbrauchs des RZs berechnet werden. Die Verlustrate wird abhängig vom Kälteanlagentyp automatisch ausgewählt.

Abbildung 37: Berechnungsablauf des KPI4DCE-Tools: Kältemittelverbrauch



Eigene.

3.4.7 Modellierung der Entsorgungsphase

3.4.7.1 Informationstechnik

Die Modellierung der Entsorgung der Server erfolgt in der Literatur meist durch Wiederverwendung und/oder Recycling mit einer hohen Recyclingrate. In der Literatur kommen Lebenszyklusanalysen für Server hinsichtlich der Entsorgung im Wesentlichen zu folgenden Aussagen (siehe Tabelle 44):

- ▶ Die Entsorgung der Server schlägt hinsichtlich des THG mit weniger als ein Prozent zu Buche.
- ▶ Werden Gutschriften betrachtet (Vermeidung von Umweltauswirkungen in der Primärgewinnung der Rohstoffe durch Sekundärrohstoffe oder Vermeidung von Umweltauswirkungen in der Produktion der neuen Komponenten durch zurückgewonnene und wiederverwendete Komponenten), hat es zur Folge, dass sich die Gutschriften positiv auf das THG-Ergebnis auswirken. Dadurch ergibt sich in manchen Untersuchungen ein negativer CO₂-eq.-Wert.
- ▶ Die genaue Modellierung bzw. die verwendeten Datensätze sind kaum dokumentiert.

Tabelle 44: Modellierung der Entsorgung der IT und ihr THG-Anteil am Gesamtergebnis nach verschiedenen Literaturquellen

	[Whitehead et al. 2015]	[FUJITSU 2010a]	[Stutz et al. 2012]	[Apple 2012]	[Bio by Deloitte 2015]
Server/ Datenspeichersysteme	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Transport von Nutzungsorten über Sammlung zur Endbehandlung ▶ Entsorgung:ecoinvent Datensatz „desktop computer, to WEEE treatment (CH)“ als Näherung ▶ 100 % Zurückgewinnen und Wiederverwend 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Manuelle Demontage ▶ Recyclingrate einschließlich thermischer Verwertung liegt bei >90 % 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Transport zum Recycling ▶ 75 % Recycling; 25 % Verbrennung mit thermischer Verwertung 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Transport zum Recycler ▶ mechanische Vorbehandlung (Schredderanlage) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 50 %-Reuse bei Servern und 25 % bei Datenspeichersystemen. ▶ Die restlichen Materialien werden zum großen Teil entweder recycelt oder thermisch verwertet. ▶
THG (Anteil der Entsorgung am Gesamtergebnis)	0,1 % (ohne Gutschrift)	Minimal, da Ergebnis in Abbildung nicht sichtbar	Negative Ergebnisse wegen Gutschriften	1 % (ohne Gutschrift)	Negative Ergebnisse wegen Gutschriften

Eigene.

[Peiró und Ardenete 2015] haben die Entsorgung der Server ausführlich untersucht und drei Szenarien in der Modellierung für die Entsorgung durchgeführt:

- ▶ Szenario 1: Gebrauchte Server werden von Original Equipment Manufacturers (OEMs) oder Aufarbeitungsunternehmen (engl.: refurbishing workshops) gesammelt. Einige Komponenten werden entweder für die Produktion der neuen Produkte oder als Ersatzteile für die vorhandenen Produkte wiederverwendet (engl.: reuse).
- ▶ Szenario 2: Gebrauchte Server werden gemäß der WEEE-Richtlinie durch zertifizierte Fachbetriebe gesammelt. D. h. einige Komponenten (z. B.: Batterie, Kabel, und Leiterplatte) werden separat entnommen und zum Teil für das Recycling weiter behandelt. Die anderen Komponenten werden durch Schredderanlagen mechanisch vorbehandelt. Die nach dem Schreddern gewonnenen Fraktionen werden je nach betrachtetem Material zur Gewinnung der Sekundärrohstoffe verarbeitet.
- ▶ Szenario 3: Gebrauchte Server werden durch Recycler gesammelt und ohne Vorbehandlung direkt durch Schredderanlagen mechanisch vorbehandelt. Die nach dem Schreddern gewonnenen Fraktionen werden je nach betrachtetem Material zur Gewinnung der Sekundärrohstoffe verarbeitet.

Das Ergebnis in Szenario 1 („Reuse“) zeigt, dass der Umweltvorteil hinsichtlich des ADP durch Wiederverwendung von HDDs, RAM-Modulen, CPU und Hauptplatine zwischen 18 Prozent und 53 Prozent liegt, je nach angenommener „Downcyclingraten“ der Komponenten. Die Ergebnisse zeigen, dass im Szenario 2 die Entsorgung durch Recycling bzw. Gutschriften 60 Prozent des ADP aus der Herstellungsphase kompensieren kann, während im Szenario 3 20 Prozent [Peiró und Ardenete 2015]. Zusammengefasst lässt sich sagen, dass sich das Wiederverwenden und Recycling positiv auf viele Umweltkategorien auswirken kann, besonders auf die Umweltkategorie ADP, die hauptsächlich aus der Herstellungsphase resultiert.

Für RZ-Betreiber ist die Entsorgung der IT, z. B. stoffliche Verwertung (Recycling) oder Wiederverwendung (Reuse) unbekannt. Die Information aus dem 1. Begleitkreistreffen lautet, dass beim Entsorgen der IT-Geräte der Entsorgungsnachweis des zertifizierten Entsorgungsbetriebs als Nachweis für die Gesetzeskonformität der Entsorgung gilt. Es gibt keine besonderen Kriterien, nach denen ein Entsorgungsbetrieb ausgewählt wird, die über die gesetzlichen Anforderungen hinausgehen. Auch wird kein Entsorgungsbetrieb beauftragt, der eine hohe stoffliche Verwertung (Recycling) der Altgeräte gewährleistet. I. d. R. wird ein Entsorgungsbetrieb mit kurzen Anfahrtswegen gewählt. In diesem Kontext wurde die Modellierung der Entsorgung der IT im KPI4DCE-Tool vereinfacht vorgenommen und beruht auf folgenden Annahmen (siehe Tabelle 45):

- ▶ Transport der IT vom RZ über Sammelstellen bis zum Recycling: Entfernung mit 200 km angenommen.
- ▶ Manuelle Demontage/Zerlegung (engl.: disassembly/dismantling) findet beim Recycler statt, wo die Leiterplatten entnommen werden. Für die manuelle Demontage/Zerlegung wird kein Energieaufwand bzw. Verarbeitungsaufwand angenommen. Daraus ergeben sich keine Umweltauswirkungen aus diesem Prozess.
- ▶ Gebrauchte Leiterplatten werden dann durch Schredderanlagen mechanisch vorbehandelt. Die nach dem Schreddern gewonnenen Fraktionen werden dann je nach betrachtetem Material zur Gewinnung der Sekundärrohstoffe bearbeitet. Die Modellierung beruht auf demecoinvent-Datensatz v3.2 „Treatment of scrap printed wiring boards, shredding and separation“.
- ▶ Die anderen Komponenten werden dann allgemein durch Schredderanlagen mechanisch vorbehandelt. Die nach dem Schreddern gewonnenen Fraktionen werden je nach betrachtetem Material zur Gewinnung der Sekundärrohstoffe bearbeitet. Die Modellierung beruht auf demecoinvent v3.2-Datensatz „Treatment of waste electric and electronic equipment, shredding.“
- ▶ Die Behandlung der Gehäuse für das Recycling wurde vereinfacht nach der Behandlung von Eisen-schrott modelliert, mit Ausnahme der SSDs und der HDDs, deren Gehäuse hauptsächlich aus Aluminium bestehen.

- ▶ Es wurden keine Gutschriften vergeben, da Gutschriften auf der Annahme basieren, dass die Wiederverwendung der Sekundärrohstoffe zu einer Substitution von primären Rohstoffen führt.
- ▶ Eine Zusammenfassung der prozentualen Aufteilung der Leiterplatten, anderer Komponenten und des Gehäuses der IT befindet sich in Tabelle 46.

Tabelle 45: Entsorgung der IT und Quellen der zur Modellierung verwendeten Datensätze

Prozesse	Datensätze für die Modellierung	Prozesse in Datensätzen
Transport der IT vom RZ über Sammelstellen bis zum Recycling	Transport, freight, lorry, unspecified	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Herstellung der Kraftstoffe ▶ Direkte Emissionen während des Transports
Behandlung der Leiterplatte	market for used printed wiring boards [GLO] / Treatment of scrap printed wiring boards, shredding and separation	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Transport ▶ Aufbereitung des Leiterplatten-schrott, Schredder und Separation
Behandlung der sonstigen Komponenten	market for waste electric and electronic equipment / Treatment of waste electric and electronic equipment, shredding	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Transport ▶ Aufbereitung des Elektro- und Elektronikschrott
Behandlung der Gehäuse	<p><u>Sonstige IT</u>: sorting and pressing of iron scrap</p> <p><u>HDD + SSD</u>: treatment of aluminum scrap, post-consumer, prepared for recycling, at remelter</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Energieverbrauch
Behandlung der Verpackung (Kunststoffe)	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Entsorgung: Verbrennung
Behandlung der Verpackung (Karton)	treatment of waste paperboard, sorting plant	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Behandlung fürs Recycling

Eigene.

Tabelle 46: Aufteilung der Komponenten für die Modellierung der Entsorgung der IT nach Gewichtsanteil

	Leiterplatten	Sonstige Komponenten	Gehäuse	Summe	Berechnet nach Materialien- / Komponentenliste aus
Rack Server	17 %	25 %	58 %	100 %	[Bio by Deloitte 2015]
Blade Server Module	17 %	17 %	66 %	100 %	[Bio by Deloitte 2015]
Blade System Gehäuse	7 %	11 %	82 %	100 %	[Bio by Deloitte 2015]
Datenspeichersysteme: Controller Enclosure	11 %	14 %	75 %	100 %	[Bio by Deloitte 2015]
Datenspeichersysteme: DAEs	25 %	20 %	55 %	100 %	[Bio by Deloitte 2015]
Datenspeichersysteme: 2,5" und 3,5" HDD	6 %	34 %	59 %	100 %	[Prakash et al. 2016]; eigene Annahme

Datenspeichersysteme: SSD	40 %	-	60 %	100 %	eigene Annahmen
Switches	21 %	53 %	27 %	100 %	[Mahadevan et al. 2010]; eigene Annahmen

Eigene.

3.4.7.2 USV-Anlagen und Batterien

[Whitehead et al. 2015] modellieren die Entsorgung der USV-Anlage und der Batterie mit einer Rückgewinnungs- und Wiederverwendungsrate von 100 Prozent. Somit wird nur der Transport berücksichtigt [Whitehead et al. 2015].

Angesichts der langen Lebensdauer der USV-Anlagen wird davon ausgegangen, dass die Entsorgung für die Ergebnisse eine minimale Rolle spielt. Tabelle 47 und Tabelle 48 liegen der Modellierung der Entsorgung der USV-Anlagen und Batterien zugrunde. Die verwendeten Datensätze stammen aus ecoinvent v3.2.

Tabelle 47: Modellierung der Entsorgung der USV-Anlagen

Material		USV (≤10 kVA)	USV (>10 kVA)	Datensätze für die Modellierung
Transport vom RZ über Sammelstelle bis zum Recycling		200 km	200 km	Transport, freight, lorry, unspecified
Demontage	Kunststoffe	9 %	4 %	Treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration
	Metalle	79 %	90 %	Sorting and pressing of iron scrap
	PWB	12 %	6 %	Market for used printed wiring boards [GLO]
	Verpackung: Kunststoffe	39 %	10 %	Treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration
	Verpackung: Karton	61 %	90 %	Treatment of waste paperboard, sorting plant

Eigene.

Tabelle 48: Modellierung des Entsorgung der Batterien

Material	Batterie	Datensätze für die Modellierung
Transport vom RZ über Sammelstelle bis zum Recycling	200 km	Transport, freight, lorry, unspecified
Behandlung der Batterie	-	Treatment of scrap lead acid battery, remelting

Eigene.

3.4.8 Zusammenfassung der von den RZ-Betreibern anzugebenden Parameter

Ein Überblick über die von den RZ-Betreibern anzugebenden Parameter ist in Tabelle 49 zusammengefasst.

Tabelle 49: Überblick über die von den RZ-Betreibern anzugebenden Parameter zur Bilanzierung des Ressourcenaufwands

Ausrüstung	Komponenten	anzugebende Parameter	Bezugsgröße
Rack Server/ Blade Server Module	CPU	Modellnummer, Codename, Anzahl: z. B. Intel Xeon E5420, 1 Stück	„Die“-Fläche: z. B. 214 mm ²
	RAM	Anzahl RAM-Module (Annahme: 9 Speicherchips auf einem RAM-Modul)	Stück Anzahl
	3,5"-HDD	Anzahl	Anzahl
	2,5"-HDD	Anzahl	Anzahl
	SSD	Anzahl	Anzahl
	Leiterplatte	Rack Server: HE Blade Server Module: Anzahl Module	Fläche
	Server	Anzahl, Gewicht	Anzahl, Gewicht
	Server	Anschaffungsdatum, Bilanzdatum	Effektive Nutzungsdauer
Blade-Server-Gehäuse	Gehäuse	Anzahl, Gewicht	Anzahl, Gewicht
	Gehäuse	Anschaffungsdatum, Bilanzdatum	Effektive Nutzungsdauer
Datenspeichersystem	Controller Enclosure	Anzahl, Gewicht	Gewicht
	DAE	Anzahl, Gewicht	Gewicht
	3,5"-HDD	Anzahl	Anzahl
	2,5"-HDD	Anzahl	Anzahl
	SSD	Anzahl	Anzahl
	Datenspeichersystem	Anschaffungsdatum, Bilanzdatum	Effektive Nutzungsdauer
Netzwerk-Switches	Gerät	Anzahl, Gewicht	Gewicht
	Gerät	Anschaffungsdatum, Bilanzdatum	Effektive Nutzungsdauer
USV(≤10 kVA)	USV	Gewicht, Anzahl	Gewicht
	USV	Anschaffungsdatum, Bilanzdatum	Effektive Nutzungsdauer
USV (>10 kVA)	USV	Gewicht, Anzahl	Gewicht
	USV	Anschaffungsdatum, Bilanzdatum	Effektive Nutzungsdauer
USV-Batterie	Batterie	Gewicht, Anzahl	Gewicht
	Batterie	Anschaffungsdatum, Bilanzdatum	Effektive Nutzungsdauer
Energieversorgung: Netzstrom	Server	Stromverbrauch	kWh _{el} Strom-mix DE

	Datenspeicher	Stromverbrauch	kWh _{el} Strom-mix DE
	Netzwerk	Stromverbrauch	kWh _{el} Strom-mix DE
	Gebäudetechnik	Stromverbrauch	kWh _{el} Strom-mix DE
Energieversorgung: Selbsterzeugung	Diesel	Jährliche Verbrauchsmenge	Liter
	Erdgas	Jährliche Verbrauchsmenge	m ³
Kältemittel	Kältemittelverluste	Typ der Kältemittel	kg
		Bestandmenge	
		Typ der Kälteanlage	
Wasser	Wasser	Jährliche Wasserverbrauch	Liter

Eigene.

3.5 Zusammenführung der Teilergebnisse

3.5.1 Zusammenführung der Nutzen und Aufwandsindikatoren

Im Rahmen der Entwicklung des Kennzahlensystems wurden im Abschnitt 3.3 fünf Indikatoren zur Erfassung der IT-Leistung der Server, Datenspeichersysteme und Netzwerke und in Abschnitt 3.4 vier Indikatoren (ADP, KEA, THG, Wasserverbrauch) zur ganzheitlichen Erfassung der Ressourceninanspruchnahme und Umweltwirkungen eines RZ definiert. Zudem wurden in Abschnitt 3.2 vier Hilfskenngrößen zur Erfassung der Ressourceneffizienz und Umweltwirkungen der Gebäudetechnik eines RZ bestimmt. Insgesamt wurden damit 24 Ressourceneffizienzkennzahlen definiert. Die Ressourceneffizienzkennzahlen listet Tabelle 50.

Tabelle 50: Überblick über die entwickelten Ressourceneffizienzkennzahlen

	Gebäude	Server	Datenspeicher			Netzwerk
			Speicherplatz	Transaktionsrate	Durchsatz	
ADP	DCiRE _{ADP}	ITRE _{Server, ADP}	ITRE _{Speicher, ADP}	ITRE _{Speicher, ADP}	ITRE _{Speicher, ADP}	ITRE _{Netz, ADP}
KEA	DCiRE _{KEA}	ITRE _{Server, KEA}	ITRE _{Speicher, KEA}	ITRE _{Speicher, KEA}	ITRE _{Speicher, KEA}	ITRE _{Netz, KEA}
THG	DCiRE _{THG}	ITRE _{Server, THG}	ITRE _{Speicher, THG}	ITRE _{Speicher, THG}	ITRE _{Speicher, THG}	ITRE _{Netz, THG}
Wasser	DCiRE _{Wasser}	ITRE _{Server, Wasser}	ITRE _{Speicher, Wasser}	ITRE _{Speicher, Wasser}	ITRE _{Speicher, Wasser}	ITRE _{Netz, Wasser}

Eigene.

Der Aufbau des Kennzahlensystems folgt einem einheitlichen Schema. Für die Gebäudetechnik ergibt sich die DCiRE in Abhängigkeit von der jeweils betrachteten Wirkungskategorie als Quotient aus der Ressourceninanspruchnahme aller IT-Geräte zur Ressourceninanspruchnahme des RZ (IT-Geräte + Gebäudetechnik). Bspw. wird zur Bestimmung der DCiRE_{THG} das durch die IT-Geräte verursachte THG ins Verhältnis zum vom RZ verursachten THG gesetzt. Die DCiRE ist einheitenlos. Der theoretisch mögliche Maximalwert der DCiRE beträgt 100 Prozent, was bedeutet, dass die Gebäudetechnik keine Ressourcen in Anspruch nimmt.

Die Ressourceneffizienz der Server, Datenspeichersysteme und des Netzwerks (ITRE) ergibt sich pro Wirkungskategorie jeweils aus der IT-Leistung und der Ressourceninanspruchnahme des betrachteten IT-Subsystems. Bspw. ergibt sich die ITRE für die Server in Bezug auf die Umweltwirkungskategorie KEA als Quotient aus der von den Servern erbrachten Rechenleistung (zur Berechnung der Rechen-

leistung der Server siehe Formel 13 in Abschnitt 3.3.1) und dem von den Servern verursachten KEA. Die Ressourceneffizienzkennzahlen für die IT-Subsysteme haben in Abhängigkeit des jeweiligen Leistungsindikators und der betrachteten Wirkungskategorie verschiedene Einheiten. Für alle Ressourceneffizienzkennzahlen der IT aber gilt, je größer der Kennzahlenwert ist, desto höher ist die Ressourceneffizienz des IT-Subsystems. Der theoretisch mögliche Maximalwert einer jeden der Ressourceneffizienzkennzahlen ist unendlich.

3.5.2 Prototypische Implementierung eines Berechnungswerkzeuges

Aufgrund der vielfältigen Eingabeparameter und damit einhergehenden Komplexität der Berechnungsvorschriften und des entwickelten Kennzahlensystems wurde ein MS EXCEL-basiertes KPI4DCE-Tool entwickelt, welches RZ-Betreibern im Rahmen der Fallstudien testweise zur Verfügung gestellt wurde, auch um die Datenerhebung zu vereinheitlichen. Das KPI4DCE-Tool umfasst mehrere Tabellenblätter zur strukturierten Eingabe der erforderlichen Messwerte, verschiedene Hintergrunddaten (Leistungswerte und „Die“-Fläche für 750 CPU, Charakterisierungsfaktoren, Vorgabewerte für Lebensdauern etc.) sowie die definierten Vorschriften zur Berechnung der Ressourceneffizienzkennzahlen. Im Wesentlichen erfüllt das KPI4DCE-Tool mit Hilfe der drei Komponenten die folgenden Funktionen:

- ▶ Strukturierte Erfassung der in Tabelle 21 und Tabelle 49 gelisteten Eingabeparameter
- ▶ automatische Berechnung und Zusammenführung der Nutzen- und Aufwandsindikatoren
- ▶ grafische Darstellung der Umweltauswirkungen nach Lebenszyklusphasen und Teilsystemen

Bezüglich der Aufwands- und Nutzenindikatoren können die RZ-Betreiber mithilfe des KPI4DCE-Tools die erforderlichen Eingabeparameter ihres Serverraumes oder RZ selbst erfassen und die betrachteten Leistungsparameter und ressourcenbezogenen Umweltauswirkungen (siehe Abschnitt 3.4.2) des RZ eigenständig berechnen. Das KPI4DCE-Tool ist ein Prototyp, das nur eingeschränkt und nicht ohne Unterstützung zur Weitergabe an RZ-Betreiber geeignet ist. Wünschenswert wäre es, wenn eine Ankopplung des KPI4DCE-Tool an eine von RZ-Betreibern zur Inventarisierung genutzte Verwaltungssoftware möglich wäre, sodass die RZ-Betreiber jederzeit einen Überblick über den Bestand und die Änderungen ihres Ressourcenverbrauchs erhalten könnten. Gleiches gilt für die Erfassung der zur Berechnung der Nutzenindikatoren benötigten Leistungsparameter. Eine überarbeitete Version des KPI4DCE-Tools sollte Mechanismen zur direkten Einspeisung der von verschiedenen Monitoring-Systemen des RZ erfassten Messwerte umfassen.

Neben der reinen Erfassung und Berechnung der Kennzahlen können mit dem KPI4DCE-Tool die betrachteten Umweltauswirkungen nach den Lebenszyklusphasen (Herstellung, Distribution, Nutzung und Entsorgung) und nach den Teilsystemen (Server, Datenspeicher, Netzwerk und Gebäudetechnik) separat dargestellt werden. Somit können Betreiber im Detail ersehen, welches der Teilsysteme des RZ wieviel Ressourcen in Anspruch nimmt. Weiterhin kann mit dem KPI4DCE-Tool die Wirkung von Verbesserungsmaßnahmen simuliert werden, bzw. nach Implementierung von Maßnahmen mittels echter Messwerte gegengeprüft werden, ob die Maßnahmen die gewünschten Wirkungen erzielt haben. Im Rahmen dieser Studie wurden mittels des KPI4DCE-Tools zudem partiell Sensitivitätsanalysen zur Überprüfung der Richtungssicherheit und Robustheit des Kennzahlensystems durchgeführt.

4 Überprüfung des Kennzahlensystems

4.1 Anwendbarkeit in der Praxis

Ziel des Vorhabens ist die Spezifikation eines praktikablen Kennzahlensystems. Daher wurde die Anwendbarkeit des Kennzahlensystems anhand praktischer Fallbeispiele überprüft. Die zur Berechnung der Kennzahlen erforderlichen Daten wurden in drei produktiven RZ erhoben und ausgewertet. Einige Daten wurden von den RZ-Betreibern mittels der in den RZ eingesetzten Verwaltungs- und Monitoring-Systemen bereitgestellt. Für zwei der RZ konnten Informationen aus den Energieeffizienzberichten für den Blauen Engel nach RAL-UZ 161 genutzt werden. In den Abschnitten 4.1.1 bis 4.1.3 werden die pro Fallbeispiel erhobenen Daten beschrieben und die RZ-spezifischen Erfolgsfaktoren und Herausforderungen dargestellt. Im Abschnitt 4.1.4 werden die Ergebnisse der drei Fallstudien vergleichend gegenübergestellt und im Abschnitt 4.1.5 die Anwendbarkeit abschließend bewertet. Die Tabelle 51 zeigt eine Übersicht zu den RZ-Kategorien der untersuchten Fallbeispiele.

Tabelle 51: Übersicht RZ-Kategorien für die Fallbeispiele

Fallbeispiel	RZ1	RZ2	RZ3
Geschäftsfelder	kommunaler IT-DL MSP + Colocation	Webhoster MSP	IT-Beratung MSP
RZ-Verantwortung	Operator	Operator	Operator
IT	30 %	100 %	100 %
Gebäudetechnik	100 %	100 %	100 %
Verfügbarkeitsklasse (VK) nach EN 50600	VK 3	VK 3*	VK 3
max. installierbare el. IT-Anschlussleistung	750 kW _{el}	83 kW _{el}	192 kW _{el}

Eigene. *als 2-Standort-Strategie

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Fallbeispiele im Einzelnen detailliert beschrieben.

4.1.1 Fallstudie RZ1

Als kommunaler IT-Dienstleister ist das betrachtete Unternehmen Partner für Kommunen und Schulen, Energieversorger und Entsorger sowie Non-Profit-Organisationen. Das Unternehmen betreibt zwei RZ. Für die vorliegende Studie wurde ein RZ gewählt, im Folgenden RZ1 genannt, mit dem das Unternehmen sowohl als Betreiber als auch als Colocation-Anbieter auftritt. D. h. im RZ1 werden einerseits Teile für eigene Zwecke genutzt und andererseits die freien IT-Flächen an Dritte vermietet.

4.1.1.1 Inventar

Das in einem massiven Altbau in einem Industriegebiet auf zwei Etagen untergebrachte RZ1 verfügt über eine maximale IT-Anschlussleistung von ca. 750 kW_{el}. Die Klimatisierung der insgesamt sechs IT-Räume erfolgt jeweils über drei kaltwassergespeiste Umluftkühler. Die Racks in den IT-Räumen sind in Reihen nach dem Kalt-Warmgang-Prinzip aufgestellt. Die kalte Zuluft wird über einen Doppelboden in die eingehausten Kaltgänge geführt. Zwei im Außenbereich installierte Kälteanlagen kühlen an warmen Tagen das Kaltwasser. Bei ausreichend kühlen Außenlufttemperaturen wird das Kaltwasser über ein den Kälteanlagen vorgeschaltetes trockenes Rückkühlwerk teilweise oder vollständig gekühlt.

Energieseitig nutzt das RZ1 keine eigenen Anlagen zur Erzeugung von Strom. Eine NEA dient ausschließlich der Stromversorgung bei länger anhaltenden Netzausfällen. Vier USV-Anlagen mit jeweils 250 kVA_{el} versorgen die IT und die Hälfte der ULK unterbrechungsfrei mit Strom. Die insgesamt vier Batterien können jeweils sieben Minuten bei 220 kVA Last überbrücken. In den Racks werden keine

intelligenten Stromverteileisten (engl.: power distribution units, iPDU) eingesetzt, die in der Lage wären, den Stromverbrauch der angeschlossenen IT-Geräte zu messen.

Das RZ1 hat sechs IT-Räume, von denen das Unternehmen einen zum Betrieb eigener IT-Geräte verwendet. Die anderen fünf IT-Räume werden an Colocation-Kunden vermietet. Zur Bewertung der Ressourceneffizienz wurden ausschließlich der Nutzen und die Ressourceninanspruchnahme der eigenbetriebenen IT und die daraus resultierende, anteilige Ressourceninanspruchnahme an der Gebäudetechnik des RZ1 betrachtet. Dazu mussten Allokationsregeln festgelegt werden, mit denen die anteilige Ressourceninanspruchnahme an der Gebäudetechnik berechnet werden kann. Das Vorgehen zur Abschätzung des anteiligen Stromverbrauchs des Betreibers in der Nutzungsphase zeigt die Formel 23.

Formel 23: Anteil des Unternehmens am Stromverbrauch des RZ1 in der Nutzungsphase

$$E_{\text{RZ, Anteil, Nutzung}} = \text{PUE} \times E_{\text{IT, Anteil, Nutzung}}$$

PUE: Power Usage Effectiveness (-)

$E_{\text{RZ, Anteil, Nutzung}}$: anteiliger RZ-Stromverbrauch (kWh)

$E_{\text{IT, Anteil, Nutzung}}$: Stromverbrauch eigene IT (kWh) (%)

Da das RZ1 im Bilanzzeitraum kein Wasser zur Kühlung verbraucht hat, mussten der Wasserverbrauch des Kühlsystems aus der Nutzungsphase nicht anteilig umgelegt werden. Die anteilige Ressourceninanspruchnahme der Herstellung, der Distribution und der Entsorgung der Gebäudetechnik wurde über das Verhältnis „Anteil am RZ-Energieverbrauch in der Nutzungsphase zum RZ-Gesamtenergieverbrauch in der Nutzungsphase“ nach Formel 24 bestimmt.

Formel 24: Anteiliger Ressourcenbedarf des Unternehmens am Ressourcenbedarf der Herstellung, Distribution und Entsorgung der Gebäudetechnik des RZ1

$$R_{\text{GT, Anteil, Herstellung}} = R_{\text{GT, gesamt, Herstellung}} \times \frac{E_{\text{RZ, Anteil, Nutzung}}}{E_{\text{RZ, gesamt, Nutzung}}}$$

$$R_{\text{GT, Anteil, Distribution}} = R_{\text{GT, gesamt, Distribution}} \times \frac{E_{\text{RZ, Anteil, Nutzung}}}{E_{\text{RZ, gesamt, Nutzung}}}$$

$$R_{\text{GT, Anteil, Entsorgung}} = R_{\text{GT, gesamt, Entsorgung}} \times \frac{E_{\text{RZ, Anteil, Nutzung}}}{E_{\text{RZ, gesamt, Nutzung}}}$$

$E_{\text{RZ, Anteil, Nutzung}}$: Anteil am Energieverbrauch des RZ in der Nutzungsphase (kWh)

$E_{\text{RZ, gesamt, Nutzung}}$: Energieverbrauch des RZ in der Nutzungsphase (kWh)

$R_{\text{GT, Anteil, Herstellung}}$: Ressourceninanspruchnahme der Herstellung der Gebäudetechnik

$R_{\text{GT, gesamt, Herstellung}}$: Anteil an der Ressourceninanspruchnahme der Herstellung der Gebäudetechnik

$R_{\text{GT, Anteil, Distribution}}$: Ressourceninanspruchnahme der Distribution der Gebäudetechnik

$R_{\text{GT, gesamt, Distribution}}$: Anteil an der Ressourceninanspruchnahme der Distribution der Gebäudetechnik

$R_{\text{GT, Anteil, Entsorgung}}$: Ressourceninanspruchnahme der Entsorgung der Gebäudetechnik

$R_{\text{GT, gesamt, Entsorgung}}$: Anteil an der Ressourceninanspruchnahme der Entsorgung der Gebäudetechnik

Nachstehende Angaben zur IT beziehen sich auf die zu eigenen Zwecken genutzten IT-Geräte:

Im Bilanzzeitraum verfügte das RZ1 über 432 Server, davon waren 362 Rack Server und vier Blade Systeme, die mit 70 Blade Server Modulen bestückt waren. Die Art und Anzahl der in den Servern verbauten CPUs konnte nicht in jedem Fall erfasst werden, da die CMDB des RZ1 nicht lückenlos gepflegt

war. Eine vollständige manuelle Nacherfassung war aufgrund der Vielzahl an Geräten im Rahmen des Forschungsvorhabens zu aufwändig. Daher wurde für die Server mit fehlenden Angaben eine gleichartige Ausstattung wie bei ähnlichen Modellen, zu denen Angaben vorlagen, angenommen. Angaben zu der Ausstattung mit RAM-Modulen und Festplatten konnten der CMDB nicht entnommen werden. Daher wurden für alle Server jeweils pauschal vier RAM-Module und zwei HDD bilanziert. Tatsächlich dürften im RZ1 aber deutlich mehr RAM-Module und Festplatten in den Servern verbaut sein.

Weiterhin verfügte das RZ1 im Bilanzzeitraum über 26 auf HDD und SSD basierende Datenspeichersysteme unterschiedlicher Größe. Die genaue Anzahl der verbauten HDD und SSD konnte nur für zehn der Datenspeichersysteme angegeben werden. Für die restlichen Datenspeichersysteme wurden mit Hilfe der Modellbezeichnungen den Datenblättern die Maximalkonfigurationen entnommen.

Zudem befanden sich im IT-Raum des Unternehmens 56 Netzwerk-Switches. Davon wurden 30 LAN-Switches auf Zugriffsebene, vier LAN-Switches auf Aggregationsebene und zwei LAN-Switches für das Kernnetz eingesetzt. Weitere 18 LAN-Switches dienten der Realisierung eines Management-LANs. Zudem wurden einige der Datenspeichersysteme über zwei SAN-Switches an die Server angebunden.

4.1.1.2 Energiebedarf

Im RZ1 wird der Stromverbrauch des gesamten RZ, eines jeden IT-Raums und an weiteren ausgewählten Messpunkten gemessen. Mit den Messungen können der Gesamtstromverbrauch der IT-Geräte im RZ1 und der eigenbetriebenen IT in Raum 1 gemessen werden. Der anteilige Stromverbrauch der Gebäudetechnik in der Nutzungsphase konnte mit Hilfe der PUE des RZ1 und des Stromverbrauchs der eigenen IT nach Formel 23 bestimmt werden. Für den oben angegebenen Messzeitraum lag der anteilige Strombedarf am RZ1 bei ca. 901.300 kWh_{el}. Davon verbrauchte die IT ca. 704.400 kWh_{el}. Die Werte für Server, Speicher und Netzwerkgeräte konnten nicht einzeln gemessen werden. Mit Hilfe von Angaben in Datenblättern zur typischen Leistungsaufnahme wurden die mittlere Leistungsaufnahme und die Strombedarfe für die Server pro Jahr wie in Tabelle 52 dargestellt abgeschätzt.⁵²

Tabelle 52: Verteilung des IT-Strombedarfes des RZ1 in der Nutzungsphase auf die IT-Subsysteme

IT-Subsystem	% Verteilung	Leistungsaufnahme	Jahresstrombedarf
Server	ca. 60 %	ca. 47,9 kW _{el}	ca. 420.000 kWh _{el}
Speicher	ca. 27 %	ca. 22,0 kW _{el}	ca. 192.500 kWh _{el}
Netzwerk	ca. 13 %	ca. 10,5 kW _{el}	ca. 91.900 kWh _{el}

Eigene.

4.1.1.3 IT-Performance und Auslastungen

Die CPU-Auslastung wird im RZ1 nicht kontinuierlich erfasst. Daher wurde eine mittlere Auslastung aller CPU des RZ1 von fünf Prozent angenommen. Den belegten Speicherplatz konnte der RZ-Betreiber für zehn Datenspeichersysteme angeben. Für alle anderen Datenspeichersysteme wurde eine pauschale Auslastung der Speicherkapazität in Höhe von 50 Prozent angenommen, so dass sich insgesamt eine Auslastung des installierten Speicherplatzes von 45,5 Prozent ergab. Die Anzahl der Lese- und Schreibzugriffe und die Datendurchsätze konnte der RZ-Betreiber nur für zwei Datenspeichersysteme angeben. Eine Abschätzung der Anzahl der Lese- und Schreibzugriffe und der Datendurchsätze der restlichen Datenspeichersysteme wurde aufgrund fehlender Anhaltspunkte nicht versucht. Hier gab es zu wenig Daten, auf Basis derer die Autoren plausible Abschätzungen hätten vornehmen können. Auch

⁵² Die konkreten Werte wurden zur besseren Lesbarkeit gerundet.

in Bezug auf den Datenverkehr mit der Außenwelt konnten durch den RZ-BEtrieber keine Daten bereitgestellt und daher von den Autoren keine Annahmen getroffen werden.

4.1.1.4 Erfolgsfaktoren und Herausforderungen der Datenerhebung

Bilanzierung des Aufwands

Zur Erfassung des Aufwands sind Angaben zum Inventar und zum Energieverbrauch notwendig. In Bezug auf das Inventar, stellte sich heraus, dass die für das RZ1 vorliegende CMDB nicht vollständig gepflegt war, auch wenn softwareseitig alle nötigen Felder angelegt sind. Die Angaben zu den CPU der Server waren zu 75 Prozent vorhanden und aktuell, aber weder die Anzahl der RAM-Module, noch die Art und die Anzahl der Festplatten waren für die Server verfügbar. Eine Nacherfassung wäre möglich gewesen, hätte aber den manuellen Zugriff auf die einzelnen Server erfordert, was für den RZ-Betreiber im Rahmen des Forschungsvorhabens bei mehr als 400 Servern zu aufwändig war. Die fehlenden Angaben zum Gewicht und zu den HE der IT konnten über Datenblätter vervollständigt werden. Detaillierte Angaben der Ausstattung der Datenspeichersysteme fehlten weitestgehend und mussten ebenfalls Datenblättern entnommen werden.

Weiterhin werden Strombedarfe im RZ1 nur raumbasiert, nicht aber getrennt nach IT-Teilsystemen erfasst. Eine gerätebasierte Erfassung von Strombedarfen wäre für die Server über die serverinternen Managements-Boards oder die eingesetzten Softwarelösungen zur Virtualisierung in Verbindung mit geeigneten Monitoring-Lösungen prinzipiell möglich gewesen. Jedoch ist die Genauigkeit derartiger Messwerte fraglich. Zudem wird der Mehrwert gerätebasierter Messungen für den derzeitigen Betrieb des RZ1 durch den Betreiber aktuell als gering eingestuft.

Bilanzierung des Nutzens

Die meisten der erforderlichen Monitoring Daten zur IT-Leistung konnten für das RZ1 nicht erhoben werden. Das Rechenleistungsvermögen konnte über die weitestgehend vorhandene CPU-Ausstattung der Server ermittelt und in Verbindung mit der angenommenen CPU-Auslastung in Höhe von fünf Prozent auch eine erbrachte Rechenleistung bestimmt werden. Zur Produktivität der meisten Datenspeichersysteme und der Netzwerkinfrastruktur konnte der Betreiber des RZ1 keine Angaben liefern.

Ein wesentlicher Grund hierfür ist die organisatorische Trennung der Fachabteilungen des IT-Managements im Unternehmen, die jeweils für die Server, Datenspeichersysteme und Netzwerke zuständig sind. Die Trennung verhinderte eine Datenerfassung durch den Ansprechpartner über alle IT-Subsysteme hinweg. Eine mit dem nötigen Zugriff auf alle Informationen der IT-Subsysteme ausgestattete integrative Rolle fehlt im Unternehmen bisher. Eine DCIM-Lösung, die Daten aus den unterschiedlichsten Monitoring-Systemen bündelt und vereinheitlicht, wird im RZ1 nicht eingesetzt. Vielmehr hätten zur Nacherfassung der IT-Leistungen durch den Ansprechpartner die internen Verantwortlichkeiten für IT-Subsysteme geklärt und entsprechende Anfragen gestellt werden müssen, was sehr zeitintensiv gewesen wäre und daher im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht praktikabel war.

4.1.2 Fallstudie RZ2

Das Unternehmen, welches das RZ2 betreibt, ist ein Full-Service-IT-Provider für Online-Kommunikation und IT-Dienstleistungen mit BSI-zertifiziertem Sicherheitsrechenzentrum. Der Unternehmenssitz befindet sich in Berlin. Geschäftlicher Schwerpunkt sind Agentur- und Systemhaus-Dienstleistungen im Bereich E-Government für Regierungen, Verwaltungen, Stiftungen, Verbände sowie im Bereich E-Business. Das Geschäftsmodell entspricht damit den Funktionstypen „Operator“ und „MSP“ nach RAL-UZ 161. Das RZ2 ist Zeichennehmer des RAL-UZ 161 „Blauer Engel für energieeffizienten Rechenzentrumsbetrieb“.

Das Unternehmen betreibt das gesamte RZ als Operator. Alle RZ-Bereiche (IT-Hard- und -Software, Gebäude, Strom, Kühlung, Datenübertragung, etc.) werden von dem Unternehmen selber verwaltet. Mit dem aktuellen Leistungsangebot kann das Unternehmen als Webhoster und MSP eingeordnet werden. Colocation wird nicht angeboten.

4.1.2.1 Inventar

Das RZ2 ist in einem Altbau (ehemaliges Wohngebäude) untergebracht. Im RZ2 ist eine IT-Anschlussleistung von etwa 83 kW_{el} installiert. Die Kühlung erfolgt über Direktverdampfer mit Innengeräten zur Aufstellung im Serverraum. Die IT-Schränke sind nach dem Warm-Kaltgang-Prinzip angeordnet. Für die Stromversorgung nutzt das RZ2 keine eigenen Anlagen. Eine NEA wird nicht benötigt. Eine zentrale USV-Anlage mit 60 kVA versorgt die IT-Geräte unterbrechungsfrei mit Strom. Die Batterien der USV-Anlage können bei Volllast der IT-Geräte zwölf Minuten überbrücken. In den IT-Schränken werden keine iPDUs eingesetzt.

Anfang des Jahres 2016 gab es im RZ2 88 physische Server, 20 Datenspeichersysteme und 57 Netzwerkgeräte. In den Servern sind 156 CPUs mit 821 Rechenkernen und 6,3 TB RAM verbaut. Für die Datenspeicherung werden 17 festplattenbasierte Datenspeichersysteme mit einer Gesamtspeicherkapazität von ca. 400 TB und drei Bandlaufwerke eingesetzt. Für die IT-Geräte ergibt sich eine elektrische Nennleistung von ca. 83 kW_{el}. Davon entfallen 58 kW_{el} auf die Server, 16 kW_{el} auf die Datenspeichersysteme und 8,5 kW_{el} auf die Netzwerkgeräte.

4.1.2.2 Energiebedarf

Für das Jahr 2016 lag der Gesamtstrombedarf des RZ2 bei ca. 490.900 kWh_{el}. Davon verbrauchten die IT-Geräte ca. 339.200 kWh_{el}, 120.000 kWh_{el} wurden für das Kühlsystem benötigt, ca. 11.500 kWh_{el} waren die Verluste der USV-Anlage sowie 22.200 kWh_{el} wurden für sonstige RZ-Verbraucher aufgewendet. Insgesamt ergeben sich im Jahresmittel eine EUE von ca. 1,4 und eine JAZ von 3,8.

Die gemessene elektrische Spitzenlast des RZ-Gesamtstrombedarfes lag bei 59 kW_{el} im November 2016. Die Spitzlast der IT-Leistung wurde im Januar 2016 mit 41 kW_{el} gemessen. Die Spitzenlast bei der Stromaufnahme des Kühlsystems wurde im Oktober 2016 mit 32 kW_{el} gemessen. Im Oktober wurde auch die maximale Wärmelast mit ca. 55 kW_{th} gemessen.

Mit Hilfe von IT-Nennleistungen aus Datenblättern und dem Verhältnis des gemessenen Stromverbrauchs der IT zur installierten Nennleistung der IT wurde die Verteilung des IT-Strombedarfes auf die Server, Datenspeichersysteme und Netzwerkgeräte abgeschätzt, wie in Tabelle 53 dargestellt.⁵³

Tabelle 53: Verteilung des IT-Strombedarfes des RZ2 in der Nutzungsphase auf die IT-Subsysteme

IT-Subsystem	rel. Verteilung	mittlere el. Leistungsaufnahme	Jahresstrombedarf
Server	ca. 68 %	ca. 26,2 kW _{el}	ca. 229.800 kWh _{el}
Speicher	ca. 22 %	ca. 8,5 kW _{el}	ca. 74.000 kWh _{el}
Netzwerk	ca. 10 %	ca. 4,0 kW _{el}	ca. 35.400 kWh _{el}

Eigene.

4.1.2.3 Auslastungen

Unter Berücksichtigung der vorgesehenen Redundanzen beträgt die maximale Kühlleistung des RZ ca. 80 kW_{th} und ist derzeit zu ca. 70 Prozent ausgelastet. Im USV-Konzept sind keine zentralen Redundanzen eingeplant. Die USV-Kapazität beträgt ca. 60 kVA und ist mit der gemessenen maximalen elektrischen

⁵³ Die konkreten Werte wurden zur besseren Lesbarkeit gerundet.

schen Leistungsaufnahme der IT im Betrieb zu ca. 70 Prozent ausgelastet. Neben der zentralen USV-Anlage gibt es noch drei kleinere dezentrale USV-Anlagen direkt in den Serverschränken.

Mit der bestehenden Gebäudetechnik ist ein weiteres Wachstum des RZ nur sehr begrenzt möglich. Vor allem die Kühlleistung und die USV-Leistung beschränken einen weiteren Ausbau. Die zur Verfügung stehende Grundfläche des RZ2 und die damit theoretisch mögliche Anzahl an Racks mit entsprechender Höhe würde ein weiteres Wachstum erlauben.

4.1.2.4 IT-Performanz

Das kontinuierliche Monitoring der IT-Last zeigt für das Jahr 2016 eine mittlere Auslastung der CPUs von ca. 14 Prozent. Die RAM-Auslastung lag bei durchschnittlich 89 Prozent. Der belegte Speicherplatz konnte nur für zwei der insgesamt 17 festplattenbasierten Datenspeichersysteme exemplarisch ermittelt werden. Für die restlichen Datenspeichersysteme wurde eine Auslastung des installierten Speicherplatzes in Höhe von 50 Prozent angenommen, so dass sich insgesamt eine Auslastung des installierten Speicherplatzes von 50,4 Prozent ergab. Für die CPUs und die externen Datenspeichersysteme war vom Januar 2016 bis Dezember 2016 ein stetiger Anstieg der Auslastung um ca. fünf Prozent erkennbar. Die RAM-Kapazität ist der begrenzende Faktor der IT-Auslastung im RZ2.

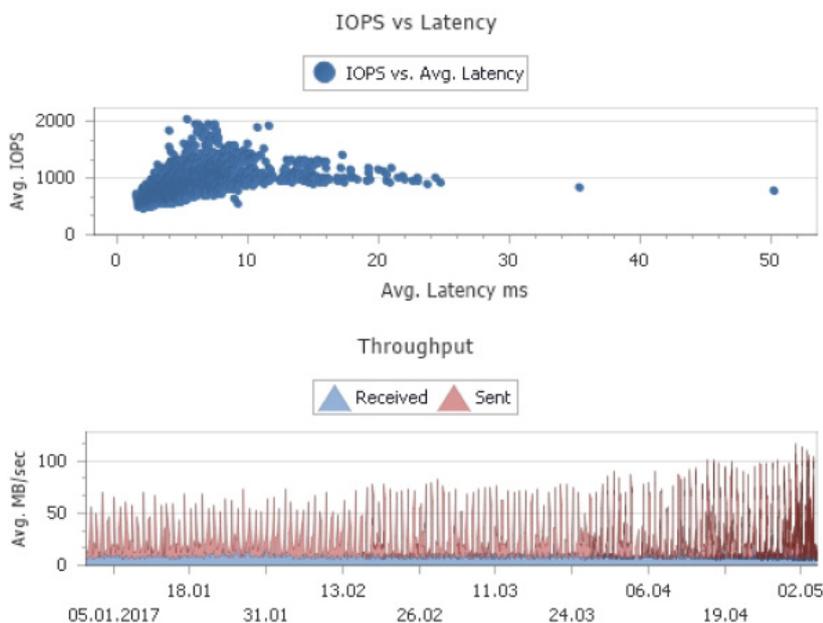
Die Messungen zu den detaillierten IT-Performanz-Werten für einzelne IT-Geräte konnten nicht kontinuierlich erfolgen. Hier war lediglich eine Einmal-Messungen als Punktbetrachtung möglich.

4.1.2.5 Erfolgsfaktoren und Herausforderungen bei der Datenerhebung:

Die Einzelmessung des Strombedarfes für jedes IT-Gerät im RZ z.B. mit iPDUs ist im aktuellen Messkonzept des RZ2 nicht vorgesehen. Auch eine automatisierte trennscharfe Erfassung des Stromverbrauches der drei IT-Geräteklassen Server, Datenspeichersysteme und Netzwerke ist in RZ2 nicht gegeben. Der IT-Strom wird bisher nur über den USV-Ausgang als Gesamtwert erfasst.

Bei den Datenspeichersystemen war bei der Datenerhebung für alle Systeme ein erhöhter Aufwand notwendig. Die Erhebung der erforderlichen Daten war nur „per Hand“ durchführbar. Hierfür mussten teilweise Grafiken aus automatisiert erstellten Berichten proprietärer Monitoring-Systeme ausgedruckt und per Hand die Daten abgelesen werden. Abbildung 38 zeigt die aus einem Speicherreport entnommenen Daten zu Transaktionsrate und Durchsatz eines ausgewählten Datenspeichersystems.

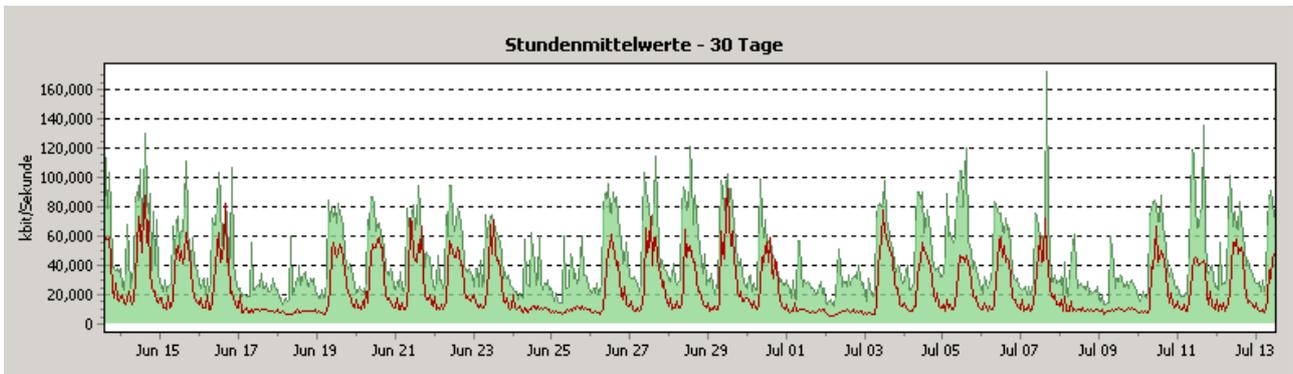
Abbildung 38: Transaktionsrate und Durchsatz eines Datenspeichersystems



Eigene.

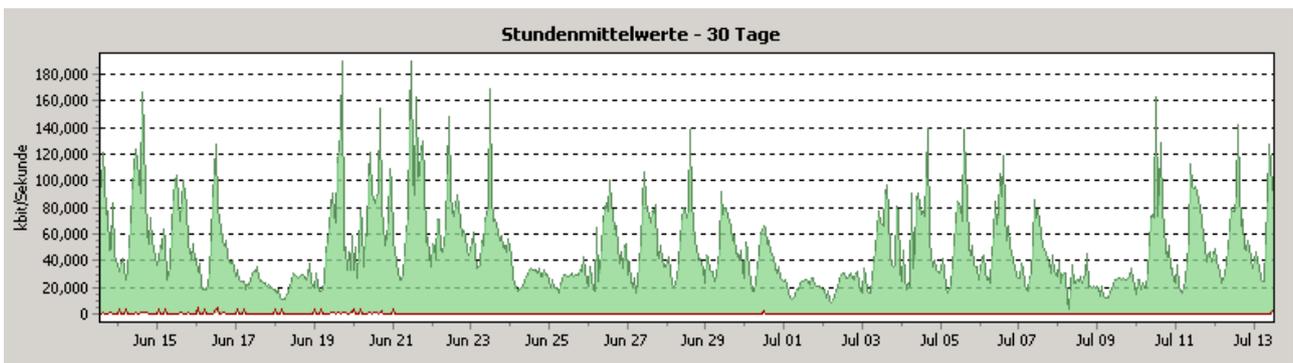
Im Bereich der Netzwerktechnik war die Überwachung des Datenverkehrs schwierig und nicht an allen gewünschten Messstellen möglich. Für das RZ2 kann nur die externe Internetanbindung überwacht werden. Die Abbildung 39 und Abbildung 40 zeigen den externen Datenverkehr zum Internet über einen Messzeitraum von 30 Tagen. Die Messungen zum Datenverkehr für die externe Anbindung zeigen im Monatsverlauf eine sehr große Schwankung. Die Werte liegen zwischen 174,5 Mb/s im Maximum und 15,4 Mb/s im Minimum. Der Durchschnittswert liegt bei ca. 70 Mb/s.

Abbildung 39: Ein- und ausgehender Datenverkehr des Router T01 für 30 Tage



Eigene.

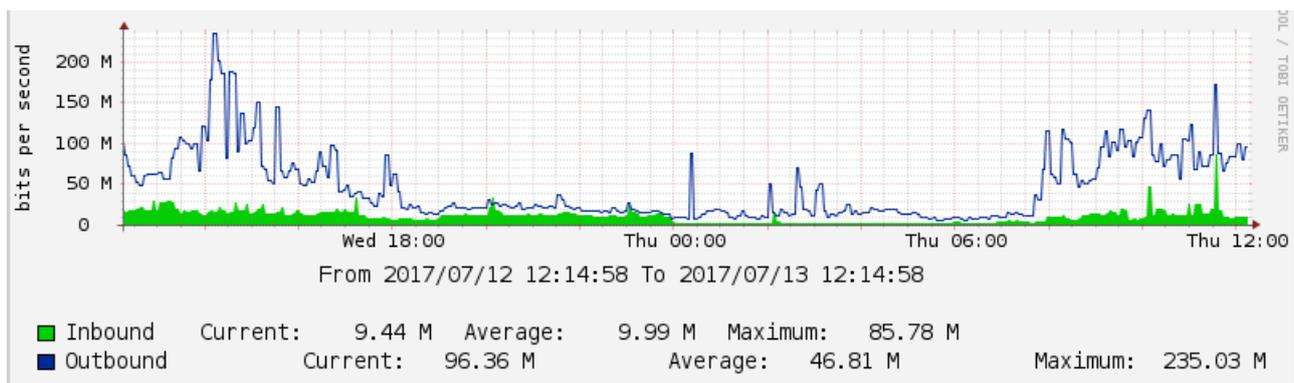
Abbildung 40: Ein- und ausgehender Datenverkehr des Router T02 für 30 Tage



Eigene.

Die Abbildung 41 zeigt den externen Datenverkehr zum Internet über einen Messzeitraum von 24 Stunden. In der Abbildung 41 wird das typische Auslastungsmuster des externen Datenverkehrs im Tagesverlauf deutlich. Zu den normalen Bürozeiten steigt die Auslastung stark an. Ab 07:00 Uhr werden die ersten Leistungsspitzen erreicht. Nach 18:00 Uhr sinken die Werte erkennbar ab. Die Leistungsspitzen in der Nacht werden durch Backups verursacht.

Abbildung 41: Ein- und ausgehender Datenverkehr über einen Messzeitraum von 24 Stunden



Eigene.

Im Rahmen der Datenerhebung für das RZ2 traten verschiedene Probleme auf. Für die Datenerhebung mussten z. B. verschiedene Organisationseinheiten (Netzwerk, Server, Datenspeicher, Gebäudetechnik) im Unternehmen eng zusammenarbeiten. Trotz sehr gut abgestimmter Organisationsprozesse gab es teilweise Schnittstellenprobleme für die Zuständigkeiten der Datenerfassung. Die ganzheitliche Datenerhebung und Auswertung musste im Rahmen des Forschungsvorhabens erst gelernt werden.

Außerdem wurde deutlich, dass eine Vielzahl von Messwerten zwar schon im laufenden RZ-Betrieb erfasst wird. Die Daten werden i. d. R. aber nur zu Alarmzwecken verwendet. D. h. falls bestimmte Alarmwerte nicht überschritten werden, werden die Daten schnell wieder gelöscht, um keinen unnötigen Speicherplatz zu verschwenden. Die Daten stehen für die Analyse dann nicht mehr zur Verfügung.

Grundsätzlich wird der Nutzen einer Energie- und IT-Performancemessung durch die Verantwortlichen des RZ2 positiv bewertet. Für eine tatsächliche Umsetzung in der betrieblichen Praxis müssen aber noch technische (Datenspeicherung, Datenmenge, etc.) und organisatorische (z. B. ganzheitliche Datenanalyse) Hindernisse behoben werden.

Bilanzierung des Aufwandes:

- ▶ Für die Ermittlung des Aufwandes sind primär Angaben zum Inventar und zu Energiebedarfen notwendig. Zur Erfassung des Inventars konnte eine CMDB genutzt werden. Die CMDB des RZ2 wird gut gepflegt, allerdings waren die für die Erhebung der im Rahmen des Projektes notwendigen Daten nur teilweise in der CMDB vorhanden. Einige Daten mussten daher nachträglich manuell ausgelesen oder Datenblättern entnommen werden, auch weil sie bisher im RZ-Betrieb keine Rolle gespielt haben.
- ▶ Die Angaben zu den CPUs waren weitestgehend vollständig vorhanden und auch in der CMDB gepflegt. Auch die Gesamtspeicherkapazitäten und die Speicherkapazität pro RAM-Modul konnte für fast alle Server ermittelt werden. Die Anzahl der RAM-Module hingegen musste aus den Angaben zur Gesamtspeicherkapazität und Speicherkapazität pro RAM-Modul berechnet werden.
- ▶ Die Anzahl der in den Servern verbauten HDDs mussten „per Hand“ über die Management-Boards ausgelesen werden. Um den Aufwand im Rahmen des Forschungsvorhabens zu begrenzen, wurden repräsentative Systeme ausgewählt und deren Daten entsprechend auf die restlichen Server übertragen. Das gleiche Vorgehen wurde auch für die Ausstattung der Server mit SSDs gewählt. Grundsätzlich werden im RZ2 nicht einzelne Speichermedien analysiert, sondern lediglich regelmäßig der insgesamt verfügbare und belegte Speicherplatz überprüft.
- ▶ Das Gewicht und die HE der Server waren in der CMDB nicht eingetragen. Diese Werte wurden aus Datenblättern ermittelt.
- ▶ Bei den Datenspeichersystemen konnten die Anzahl der Controller Enclosures und DAEs aus der CMDB bzw. den Unterlagen zum jährlichen Energieeffizienzbericht RAL-UZ 161 bereitgestellt werden.

- ▶ Für einen Teil der Netzwerkgeräte konnte die Anzahl der Geräte inklusive ihrer Funktion, Leistung und Anzahl der Ports aus der CMDB ermittelt werden. Das Gewicht musste für die Geräte „per Hand“ aus den Datenblättern bestimmt werden.
- ▶ Die elektrische Leistungsaufnahme einzelner IT-Geräte oder Racks wird im RZ2 nicht gemessen. Einzelmessungen von Strombedarfen sind bisher nicht relevant für den Betrieb des RZ2. Von den Ansprechpartnern wird ein möglicher Mehrwert derartiger Messungen zur Steigerung der Energieeffizienz zwar grundsätzlich gesehen, aber der technische und organisatorische Aufwand wird kritisch eingeschätzt. Prinzipiell ist eine derartige Messung in RZ2 für Server über deren Managements-Boards oder die Virtualisierungssoftware in Verbindung mit geeigneten Monitoring-Lösungen möglich.
- ▶ Für das Projekt wurde die elektrische Leistungsaufnahme einzelner IT-Geräte im Betrieb über das Verhältnis aus gemessener elektrischer Leistungsaufnahme der gesamten IT und der installierten Nennleistung der gesamten IT ermittelt. Es wurde vereinfachend angenommen, dass dieser Wert auf alle einzelnen Server, Datenspeichersysteme und Netzwerkgeräte übertragbar ist. Somit konnte aus der installierten Nennleistung eines jeden IT-Gerätes der tatsächliche Strombedarf im Betrieb abgeschätzt werden.
- ▶ Die Daten für die RZ-Gebäudetechnik konnten vollständig auf Basis der Daten aus dem jährlichen Energieeffizienzbericht RAL-UZ 161 ermittelt werden.

Bilanzierung des Nutzens:

Für das RZ2 konnten vergleichsweise viele Daten zur Bestimmung der IT-Leistung ermittelt werden. So konnte für die Server in Verbindung mit der Hintergrunddatenbank die Gesamtrechenkapazität der Server des RZ2 und die Rechenleistung pro Jahr (Einheit: SPECint_rate-Ops/a) bestimmt werden.

- ▶ Zum Beispiel konnte die CPU-Auslastung für einzelne Server (Referenzgeräte) ermittelt werden. Die durchschnittliche CPU-Auslastung wurde auf Basis der Referenzmessungen mit 14 Prozent angesetzt. Eine kontinuierliche Erfassung der CPU-Auslastung wäre grundsätzlich über ein Monitoring möglich (hier: direktes Auslesen der Server über das Management-Board mit dem Server Network Management Protocol (SNMP)). Diese Form des IT-Monitorings wird derzeit beim RZ2 aber noch nicht umgesetzt. Der Mehrwert für diese Messung wurde aber im Laufe der Datenerhebung erkannt.
- ▶ Die installierte Speicherkapazität für einen Teil der Datenspeichersysteme konnte aus der CMDB ermittelt werden. Für die anderen Systeme wurden die Werte aus den Modell- und Typangaben über die Datenblätter abgeschätzt.
- ▶ Die Performance-Daten für die Datenspeichersysteme werden im RZ2 nicht kontinuierlich erfasst. Für ausgewählte Datenspeichersysteme konnten die Werte für den belegten und verfügbaren Speicherplatz, die mittlere Anzahl der Zugriffe und die mittlere Datenmenge bereitgestellt werden. Für die kleineren Datenspeichersysteme waren andere Abteilungen zuständig und andere Verwaltungssysteme im Einsatz, die vom Ansprechpartner nicht ausgewertet werden konnten.
- ▶ Der interne Datenverkehr wird im RZ2 nicht gemessen. Der externe Datenverkehr konnte über einen Zeitraum von 30 Tagen stundengenau erfasst werden. Die Messungen mussten allerdings „per Hand“ durchgeführt werden und teilweise mussten die Werte aus Grafiken interpoliert und abgeschätzt werden.
- ▶ Ein wesentlicher Erfolgsfaktor für die Datenerhebung wäre ein automatischer Prozess, der alle benötigten Informationen kontinuierlich einsammelt. Diesen Prozess gibt es im RZ2 bisher nur für das Energiemonitoring; für die IT-Performance werden bisher nur wenige der geforderten Daten automatisiert erfasst.

4.1.3 Fallstudie RZ3

Das Unternehmen, welches das RZ3 betreibt, ist eines der größten IT-Beratungs- und Systemintegrationsunternehmen im deutschsprachigen Raum. Das Unternehmen bietet neben Infrastrukturlösungen

auch Betriebs- und Anwendungsdienste an. In den eigenen RZ wird vom Hosting bis zum vollständigen Outsourcing alles angeboten. Das RZ3 ist Zeichennehmer des RAL-UZ 161. Das Unternehmen betreibt das RZ3 als Operator. Alle RZ-Bereiche (Hard- und Software, Gebäude, Energieversorgung, Kühlung, Datenübertragung, etc.) werden von dem Unternehmen selbst verwaltet. Mit dem aktuellen Leistungsangebot kann das RZ3 bzw. der Betrieb für das RZ3 als reiner MSP eingeordnet werden.

4.1.3.1 Inventar

Das RZ3 ist in einem RZ-Funktionalbau untergebracht. Die maximale IT-Anschlussleistung liegt bei ca. 192 kW_{el}. Die Klimatisierung der IT-Räume erfolgt über wassergekühlte Umluftkühler. Die IT-Schränke sind nach dem Kalt-Warmgang-Prinzip aufgestellt. Die kalte Zuluft wird über einen Doppelboden in die abgeschlossenen Kaltgänge geführt. Die im Außenbereich installierten Kälteanlagen kühlen an warmen Tagen das Kaltwasser. Bei ausreichend kühlen Außenlufttemperaturen wird das Kaltwasser über ein den Kälteanlagen vorgeschaltetes trockenes Rückkühlwerk teilweise oder vollständig gekühlt (Freie Kühlung).

Für die Stromversorgung nutzt das RZ3 ausschließlich das Netz des lokalen Energieversorgers. Eine NEA dient ausschließlich der Stromversorgung bei länger anhaltenden Netzausfällen. Zwei große USV-Anlagen mit jeweils 160 kVA_{el} versorgen die IT unterbrechungsfrei mit Strom. Die Überbrückungszeit der USV-Anlagen liegt bei ca. zehn Minuten. In den Racks werden teilweise iPDU eingesetzt.

Das RZ3 verfügte Anfang 2016 über 95 physische Server, 24 externe Datenspeichersysteme und 38 Netzwerk-Geräte. In den Servern sind insgesamt 190 CPUs mit 2.010 Rechenkernen und knapp 230 GB RAM verbaut. Für die Datensicherung bzw. die Speicherung werden Datenspeichersysteme mit Festplattenspeicher mit einer Gesamtspeicherkapazität von ca. 340 TB sowie einige Bandspeicherlaufwerke eingesetzt. Für die IT-Geräte ergibt sich eine elektrische Nennleistung von ca. 192 kW_{el}. Davon entfallen 141 kW_{el} auf die Server, 22 kW_{el} auf die Datenspeichersysteme und 29 kW_{el} auf die Netzwerkgeräte. iPDU's mit nennenswertem Eigenstrombedarf waren nicht installiert. Die Netzteile der IT erfüllen fast alle den Energieeffizienzstandard 80 Plus Platin. Nahezu alle Netzteile der IT-Geräte im RZ3 sind nach dem N+1- bzw. 2N-Prinzip ausgelegt. Für die IT-Geräte im RZ3 wird grundsätzlich kein Energiesparmodus genutzt.

Die Angaben zu den CPUs waren bei RZ3 nahezu vollständig und aktuell in der CMDB vorhanden. Lediglich für 27 der 193 CPUs musste der Typ durch Abschätzung einer Serverkonfiguration aus dem Datenblatt ermittelt werden. Die Gesamtspeicherkapazitäten der RAM-Module waren vorhanden, die Speicherkapazität pro RAM-Modul und die Anzahl der RAM-Module musste abgeschätzt werden. Bei den Datenspeichersystemen konnten die Anzahl der Controller Enclosure, die Anzahl der Netzteile, die Nennleistung pro Netzteil und die Redundanz der Netzteile aus der CMDB bzw. aus den Unterlagen zum jährlichen Energieeffizienzbericht RAL-UZ 161 bereitgestellt werden.

4.1.3.2 Energiebedarf

Im RZ3 wird der Stromverbrauch für den gesamten IT-Raum und an weiteren ausgewählten Punkten vor allem für die Gebäudetechnik (Kühlsystem, USV-Verluste etc.) gemessen. Mit den Messungen können u. a. der Stromverbrauch aller IT-Geräte und des gesamten RZ3 gemessen werden.

Für das Jahr 2016 lag der Gesamtstrombedarf des RZ3 bei ca. 716.200 kWh_{el}. Davon verbrauchten die IT-Geräte ca. 478.900 kWh_{el}, ca. 130.000 kWh_{el} wurden für das Kühlsystem benötigt, ca. 75.500 kWh_{el} waren USV-Verluste sowie ca. 31.800 kWh_{el} wurden für sonstige Verbraucher aufgewendet. Insgesamt ergeben sich im Jahresmittel eine EUE von 1,5 und eine JAZ von 4,6.

Die gemessene elektrische Spitzenlast des RZ3 lag bei 118 kW_{el} im März 2016. Die elektrische Spitzenlast der IT und die maximale Wärmelast des RZ3 wurden ebenfalls im März 2016 mit ca. 65 kW_{el} und ca. 80 kW_{th} gemessen. Der Höchstwert der elektrischen Leistungsaufnahme des Kühlsystems wurde im Juni 2015 mit 59 kW_{el} gemessen.

Die Strombedarfe der Server, Speicher und Netzwerkgeräte konnten nicht vollständig einzeln gemessen werden. Auf Schrankebene sind iPDUs vorhanden, einzelne Stromabgänge werden aber nicht erfasst. Es wird nur der Strombedarf pro Rack erfasst. Mit Hilfe von Angaben in Datenblättern zur typischen Leistungsaufnahme wurden die mittlere Leistungsaufnahme und die Strombedarfe pro Jahr für die Server, Datenspeichersysteme und Netzwerkgeräte abgeschätzt, wie in Tabelle 54 dargestellt.⁵⁴

Tabelle 54: Verteilung des IT-Strombedarfes des RZ3 in der Nutzungsphase auf die IT-Subsysteme

IT-Subsystem	rel. Verteilung	mittlere el. Leistungsaufnahme	Jahresstrombedarf
Server	ca. 73 %	ca. 40,2 kW _{el}	ca. 351.800 kWh _{el}
Speicher	ca. 12 %	ca. 6,4 kW _{el}	ca. 55.800 kWh _{el}
Netzwerk	ca. 15 %	ca. 8,1 kW _{el}	ca. 71.300 kWh _{el}

Eigene.

4.1.3.3 Auslastungen

Unter Berücksichtigung der Redundanzen beträgt die maximale Kühlleistung des RZ3 ca. 180 kW_{th}. Die Kühlkapazität ist damit in der Spitze zu ca. 45 Prozent ausgelastet. Im USV-Konzept sind Redundanzen von 2N eingeplant. Die maximale USV-Kapazität beträgt ca. 160 kVA und ist mit der gemessenen maximalen IT-Leistung im Betrieb zu ca. 45 Prozent ausgelastet. Die für IT-Geräte verfügbare Gesamtfläche beträgt 165 m² und ist zu ca. 60 Prozent belegt. Der begrenzende Faktor für ein weiteres IT-Wachstum ist die verfügbare IT-Fläche. Mit einer höheren elektrischen Leistungsdichte in den Serverschränken könnte aber ein weiteres Wachstum realisiert werden.

4.1.3.4 IT-Performanz

Die IT-Performance konnte im RZ3 nur für ausgewählte Referenzgeräte (Server-Cluster) gemessen werden. Auf Grund der sehr homogenen IT-Landschaft erscheint diese Vorgehen bei RZ3 jedoch als ausreichend. Das kontinuierliche Monitoring der IT-Last zeigt mit diesem Ansatz für das Jahr 2016 eine mittlere Auslastung der CPUs von ca. 3,8 Prozent. Die RAM-Auslastung lag bei durchschnittlich 41,5 Prozent und die externen Datenspeichersysteme waren zu 58,5 Prozent ausgelastet. In Bezug auf den Datenverkehr mit der Außenwelt konnten keine Informationen bereitgestellt werden, so dass auch keine plausiblen Annahmen getroffen werden konnten.

4.1.3.5 Erfolgsfaktoren und Herausforderungen der Datenerhebung

Bei der Datenerhebung für RZ3 wurden verschiedene Probleme festgestellt.

- ▶ Wie auch bei den anderen RZ-Fallstudien mussten verschiedene Organisationseinheiten (Netzwerk, Server, Datenspeichersysteme, Gebäude) im Unternehmen eng zusammenarbeiten. Das RZ3 hat in seiner Organisation bereits eine übergeordnete Stelle, die für eine ganzheitliche Datenerhebung und Auswertung verantwortlich ist. Für die im Projekt benötigten Daten mussten aber auch im RZ3 neue Abstimmungsprozesse umgesetzt werden. Aufgrund der Größe der Organisation im RZ3 war ein größerer Aufwand für die interne Kommunikation nötig.
- ▶ Wie bei RZ2 wird auch hier eine Vielzahl von Messwerten kontinuierlich im laufenden RZ-Betrieb erfasst. Die für das Projekt relevanten Daten werden i. d. R. aber nur zu Alarmzwecken verwendet. Diese Daten stehen dann für die Analyse nicht mehr zur Verfügung.
- ▶ Der Nutzen einer Energie- und IT-Performancemessung wird bei den Verantwortlichen von RZ3 schon seit langer Zeit für den Betrieb des RZ genutzt. Allerdings gibt es bisher keine übergreifende Analyse für den Zusammenhang zwischen IT-Performanz, RZ-Auslastung und RZ-Energiebedarf. Die

⁵⁴ Die konkreten Werte wurden zur besseren Lesbarkeit gerundet.

Verantwortlichen von RZ3 sehen hier durchaus Potenzial für die interne Nutzung, aber auch für die Anwendung (Dienstleistung/Beratung) bei den Kunden des RZ3. Die sehr homogene IT-Landschaft im RZ3 war bei der Datenerhebung ein großer Vorteil. Die Daten für die Gebäudetechnik konnten ohne Probleme vollständig auf Basis der Daten aus dem jährlichen Energieeffizienzbericht RAL-UZ 161 ermittelt werden.

Bilanzierung des Aufwandes:

- ▶ Für die Angaben zum Inventar und zum Energiebedarf (Aufwand) konnte die vorhandene CMDB genutzt werden. Die CMDB für das RZ3 wird gut gepflegt – eine regelmäßige Auswertung der Bestandsdaten wird vorgenommen. Allerdings wurden nicht alle für die Erhebung im Rahmen des Projektes notwendigen Daten in die CMDB eingegeben. Diese fehlenden Daten mussten aufwändig „per Hand“ und in Abstimmung mit verschiedenen Organisationseinheiten erhoben werden.
- ▶ Für das RZ3 sind Einzelmessungen der IT für separate IT-Geräte nicht dokumentiert. Zur Bestimmung der IT-Leistung mussten daher Referenzgeräte „per Hand“ vermessen werden.
- ▶ Bei den Servern waren die Angaben zu den CPUs nahezu vollständig und aktuell in der CMDB vorhanden. Auch die Gesamtspeicherkapazitäten der RAM-Module der Server waren verfügbar, die Speicherkapazität pro RAM-Modul und die Anzahl der RAM-Module musste jedoch abgeschätzt werden.⁵⁵
- ▶ Das Gewicht und die HE der Server war nicht in der CMDB vorhanden. Die Werte wurden aus den Datenblättern der Server ausgelesen. Die Gewichtsangabe wird bisher nur als Planungsgröße für die Statik des Doppelbodens betrachtet. Für den RZ-Betrieb ist diese Größe bisher nicht relevant.
- ▶ Die Daten zu der Anzahl der HDDs und ihre jeweilige Speicherkapazität waren in der CMDB nicht vorhanden. Hier wurde nach Rücksprache mit den Verantwortlichen eine durchschnittliche Anzahl bzw. Speicherkapazität abgeschätzt. Hinweis: SSDs werden im RZ3 nicht eingesetzt. Bisher wird im RZ3 nur die Gesamtspeicherkapazität als relevant erachtet.
- ▶ Das Gewicht der Datenspeichersysteme musste per Hand aus den Datenblättern ermittelt werden. Diese Werte wurden bisher nur für einzelne sehr große Datenspeichersysteme dokumentiert, wenn z. B. die Statik des Doppelbodens im IT-Raum für die Aufstellung geprüft werden musste.
- ▶ Für die Netzwerkgeräte konnten nur sehr wenige Daten aus der CMDB ermittelt werden. Fast alle Daten mussten hier händisch aus den Datenblättern ermittelt werden. In Abstimmung mit den Verantwortlichen des RZ3 wurden hier typische Konfigurationen der Netzwerkgeräte abgeschätzt. Das Gewicht der Netzwerkgeräte konnte auf Basis der Datenblätter per Hand ermittelt werden. Die Herstellerbezeichnung und das Modell waren als Information ausreichend dafür.
- ▶ Die mittlere elektrische Leistungsaufnahme pro Server wurde im RZ3 bisher nicht erfasst. Hier gab es nur Messwerte für den Gesamtstrombedarf der IT. Die Strombedarfe der Server wurden aus der gemessenen durchschnittlichen Auslastung in Verbindung mit der Serverkonfiguration abgeschätzt. Die Messung der Leistungsaufnahme der Server wäre über die serverinternen Managements-Boards oder die eingesetzten Softwarelösungen zur Virtualisierung in Verbindung mit geeigneten Monitoring-Systemen prinzipiell möglich. Von den Ansprechpartnern im RZ3 wird der Mehrwert derartiger Messungen nicht gesehen, da die Abrechnung für die Kunden nicht auf Basis von Strommessungen erfolgt.
- ▶ Die elektrische Leistungsaufnahme der Netzwerkgeräte wird im RZ3 nicht separat gemessen. Für das Projekt wurden diese Werte über den Faktor aus gemessener IT-Gesamtleistung im Verhältnis zur installierten IT-Nennleistung ermittelt. Die Bedeutung der Energieeffizienz der Netzwerktechnik wird von den Verantwortlichen des RZ3 als eher gering eingestuft, da die elektrische Leistung im Vergleich zu den Servern und Datenspeichersystemen eher gering ist.

⁵⁵ Die RAM-Auslastung im Verhältnis zu der Gesamtspeicherkapazität der RAM-Module ist ein Alarmwert bei RZ3. Wenn die RAM-Auslastung an die Grenze der Gesamtspeicherkapazität kommt, wird eine Alarmmeldung an den Administrator geschickt, da eine Überlastung des RAM im schlimmsten Fall zum Ausfall des Servers führen würde.

- ▶ Die Daten für die RZ-Gebäudetechnik konnten ohne Probleme vollständig auf Basis der Daten aus dem jährlichen Energieeffizienzbericht RAL-UZ 161 ermittelt werden.

Bilanzierung des Nutzens:

- ▶ Für das RZ3 wurden die Daten zur Bestimmung der IT-Leistung der Server auf Basis von Referenzmessungen der Auslastungen der CPU ermittelt. In Verbindung mit der Hintergrunddatenbank zur Leistungsfähigkeit der verbauten CPU konnte die Gesamtrechenkapazität des RZ und die erbrachte Rechenleistung pro Jahr [SPECint_rate-Ops/a] abgeschätzt werden. Die CPU-Auslastung der Server wurde im Rahmen des IT-Monitorings für das RAL-UZ bereits als monatlicher Mittelwert dokumentiert. Die Messwerte der Auslastung für einzelne CPUs werden derzeit nicht festgehalten. Die Erfassung der CPU-Last für einzelne CPU ist aber grundsätzlich möglich.
- ▶ Für alle externen Datenspeichersysteme konnte die installierte Speicherplatzkapazität aus der CMDB ermittelt werden. Die genaue Anzahl der verbauten HDD konnte über die Gesamtspeicherkapazität in Verbindung mit den Angaben in Datenblättern zu den möglichen Ausstattungsvarianten mit HDD abgeschätzt werden. Der insgesamt belegte Speicherplatz wurde über die bereits gemessene und in Anlage 2 RAL-UZ 161 dokumentierte mittlere Auslastung der Speichermedien im RZ3 ermittelt.
- ▶ Die Leistungsdaten der Datenspeichersysteme in Bezug auf die Anzahl und den Datendurchsatz der Lese- und Schreiboperationen im Betrieb waren leider nicht vorhanden und konnten im Rahmen des Forschungsvorhabens auch nicht plausibel abgeschätzt werden.
- ▶ Die erforderlichen Daten zum Datenverkehr mit der Außenwelt wurden von RZ3 nicht zur Verfügung gestellt, da diese teilweise als „geheim“ eingestuft werden.

4.1.4 Gegenüberstellung der Ergebnisse der drei Fallstudien

Tabelle 55 fasst die Ergebnisse der Erfassung der zur Berechnung der definierten Kennzahlen erforderlichen Eingabedaten in Bezug auf ihre Verfügbarkeit zusammen.

Tabelle 55: Übersicht der Eingabeparameter mit Verfügbarkeit der Daten für die Fallbeispiele

Fallbeispiel	RZ1	RZ2	RZ3
Aufwand			
Inventar	Anzahl, ND, Gewicht	Anzahl, ND, Gewicht	Anzahl, ND, Gewicht
Speicher	"	"	"
Netzwerk	"	"	"
Server	CPU, RAM, HDD	CPU, RAM, HDD	CPU, RAM, HDD
USV	Leistung, Batterie	Leistung, Batterie	Leistung, Batterie
Kältemittel	Typ, Menge	Typ, Menge	Typ, Menge
Energie			
Strombedarf	RZ, IT-Gerät	RZ, IT-Gerät	RZ, IT-Gerät
Wasser	Verbrauch	Verbrauch	Verbrauch
Nutzen			
Server	CPU-Last	CPU-Last	CPU-Last
Speicher	GB, IO/s, GB/s	GB, IO/s, GB/s	GB, IO/s, GB/s
Netzwerk	Gb/s extern	Gb/s extern	Gb/s extern

Eigene. Rot = Daten waren nicht vollständig verfügbar, Grün = Daten waren verfügbar, Grau = Daten waren nicht relevant (keines der Fallbeispiele hatte eine Adiabate Kühlung, daher war der Wasserbedarf im Betrieb nicht relevant)

Bei keinem der Fallbeispiele war das Gewicht der IT-Geräte in einer zentralen Datenbank verfügbar. Das Gewicht konnte aber für alle Fallbeispiele aus den Datenblättern der IT-Geräte „per Hand“ recherchiert werden. Die Daten zu Anzahl und Kapazität der HDDs waren in keinem der Fallbeispiele vollständig vorhanden. Die Praxis zeigt, dass bisher nur die Gesamtspeicherkapazität betrachtet wird.

Der Strombedarf der einzelnen IT-Geräte wird bei den Fallbeispielen bisher nicht separat erfasst. Bisher stellt sich in der Praxis u. a. die Frage nach dem Verhältnis von Nutzen und Aufwand der exakten Erfassung des Strombedarfes für jedes IT-Gerät. Für den in dieser Studie gewählten Ansatz sind Einzelmessungen allerdings insofern entscheidend, dass mindestens eine trennscharfe Erfassung der Strombedarfe nach Subsystemklassen Server, Datenspeicher und Netzwerkgeräte möglich sein muss.

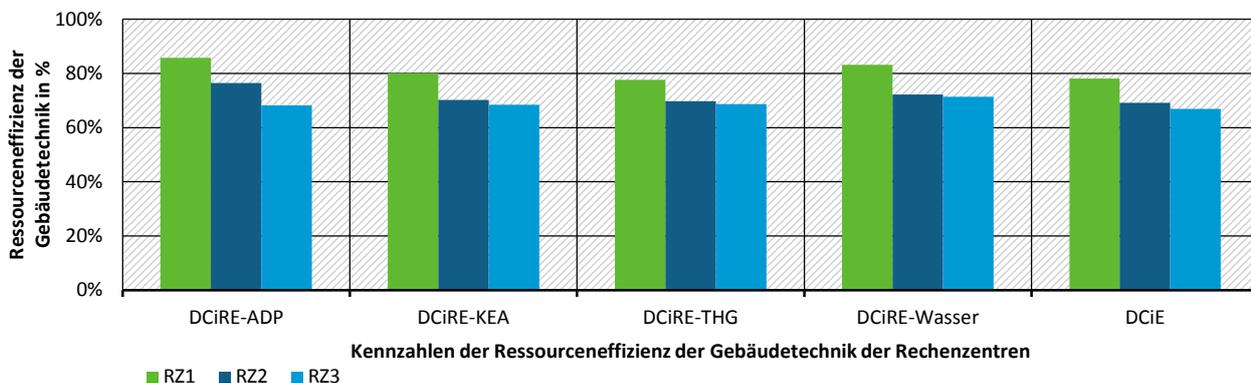
Auf der Nutzenseite werden von zwei der drei RZ bisher nur die CPU-Lasten für die Server kontinuierlich erfasst. Das RZ1 erfasst noch überhaupt keine Daten auf der Nutzenseite. Für das RZ2 konnten in enger Zusammenarbeit mit den Administratoren mit erhöhtem Aufwand alle relevanten Daten auf der Nutzenseite beispielhaft, aber nicht flächendeckend erhoben werden. Eine automatische Erfassung und Auswertung von Produktivitätsdaten der IT-Geräte gab es in keinem der drei Fallbeispiele.

Die fehlenden Daten z. B. zum Gewicht der IT-Geräte wurden nach Möglichkeit mittels eigener Recherchen in Datenblättern und über die Bildung von Analogien vervollständigt. Mit dem Wissen um die getroffenen Annahmen zur Vervollständigung der Datensätze werden im Folgenden die Ergebnisse der Berechnung der Kennzahlen gegenübergestellt. Die für die RZ ermittelten Kennzahlenwerte sind nicht in vollem Maße repräsentativ, da nicht nur gemessene Daten zugrunde liegen, sondern punktuell Daten über Annahmen ergänzt werden mussten, die von den tatsächlichen Gegebenheiten abweichen können. Die den Berechnungen zugrunde liegenden Rohdaten zu den drei Fallbeispielen finden sich in Tabelle 92 bis Tabelle 97 im Abschnitt 8.6 im Anhang. Notwendige Annahmen wurden stets konservativ und für alle RZ möglichst einheitlich getroffen, so dass die errechneten Kennzahlenwerte erste Anhaltspunkte bieten, in welchen Bereichen sich mögliche Benchmarks bewegen könnten.

Ressourceneffizienz der Gebäudetechnik

Abbildung 42 stellt die Ausprägungen der Kennzahlen zur Bewertung der Ressourceneffizienz der Gebäudetechnik von RZ über den Lebensweg und die in der Praxis etablierte DCiE zur Bewertung der Energieeffizienz der Gebäudetechnik von RZ in der Nutzungsphase für die drei untersuchten RZ dar. Die vier Ressourceneffizienz Kennzahlen sind jeweils definiert als das Verhältnis der Ressourceninanspruchnahme der IT zur Ressourceninanspruchnahme des gesamten RZ. Je geringer die Ressourceninanspruchnahme durch die Gebäudetechnik eines RZ ausfällt, desto größer werden die Kennzahlenwerte. Der ideale Wert ist 100 Prozent. In diesem Fall nimmt die Gebäudetechnik keine Ressourcen in Anspruch bzw. die für ein RZ bilanzierte Ressourceninanspruchnahme entfällt vollständig auf die IT.

Abbildung 42: Ressourceneffizienz der Gebäudetechnik der Rechenzentren



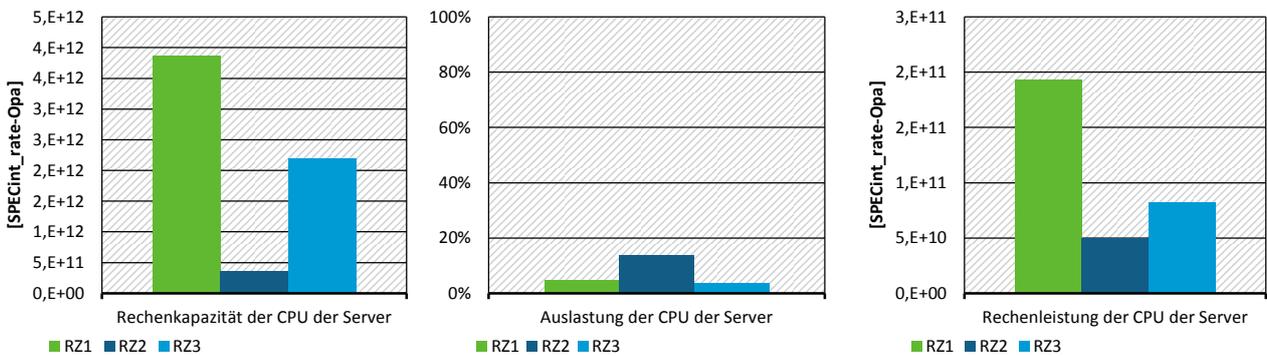
Eigene.

Deutlich wird in Abbildung 42, dass das RZ1 in allen Wirkungskategorien eine höhere Ressourceneffizienz der Gebäudetechnik als RZ2 und RZ3 ausweist. Ersichtlich wird auch, dass sich die $DCiRE_{KEA}$ und $DCiRE_{THG}$ gleichen. Dies liegt daran, dass für diese Kennwerte der Energiebedarf in der Nutzungsphase entscheidend ist und keines der RZ Anlagen zur Eigenerzeugung von Strom betreibt. Zudem setzt keines der RZ Adiabate Kühlung ein, so dass der Indikator $DCiRE_{Wasser}$ der Verteilung der $DCiRE_{KEA}$ und $DCiRE_{THG}$ folgt. Bei einem RZ mit Adiabater Kühlung würde der Indikator $DCiRE_{Wasser}$ einen geringeren Wert und die $DCiRE_{KEA}$ und die $DCiRE_{THG}$ höhere Werte erreichen, da in diesem Fall ein Teil des Energieverbrauchs in der Nutzungsphase durch den Verbrauch von Wasser substituiert werden würde.

Ressourceneffizienz der Server

Abbildung 43 stellt die Rechenkapazität, Auslastung und Rechenleistung der CPU der Server der RZ gegenüber. Trotzdem das RZ1 im Vergleich zum RZ2 eine zehnfache Rechenkapazität aufweist, erbringt es aufgrund der geringen Auslastung der CPUs nur eine vierfache Rechenleistung. Gleiches gilt für das RZ3, welches eine fünffache Rechenkapazität vorhält, aber nur eine etwa doppelt so große Rechenleistung wie das RZ2 erbringt.

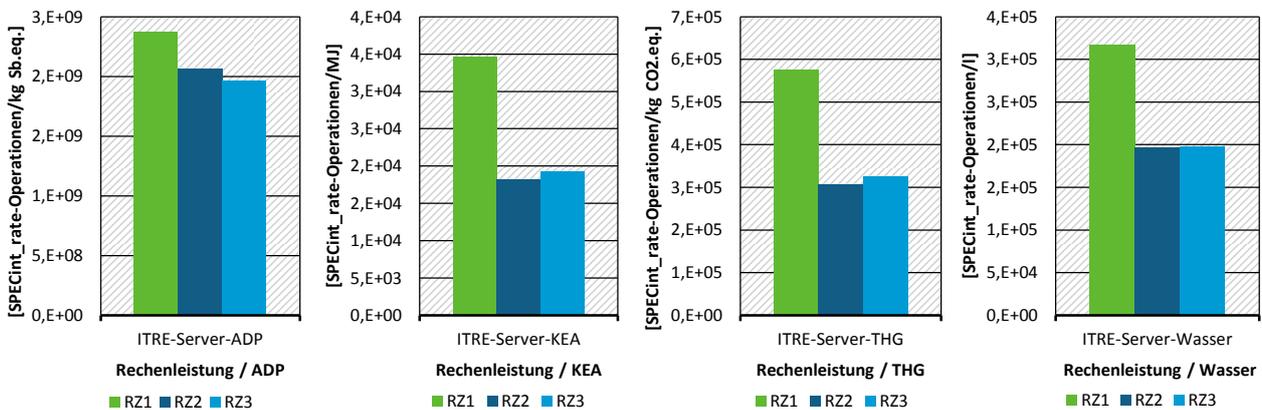
Abbildung 43: Rechenkapazität, CPU-Auslastung und Rechenleistung der Server der Rechenzentren



Eigene.

Abbildung 44 stellt die Ausprägungen der vier Kennzahlen zur Bewertung der Ressourceneffizienz der Server über den Lebensweg für die RZ dar. Die vier Kennzahlen sind jeweils definiert als das Verhältnis der von den CPU erbrachten Rechenleistung und der Ressourceninanspruchnahme der Server über den Lebensweg. Je größer die Werte, desto besser ist die Ressourceneffizienz der Server. Theoretischer Maximalwert ist unendlich. Die Einheiten variieren in Abhängigkeit von der Wirkungskategorie.

Abbildung 44: Ressourceneffizienz der Server der Rechenzentren



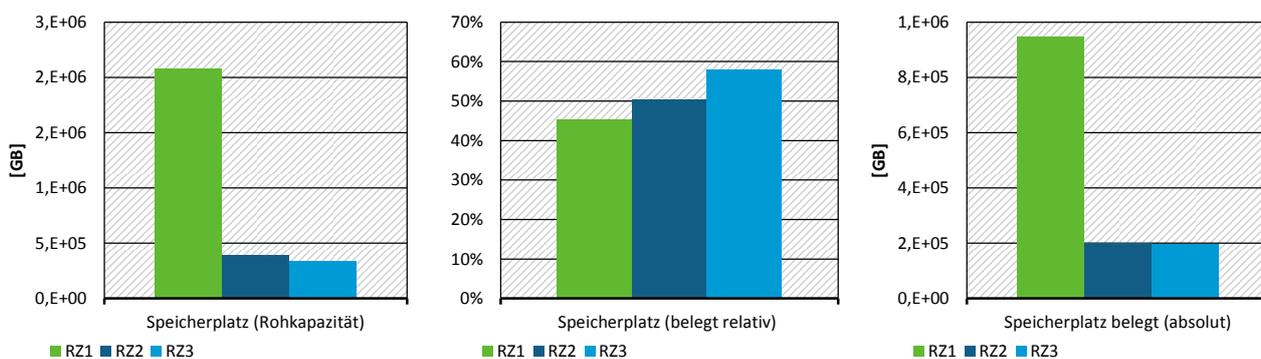
Eigene.

Abbildung 44 zeigt, dass die Server des RZ1 in jeder der vier betrachteten Wirkungskategorien die höchste Ressourceneffizienz aufweisen, wohingegen RZ2 und RZ3 jeweils ähnliche Werte erreichen. Der Grund für die hohe Rohstoffeffizienz der Server des RZ2 ($ITRE_{Server, ADP}$) trotz geringerer Rechenkapazität der Server liegt in der höheren Auslastung der CPUs und in der höheren Nutzungsdauer der Server von durchschnittlich acht Jahren (RZ1 und RZ3 im Durchschnitt jeweils vier Jahre), die dafür sorgt, dass die Ressourcenaufwände der Herstellung, Distribution und Entsorgung auf mehr Lebensjahre verteilt werden. Die $ITRE_{Server, KEA}$ und $ITRE_{Server, THG}$ werden aufwandseitig vor allem durch den Stromverbrauch in der Nutzungsphase geprägt. Der hohe statische Stromverbrauch von Servern im aktiven Leerlauf sorgt dafür, dass die rechenleistungsstarken, aber sehr gering ausgelasteten Server des RZ3 und die rechenleistungsschwachen, aber deutlich höher ausgelasteten Server des RZ2 im Ergebnis fast die gleiche Ressourceneffizienz erreichen.

Ressourceneffizienz der Datenspeichersysteme

Aufgrund fehlender flächendeckender Informationen zur Anzahl und zum Datenvolumen der Lese- und Schreibvorgänge der Datenspeichersysteme der untersuchten Rechenzentren und der Unmöglichkeit, ohne Anhaltspunkte diesbezüglich plausible Annahmen zu treffen, wurden für die Datenspeicherung nur die Ressourceneffizienzkennzahlen in Hinblick auf den belegten Speicherplatz berechnet. Auch konnten nur für vereinzelte Datenspeichersysteme echte Messdaten in Bezug auf die Anzahl der installierten Festplatten, ihre Speicherplatzkapazitäten und den belegten Speicherplatz erhoben werden. Für Datenspeichersysteme ohne vollständige Angaben wurde die in den Datenblättern in Bezug auf die Anzahl der Festplatten und den Speicherplatz pro Festplatte ausgewiesene Maximalkonfiguration zugrunde gelegt und für diese Datenspeichersysteme eine Speicherplatzbelegung in Höhe von 50 Prozent angenommen. Die mit den Annahmen und echten Messdaten für die drei RZ bilanzierte Speicherplatzkapazität und die relative und absolute Speicherplatzbelegung der Datenspeichersysteme stellt Abbildung 45 dar (Rohdaten siehe Tabelle 93 im Anhang).

Abbildung 45: Speicherplatzkapazität sowie relative und absolute Speicherplatzbelegung der Datenspeichersysteme der Rechenzentren

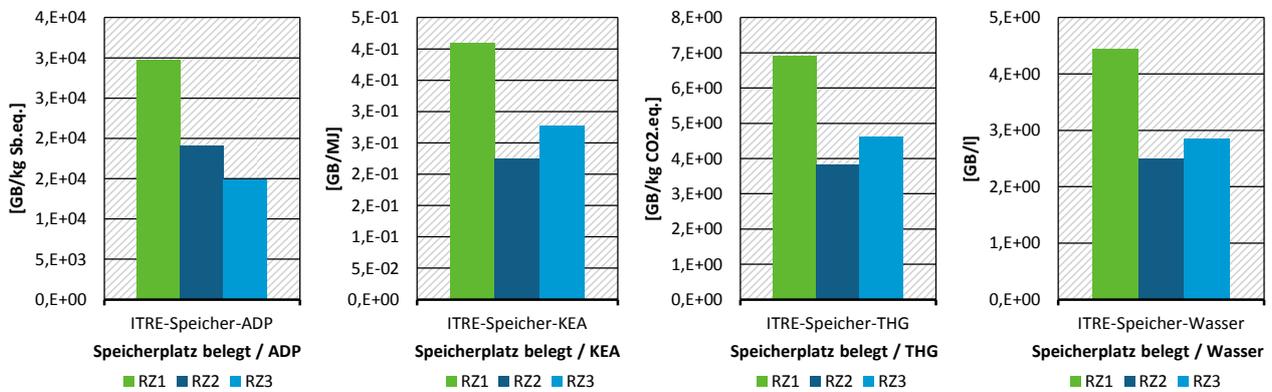


Eigene.

Abbildung 46 verdeutlicht die Ausprägung der Kennzahlen zur Bewertung der Ressourceneffizienz der Datenspeichersysteme in Bezug auf den belegten Speicherplatz für die RZ. Die Kennzahlen sind jeweils definiert als das Verhältnis des belegten Speicherplatzes zur Ressourceninanspruchnahme der Datenspeichersysteme über den Lebensweg. Auch hier erreicht das RZ1 gegenüber RZ2 und RZ3 die höchsten (und damit besten) Werte. Dies liegt daran, dass für das RZ1 überwiegend kapazitätsoptimierte HDD bilanziert wurden, die einen geringen Strombedarf in der Nutzungsphase und eine sehr hohe Speicherkapazität pro HDD haben. Beim Vergleich der mit ähnlicher Speicherplatzkapazität ausgestatteten Datenspeichersysteme des RZ2 und RZ3 wirken sich die hohen Lebensdauern der Datenspei-

chersysteme des RZ2 positiv auf die Ausprägung der Ressourceneffizienzkennzahl $ITRE_{\text{Speicher, ADP}}$ aus, wohingegen die $ITRE_{\text{Speicher, KEA}}$ und $ITRE_{\text{Speicher, THG}}$ aufwandsseitig durch den Stromverbrauch in Nutzungsphase dominiert werden. Hier kommt dem RZ3 der Einsatz von 2,5"-HDD zugute, die gegenüber den 3,5"-HDD des RZ2 einen geringeren Stromverbrauch pro Festplatte im Betrieb aufweisen.

Abbildung 46: Ressourceneffizienz der Datenspeichersysteme der Rechenzentren

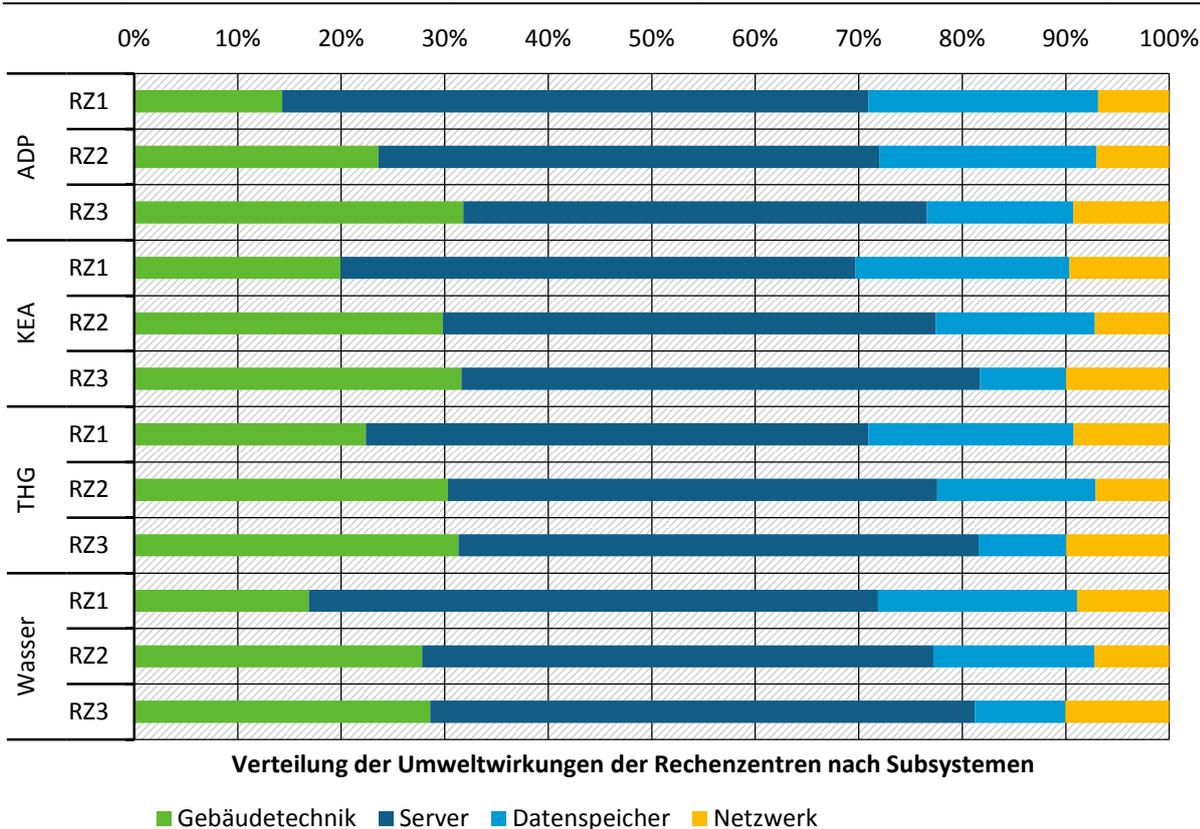


Eigene.

Verteilungen der Ressourceninanspruchnahme nach Subsystemen und Lebenszyklusphasen

Neben den Ressourceneffizienzkennzahlen errechnet das KPI4DCE-Tool die Verteilungen der Ressourceninanspruchnahme nach Subsystemen und Lebenszyklusphasen. Abbildung 47 zeigt die relative Verteilung der Ressourceninanspruchnahme auf die Subsysteme der RZ. Während in allen Bereichen und bei allen RZ die Server die meisten und die Netzwerke die wenigsten Ressourcen in Anspruch nehmen, ergibt sich bei der Gebäudetechnik und den Datenspeichersystemen ein heterogenes Bild. Hier ist entscheidend, welches RZ und welche Wirkungskategorie betrachtet werden.

Abbildung 47: Relative Verteilung der Umweltwirkungen der Rechenzentren nach Subsystemen

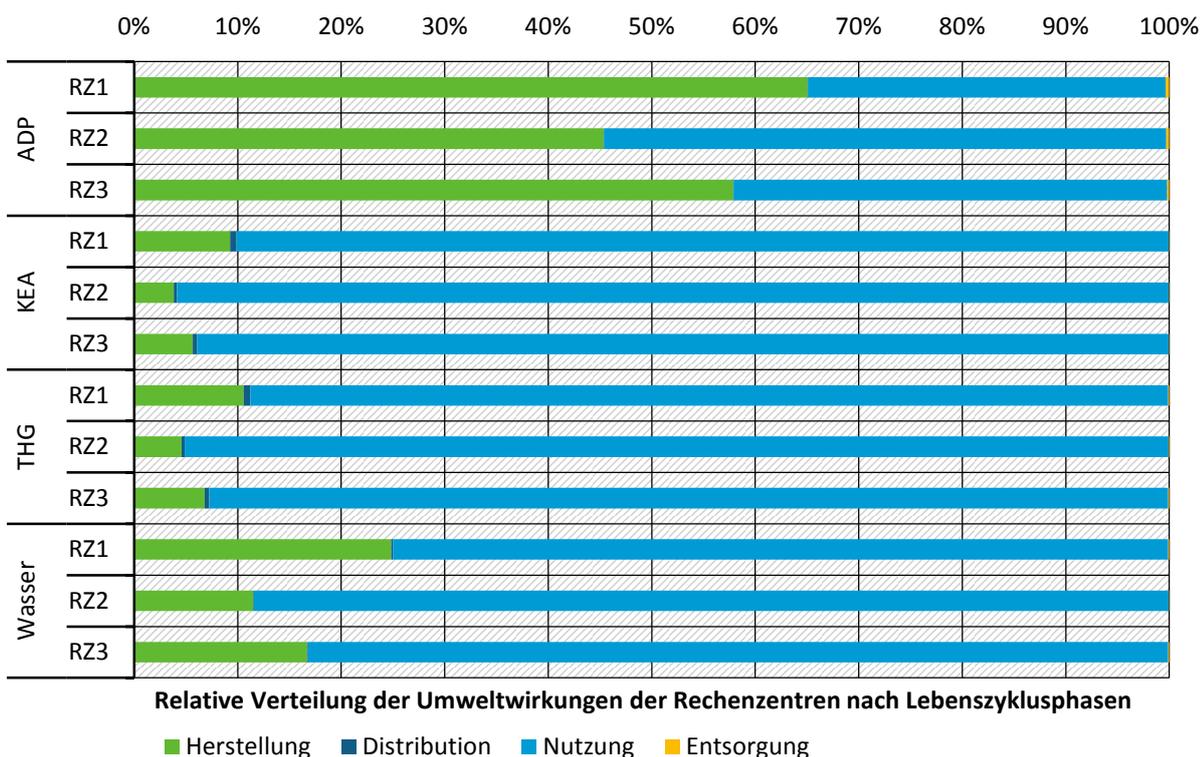


Eigene.

Abbildung 48 stellt die relative Verteilung der Ressourceninanspruchnahme der RZ auf die Lebenszyklusphasen dar. Deutlich wird, dass die Ressourceninanspruchnahmen der Distribution und Entsorgung im Vergleich zur Herstellung und Nutzung keinen Einfluss haben und vernachlässigbar sind. Die Berechnungsvorschriften der Kennzahlen bzw. das KPI4DCE-Tool kann dementsprechend vereinfacht werden. Die Herstellung hat bei den üblichen Nutzungsdauern der IT (drei bis fünf Jahre) den größten Anteil am abiotischen Rohstoffverbrauch. Steigende Lebensdauern führen zu einem abnehmenden, verringerte Lebensdauern zu einem höheren Anteil der Ressourceninanspruchnahme der Herstellung. Im Gegenzug hat die Nutzungsphase bei den drei untersuchten RZ einen Anteil am kumulierten Energieaufwand und am Treibhausgaspotenzial von jeweils über 90 Prozent.

Die Herstellung spielt für den kumulierten Energieaufwand und das Treibhausgaspotenzial bei üblichen Nutzungsdauern eine untergeordnete Rolle. Steigende Lebensdauern führen zu einem höheren Anteil, verringerte Lebensdauern zu einem abnehmenden Anteil der Nutzungsphase an der Ressourceninanspruchnahme. Beim Wasserverbrauch (Wasser) dominiert die Nutzungsphase gegenüber der Herstellungsphase mit Werten zwischen 75 Prozent und 88 Prozent. Da keines der RZ Adiabate Kühlung betreibt, ist der Wasserverbrauch der RZ in der Nutzungsphase ausschließlich auf die Erzeugung des zum Betrieb der RZ erforderlichen Stroms zurückzuführen. Die Wasserverbräuche der Distributions- und Entsorgungsphase sind vernachlässigbar.

Abbildung 48: Relative Verteilung der Umweltwirkungen der Rechenzentren nach Lebenszyklusphasen



Eigene.

Keines der RZ betreibt eigene Anlagen zur dauerhaften Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien oder mittels Erdgas oder Diesel. Daher gleichen sich in Abbildung 47 und Abbildung 48 die relativen Verteilungen des KEA und des THG der drei RZ. Zudem setzt kein RZ Adiabate Kühlung ein.

4.1.5 Zusammenfassende Bewertung der Anwendbarkeit

Die größte Herausforderung der praktischen Anwendung des Kennzahlensystems und des KPI4DCE-Tools ist die Datenerhebung im Bereich des IT-Monitorings. Insbesondere für die Server und die externen Speicher gibt es eine Vielzahl von Daten, die bisher nicht für die ganzheitliche Auswertung im Zusammenhang mit der Ressourceneffizienz genutzt werden.

Die Erfassung von Produktivitätsdaten der Datenspeichersysteme und des Datenverkehrs scheinen die größten Hürden zu sein. Keines der untersuchten RZ konnte im ausreichenden Umfang Daten liefern. Performancemessdaten für einzelne Datenspeichersysteme und Netzwerkgeräte sind zwar vorhanden, werden aber fast ausschließlich als Alarmwerte genutzt und nicht kontinuierlich ausgewertet.

Auch Strommessungen auf Ebene einzelner IT-Geräte, um den Strombedarf der Subsysteme Server, Datenspeicher und Netzwerkgeräte trennscharf erfassen zu können, sind nicht vorhanden. Derartige Messungen sind bei der Verwendung von iPDUs grundsätzlich möglich. Bisher sehen die RZ-Betreiber aber keinen konkreten Nutzen in dieser detaillierten Datenerfassung. Der IT-Gesamtstrombedarf wird für die Analyse der RZ-Betriebskosten als ausreichend erachtet.

Zudem sind einige wichtige Daten für den Ressourcenbedarf der IT-Geräte nicht in den CMDB enthalten. Teilweise können diese Daten aus den Datenblättern mit guter Genauigkeit ermittelt werden (z. B. das Gewicht), teilweise können die Daten aber auch nur abgeschätzt werden, wenn die genaue Konfiguration des IT-Gerätes nicht bekannt ist. Aus Datenblättern geht wiederum nicht immer hervor, auf welche Konfiguration sich eine Gewichtsangabe bezieht.

Große Herausforderungen gab es auch in Bezug auf die Nutzung des KPI4DCE-Tools. Bspw. ist die Unterscheidung von Datenspeichersystemen und Servern nicht immer eindeutig, der Übergang in der Praxis ist fließend. Dateiserver und Datenbankserver beherbergen im RZ oft eine Vielzahl von Festplatten und sind damit auch ein Datenspeichersystem (Hauptaufgabe ist das Speichern und nicht das Rechnen). Umgekehrt sind Datenspeichersysteme zwar für Speicheraufgaben optimiert, umfassen aber wie die Server auch CPUs und erbringen auch eine gewisse Rechenleistung.

Weiterhin umfasst bei vielen Datenspeichersystemen das Gehäuse der/des Controller/s bereits ein Array, um Festplatten unterzubringen. Die Gewichtsangaben von Herstellern beziehen sich in diesem Fall auf das gesamte Gehäuse (Controller Enclosure und DAE). Fraglich ist in diesen Fällen für den Betreiber, wie das Datenspeichersystem korrekt zu bilanzieren ist, also wie das Gesamtgewicht auf die zwei Bestandteile aufzuteilen ist: 100 Prozent Controller Enclosure oder 50 Prozent Controller Enclosure und 50 Prozent DAE oder 100 Prozent DAE.

Darüber hinaus sind Netzwerkgeräte des Aggregations- und Kernnetzes oft wie die Blade Systeme modular aufgebaut. D. h. sie können flexibel mit Linecards unterschiedlicher Leistungsstärke und Funktionalität nach Bedarf bestückt werden. Gewichtsangaben in Datenblätter beziehen sich aber entweder auf eine Leerkonfiguration und/oder eine Maximalkonfiguration. Ein halb bestücktes, modular aufgebautes Gerät kann mit bestehendem Ansatz nicht richtig bilanziert werden. Dazu müsste, wie bei den Blade Systemen, eine differenzierte Erfassung eingeführt werden.

4.2 Bewertung der Richtungssicherheit und Robustheit des Kennzahlensystems

Im Folgenden werden die Richtungssicherheit und Robustheit der Indikatoren und der Ergebnisse der Anwendung des Kennzahlensystems diskutiert. Zudem werden die mit dem KPI4DCE-Tool und den Daten aus den Fallstudien erzielten Ergebnisse mit denen aus anderen Studien verglichen. Ein Vergleich ist nur für die Berechnung des Ressourcenaufwands möglich, da noch keine vergleichbaren Studien für die IT-Leistungsindikatoren bzw. die Ressourceneffizienzkennzahlen existieren.

4.2.1 Unsicherheiten der Modellierung und Berechnung der IT-Leistung

Ziel war die Spezifikation robuster Leistungsindikatoren, die den Nutzen der IT-Subsysteme eines RZ richtungssicher erfassen. Bereits in der frühen Entwicklungsphase wurde festgelegt, dass zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit die von den IT-Geräten erbrachte Datenverarbeitungsleistung erfasst werden soll. Die Leistungsindikatoren unterscheiden bisher nicht zwischen IT-Leistung und „nützlicher“ IT-Leistung. Jede Rechenoperation der CPU, jede gespeicherte Datei und jedes an die Außenwelt übertragene Bit wird als „nützlich“ interpretiert. Tatsächlich werden Daten oft doppelt abgelegt, Rechenoperationen wiederholt ausgeführt und gleiche Daten nochmals übertragen, ohne aus Anwendersicht einen zusätzlichen Nutzen zu stiften. Es könnten demnach Anreize bestehen, die entwickelten Kennzahlen bzw. die ausgewiesene Ressourceneffizienz durch die Bearbeitung künstlicher Arbeitslasten zu optimieren. Ein Beispiel ist die künstliche Belegung von Speicherplatz. Darüber hinaus existieren in Bezug auf die Richtungssicherheit der einzelnen Leistungsindikatoren spezifische Unsicherheiten, die nachstehend diskutiert werden.

4.2.1.1 Rechenleistung der Server

Der Ansatz zur Erfassung des Rechenleistungsvermögens der Server ist in der Praxis insofern gut anwendbar, als dass mit den Testergebnisse für den SPECint_rate-Benchmark modellierten Rechenleistungswerten für über 750 CPUs eine sehr hohe Marktabdeckung erreicht wird. In Verbindung mit der im Betrieb gemessenen Auslastung der CPU konnte die erbrachte Rechenleistung der Server der untersuchten RZ in einem vergleichbaren Maßstab bestimmt werden. Voraussetzung für die Richtungssicherheit des Ansatzes ist, dass der zur Modellierung der CPU-spezifischen Rechenleistung genutzte SPECint_rate-Benchmark für möglichst viele Arten von Arbeitslasten von Servern repräsentativ ist. Dies trifft vor allem für CPU-intensive Arbeitslasten zu, wohingegen RAM- oder IO-zentrische Leis-

tungsschwerpunkte von Servern über den Ansatz weniger gut abgebildet werden. Sofern das im Jahr 2017 in der Version 2.0 veröffentlichten SERT-Tool eine ähnlich weitreichende Anwendung wie der SPECint_rate-Benchmark findet und die Testergebnisse auch frei veröffentlicht werden, könnten sich diesbezüglich neue Ansatzmöglichkeiten zu Verbesserung des Indikators ergeben.

Problematisch ist zudem, dass Rechenleistungen, die von Erweiterungskarten (z. B. Co-Prozessoren auf Grafikkarten) erbracht werden, mit dem auf die CPUs beschränkten Ansatz nicht erfasst werden. Dies spielte für die betrachteten RZ keine Rolle, wird im HPC-Bereich aber zunehmend wichtiger. Daher sollte der Ansatz für den HPC-Anwendungsbereich weiterentwickelt werden.

4.2.1.2 Speicherleistung der Datenspeicher

Die drei Indikatoren zur Erfassung der Datenspeicherleistung sollten im Rahmen der Fallstudien pro Datenspeichersystem erfasst werden, um zu entscheiden, inwiefern eine aggregierte Betrachtung der Datenspeichersysteme zur richtungssicheren Bewertung der Datenspeicherleistung ausreichend ist oder ob eine Differenzierung nach Anwendungsbereich ratsam ist. Mangels Messwerte können im Rahmen des Forschungsvorhabens diesbezüglich keine Aussagen getroffen werden.

In Bezug auf die Richtungssicherheit des Leistungsindikators „belegter Speicherplatz“ muss beachtet werden, dass je nach Anwendungsbereich im RZ kapazitätsoptimierte und geschwindigkeitsoptimierte Festplatten eingesetzt werden. Die kapazitätsoptimierten Festplatten weisen im Vergleich zu den geschwindigkeitsoptimierten Festplatten eine stark erhöhte Speicherplatzkapazität auf. Wird davon ausgegangen, dass diese i. d. R. auch einen höheren belegten Speicherplatz pro Festplatte zur Folge haben, führt die alleinige Betrachtung dieses Indikators zu einer besseren Bewertung der Datenspeicherleistung von RZ, die vor allem kapazitätsoptimierte Festplatten einsetzen.

In Bezug auf die Leistungsindikatoren „Transaktionsrate“ und „Datendurchsatz“ der Datenspeichersysteme wurde in Abschnitt 3.3.2 angeführt, dass diese möglichst in Verbindung mit der Latenz bewertet werden sollten. Da zulässige Grenzwerte der Latenz in der Praxis von Applikation zu Applikation variieren, dazu bisher aber keine verwertbare Datengrundlage existiert und auch bei den Experten des Begleitkreises keine Einigkeit darüber bestand, wie die Transaktionsrate oder der Datendurchsatz in Verbindung mit der Latenz bewertet werden sollte, wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens die Latenz der Datenspeichersysteme nicht berücksichtigt. Dadurch kann aber ggfs. die Leistung von Datenspeichersystemen nicht vollständig abgebildet werden, die viele Speicherzugriffe und hohe Datendurchsätze mit extrem kurzen Verzögerungen ermöglichen.

Weiterhin werden bei der Erfassung der Speicherleistung nicht alle Elemente der Speicherhierarchie eines RZ berücksichtigt. Tatsächlich verläuft die Speicherhierarchie vom Cache der CPU, über den RAM der Server bis hin zu den Server-internen und den in externen Datenspeichersystemen untergebrachten Festplatten. Das Kennzahlensystem bewertet in der aktuellen Form nur Speicherleistungen externer Datenspeichersysteme. Alle Datenspeicherleistungen, die direkt von den Komponenten der Server erbracht werden, werden nicht abgebildet. Während es sich beim Cache der CPU und dem RAM um flüchtige Datenspeicher handelt, die nicht zur dauerhaften Speicherung von Daten geeignet sind und damit von der Betrachtung ausgeschlossen werden können, sollten die Speicherleistungen der Server-internen HDD und SSD ggfs. mit erfasst werden. Dies ist auch deshalb ratsam, da in vielen RZ oftmals eine trennscharfe Abgrenzung der Server von den Datenspeichersystemen nicht möglich ist.

Letztlich berücksichtigen die drei Leistungsindikatoren nur ausgewählte Nutzendimensionen von Datenspeichersystemen: Der Sekundärnutzen durch die Langlebigkeit der Speichermedien, die schnelle Wiederherstellbarkeit von Daten oder Schutzmechanismen gegen Datenverlust werden mit den Leistungsindikatoren nicht erfasst. Auch werden wichtige Zusatzfunktionen von Datenspeichersystemen, die sich indirekt positiv auf die Ressourceneffizienz auswirken, wie die Deduplizierung oder Thin Provisioning noch nicht abgebildet.

4.2.1.3 Übertragungsleistung der Netzwerke

Als Leistungsindikator der Netzwerke wurde der Datenaustausch mit der Außenwelt definiert. Der RZ-interne Datenverkehr zwischen den Servern und den Datenspeichersystemen wird nicht erfasst. Für Netzwerke bestimmter RZ, die nur sehr wenige Daten mit der externen Umwelt austauschen (z. B. im Bereich des HPC oder der Stapelverarbeitung), aber im Gegenzug einen sehr hohen internen Datenverkehr haben, kann dieser Leistungsindikator daher wenig aussagekräftig sein. RZ mit sehr hohem Datenaustausch wie RZ zur Telekommunikation profitieren hingegen möglicherweise von der partiellen Bewertung der Netzwerkleistung.

Eine weitere Schwäche ist, dass die Latenz derzeit noch nicht einbezogen wird. Aus Sicht der Endanwender ist die Latenz des Netzwerks aber oft die entscheidende Größe. Bspw. kann eine große Varianz der Latenz für einige Applikationen zu Problemen führen (z. B. Video-Streaming).

Zudem wird wie auch bei den Datenspeichersystemen der Sekundärnutzen durch den Einsatz z. B. von Load Balancer für die optimale Verteilung von Lasten, die sich vor allem auf die Leistungsindikatoren anderer Systemklassen (Server, Datenspeichersysteme) auswirken, oder der Einsatz von Firewalls für den Datenschutz und Appliances für Verschlüsselung nicht berücksichtigt.

4.2.2 Unsicherheiten der Modellierung und Berechnung des Ressourcenaufwands

Die Modellierung basiert auf einer orientierenden Ökobilanz. Im Rahmen des Vorhabens wurden keine Primärdaten erhoben, sondern es wurden auf der Grundlage von qualitätsgeprüften Literaturwerten und Expertenbefragungen Einschätzungen vorgenommen. Die Unsicherheiten in Bezug auf relevante Annahmen und Datengrundlagen sind nachfolgend dokumentiert.

4.2.2.1 Speicherchips

Modellierung des Produktionsaufwands der Speicherchips der RAM-Module

Durch die Miniaturisierung im Bereich von Integrierten Schaltkreisen (ICs) ist das Gewicht der ICs nicht als Bezugsgröße geeignet, da sich die verschiedenen technologischen Generationen von ICs in ihrem Gewicht nicht wesentlich voneinander unterscheiden. Insofern kann auch ein IC-Datensatz nicht auf einen anderen IC-Typ anhand von Gewichtsverhältnissen skaliert werden, weil eben kein direkter Zusammenhang zwischen dem Gewicht der ICs und dem Produktionsaufwand besteht. Die Parameter, die mit dem Produktionsaufwand einhergehen, sind die Maskenschritte, Metallisierungsschritte, „Die“-Fläche sowie die Funktionalität der ICs (Prakash et al. 2013).

Die Bezugsgröße der Speicherchips in der Bilanz ist ein Stück „good die out“ aus dem Probas-Datensatz. Der Datensatz repräsentiert im Jahr 2007 die Technologiegeneration der Chip-Herstellung mit 60 nm Strukturbreite (siehe Fußnote 44) und Silizium-Wafer mit 300 mm Durchmesser. Die „Die“-Fläche des Referenz-Speicherchips im ProBas-Datensatz stammt aus einem Samsung-Speicherchips mit einer Speicherkapazität von einem GB (siehe Tabelle 24).

Der Probas-Datensatz repräsentiert nur eine bestimmte Technologiegeneration und die entsprechende „Die“-Fläche. Da die „Die“-Fläche der Speicherchips (anders als bei CPUs) nicht öffentlich verfügbar ist, können die Speichermodule vereinfacht nur nach der Anzahl der Speicherchips modelliert werden. In der Modellierung bedeutet dies, dass alle im RZ verwendeten Speicherchips mit einer „Die“-Fläche von jeweils 43 mm² in der Bilanz betrachtet werden, obwohl die Speicherchips in RZ durchaus aus unterschiedlichen Generationen stammen.

Mit dem festen Datensatz kann der technologische Fortschritt bei der Fertigung nicht im KPI4DCE-Tool abgebildet werden. Jedoch macht sich der technische Fortschritt in der Zunahme der Speicherkapazität innerhalb eines RAM-Moduls bemerkbar, was auf der Nutzenseite der Effizienzkennzahl einer Zunahme des Nutzens bei gleichem Ressourcenaufwand entspricht.

Angenommene „Die“-Fläche für andere ICs auf Leiterplatte

Neben RAM-Modulen werden noch andere ICs auf der Leiterplatte montiert. Eine Differenzierung der „Die“-Fläche der ICs nach Servertypen und nach Baujahr ist im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht möglich. In der Bilanz wird allgemein eine „Die“-Fläche mit 889 mm² pro Leiterplatte angenommen. Diese Annahme basiert auf der Komponentenliste von [Teehan und Kandikar 2013], die einen Rack Server (Modell: Dell PowerEdge EMU3710P71) demontiert und eine Materialen- bzw. Komponentenliste erstellt haben. Der Server wurde ca. 2005 produziert und wiegt ungefähr 15,5 kg ohne Verpackung.

4.2.2.2 Prozessoren

Die Bezugsgröße der Prozessoren ist im KPI4DCE-Tool die „Die“-Fläche. Das bedeutet, dass die Modellierung der Ressourceninanspruchnahme der CPU-Herstellung anhand der „Die“-Fläche skaliert. Dies ist einer der wichtigen technischen Parameter, der einen direkten Zusammenhang zwischen der „Die“-Fläche und dem Produktionsaufwand durch die Miniaturisierung im Bereich der Mikrochips beschreibt. Allerdings repräsentiert der verwendete ProBas-Datensatz nur eine bestimmte Technologiegeneration aus dem Jahr 2005. Im Prinzip hat die Modellierung der Herstellung der CPU die gleichen Unsicherheiten hinsichtlich der Hintergrunddatensätze, nämlich dass die CPUs, die in Servern zu verschiedenen Zeitpunkten eingesetzt und dadurch in verschiedenen Generationen produziert wurden, nicht im KPI4DCE-Tool abgebildet werden können. Im Rahmen des Forschungsvorhabens ist diese Vereinfachung (Vernachlässigung der Technologiegeneration, aber Berücksichtigung der „Die“-Fläche) noch akzeptabel. Allerdings sollten die Hintergrunddatensätze, die für die Modellierung des Produktionsaufwands in unterschiedlichen Generationen als Grundlage dienen, in Zukunft geprüft werden.

4.2.2.3 Leiterplatten

Die Anzahl der Leiterplatten eines Rack Servers wurde in Abhängigkeit von den HE des Rack Servers modelliert. Die Rack Server haben eine sehr große Variabilität in Bezug auf die mögliche Ausstattung. Rack Server mit nur einer HE wie auch Rack Server mit vier HE können nur eine Leiterplatte beinhalten. Die Annahme, dass die Anzahl der Leiterplatten eines Rack Servers entsprechend der HE steigt, bedeutet, dass für Rack Server mit mehr als einer HE die Umweltauswirkungen der Leiterplatten überschätzt sein könnten.

Im Gegensatz dazu skaliert die Anzahl der Leiterplatten eines Blade Systems nach der Anzahl der Blade Server Module. Bei Blade Systemen ist die Leiterplattenfläche abhängig von den HE des Blade Systems, der Breite des Blade Systems, und auch dessen Ausstattung, z. B. Blade Server Module in halber Höhe, in voller Höhe oder eine Kombination aus beiden. Wegen mangelnder Daten über Referenzprodukte für Blade Server, wird die Anzahl der Leiterplatten eines Blade Systems vereinfacht mit der Anzahl der Blade Server Module gleich gesetzt.

Für beide Servertypen wird die Fläche einer Hauptplatine mit 0,10 m² angenommen. Auch diese Zahl stellt eine unsichere Angabe dar. Je nach Baujahr, Ausrüstung und Konfiguration der Server kann die Fläche der Hauptplatine unterschiedlich sein (siehe Tabelle 56).

Ein zusätzlicher Parameter in der Modellierung ist das Gewicht einer unbestückten Leiterplatte. Diese Angabe ist nötig für die Einschätzung des Gewichts der sonstigen mikroelektronischen Komponenten auf der Leiterplatte. Die Berechnung des Gewichts der unbestückten Leiterplatte in der vorliegenden Studie beruht auf der methodische Grundlage MEErP [Kemna et al. 2011]. Die unbestückte Leiterplatte macht 35 Prozent des Gesamtgewichts einer bestückten Leiterplatte aus. Laut Einschätzung von [Peiró 2017] liegt die Angabe des in [Peiró und Ardente 2015] betrachteten Rack Servers bei ca. 42 Prozent. Die Umrechnung auf Basis der Daten nach [Teehan und Kandikar 2013] zeigt, dass der Gewichtsanteil der unbestückten Leiterplatte an der bestückten Leiterplatte schon bei 51 Prozent liegt (Tabelle 56).

Tabelle 56: Vergleich der Fläche und Gewichtanteil der Hauptplatine in Literaturen

Quelle	Referenz-Rack Server	Fläche der Leiterplatte	$\% = \frac{\text{Gew. der unbe. Leiterplatte}}{\text{Gew. der best. Leiterplatte}}$
in der vorliegenden Studie	-	0,10 m ² / HE	35 % (MEErP)
[Peiró et al. 2015]	23 kg; 2 HE; Baujahr: 2012	0,168 m ² / Server	42 % (persönliche Mitteilung von [Peiró])
[Teehan und Kandikar 2013]	15 kg; 1 HE; Baujahr: 2005	0,182 m ² / Server	51 % (eigene Berechnung auf Basis der Daten)

Eigene.

Tabelle 57 stellt die THG-Ergebnisse nach Variation der Anzahl und Fläche der Hauptplatine in der Modellierung für die Rack Server dar. Auf Basis einer gleichen technischen Beschreibung⁵⁶ in [Peiró et al. 2015] und [Bio by Deloitte 2015] wurden mit Hilfe des KPI4DCE-Tools für einen Server mit einer Hauptplatine THG-Werte von 685 kg CO₂-eq. und für einen Server mit zwei Hauptplatinen THG-Werte von 812 kg CO₂-eq. ermittelt. Das bedeutet, eine weitere Hauptplatine kann in der Bilanz den THG-Wert um 19 Prozent erhöhen. Wenn die Fläche und der Gewichtsanteil einer Hauptplatine nach [Peiró und Ardente 2015] zugrunde gelegt werden, ergeben sich für die Herstellung eines Rack Servers mit einer Hauptplatine 702 kg CO₂-eq. und mit zwei Hauptplatinen 857 kg CO₂-eq.. Das THG-Ergebnis des Rack Servers in der Herstellungsphase erhöht sich dann um ca. 2,5 Prozent bzw. 5,5 Prozent.

Tabelle 57: Einfluss auf das THG-Ergebnis nach der Variierung der Anzahl und Fläche der Hauptplatine in der Modellierung

	THG [kg CO ₂ -eq./Rack Server]	
	Anzahl der Hauptplatine in der Modellierung: 1	Anzahl der Hauptplatine in der Modellierung: 2
Bezogen auf ein Rack Server mit zwei HE		
In der vorliegenden Studie: 0,1 m ² pro Leiterplatte im Rack Server und einem Gewichtsanteil von 35 % der unbestückten Leiterplatte an der bestückten Leiterplatte.	685 (100 %)	812 (119 %)
In der vorliegenden Studie: 0,168 m ² pro Leiterplatte im Rack Server und einem Gewichtsanteil von 42 % der unbestückten Leiterplatte an der bestückten Leiterplatte	702 (100 %)	857 (122 %)
i.V.z. [Bio by Deloitte 2015]	508	-
i.V.z. [Peiró und Ardente 2015]	919	-

Eigene.

Ergebnisrelevant sind Annahmen über die Anzahl an Hauptplatinen pro Server, die Fläche der Hauptplatinen und dem Gewichtsanteil der unbestückten Hauptplatine von der bestückten Hauptplatine.

⁵⁶ Dies entspricht: zwei HE, zwei CPU (Intel E5-26XX), sechs RAM-Module, Gewicht ohne Verpackung des Rack Servers mit 23 kg, vier 3,5"-HDD

Darüber hinaus spielt auch die Lagenzahl (engl: layer) der Platine eine wichtige Rolle, da diese für den Energieaufwand bei der Herstellung einen der wichtigsten technischen Parameter für den Hintergrunddatensatz darstellt. Die Lagenzahl ist abhängig von der Komplexität der benötigten Schaltung und der verfügbaren Fläche [Prakash et al. 2016]. Bei einer Lagenzahl von zehn kann der THG-Wert im Vergleich zu einer Leiterplatte mit sechs Lagen um 60 Prozent höher sein (siehe Tabelle 58).

Tabelle 58: THG-Werte nach verschiedener Lagenzahl der Leiterplatte

Quelle	Lagenzahl	THG: kg CO ₂ -eq. / m ²
LCA to go ⁵⁷	6	495
LCA to go	10	792
In der vorliegenden Studie	6	490

Eigene.

Neben den jeweiligen Hauptplatinen beinhalten die IT-Geräte außerdem eine Reihe von weiteren Leiterplatten, die nicht über ihre Fläche, sondern pauschal durch ihren Gewichtsanteil erfasst werden. Bei den Leiterplatten, die in Netzteilen verbaut sind, erfolgt die Modellierung auf Basis des ecoinvent-Datensatzes „printed wiring board production, for power supply unit, desktop computer, Pb containing“. Diese Vereinfachung führt bei den Netzteilen dazu, dass die in Computer-Netzteilen typischerweise eingesetzten Tantal-Kondensatoren das Ergebnis des ADP maßgeblich dominieren. Da in Netzteilen prinzipiell auch andere Typen an Kondensatoren eingesetzt werden können, sollte die Datenlage zur Herstellung von Netzteilen für IT-Geräte zukünftig verbessert werden.

4.2.2.4 Hard Disk Drive

Die entscheidenden Parameter für HDD in der Herstellungsphase sind der Formfaktor der HDD, die Anzahl der Medien (rotierenden Scheiben) und die Speicherkapazität. Die wesentliche Schlussfolgerungen aus [Prakash et al. 2016] sind:

- ▶ Der Stromverbrauch in der Montage hängt weniger von der Anzahl der Medien ab, als vielmehr von der Speicherkapazität der Festplatten, aufgrund des sehr langwierigen 100 Prozent-Tests. Je größer die Kapazität, desto länger der Test, desto höher der Stromverbrauch.
- ▶ Der Stromverbrauch in der Fertigung von Slidern⁵⁸ und HGA⁵⁹ ist dagegen abhängig von der Anzahl der Medien. Je höher die Anzahl der Medien, desto mehr HGA und Slider werden benötigt, so dass sich der Stromverbrauch in der Fertigung entsprechend erhöht und ebenfalls so, dass sich der Rohstoffverbrauch in der Produktion erhöht.
- ▶ Im Endmontageprozess ist die Speicherkapazität der entscheidende Parameter für den Energieverbrauch. Die Produktion der Medien, Slider und HGAs hat allerdings einen deutlich höheren Stromverbrauch als der Stromverbrauch im Endmontageprozess (inkl. Test).

Die Inventarlisten aus der Praxis zeigen, dass die sich in Betrieb befindenden HDDs in einem RZ eine große Bandbreite an Speicherkapazität (300 GB – 6 TB) haben. Es wurde geschätzt, dass die vereinfachte Annahme nach Stückzahl, die Größenordnung der Umweltindikatoren gut abbilden kann.

⁵⁷ Gerechnet aus <http://www.lca2go.eu/>

⁵⁸ Slider ist ein Chip auf der Spitze des Tragrahmens (HGAs). „Slider“ ist die Stelle, an der Lesen und Schreiben tatsächlich stattfinden.

⁵⁹ HGA (engl.: head gimbal assemblies): Tragrahmen des Lese-/Schreibkopfs.

4.2.2.5 Solid State Drive

Die Datengrundlage für die Herstellung von SSD ist derzeit noch sehr dünn. Die Modellierung der Herstellung basierte auf Internetrecherchen und der Einschätzung von Experten. Modelliert sind die Herstellung der Gehäuse aus Aluminium und der unbestückten Leiterplatte sowie der Aufwand der Bestückung und Herstellung der Speicherchips. Die anderen elektronischen Komponenten auf der Leiterplatte konnten aufgrund mangelnder Daten nicht betrachtet werden und spielen nach eigener Einschätzung für das Gesamtergebnis eine untergeordnete Rolle, da die Speicherchips die dominierenden elektronischen Komponenten auf der Leiterplatte sind [Seagate Technology LLC 2011]. Aus Konsistenzgründen wurde die Herstellung der Speicherchips ebenfalls mit dem ProBas-Datensatz modelliert. Es wird davon ausgegangen, dass die Speicherchips hinsichtlich des Umweltaspekts am ergebnisrelevantesten sind. Allerdings ist die Modellierung mit großer Unsicherheit behaftet. Die Unsicherheit entsteht aus folgenden zwei Aspekten:

- ▶ Der für die Modellierung des Herstellungsaufwands der Speicherchips zugrunde gelegte Datensatz (siehe Abschnitt 3.4.4.2) repräsentiert eine bestimmte Technologiegeneration und kann den Fortschritt der Technologie nicht abdecken.
- ▶ Die „Die“-Fläche ist der wichtigste Eingabeparameter für Speicherchips. Für die ergebnisrelevante „Die“-Fläche der Speicherchips in SSD sind keine Informationen zu finden. Nach der Experteneinschätzung (persönliche Mitteilung von [Olivetti 2016]) beträgt die „Die“-Fläche der Speicherchips 25-45 cm²/SSD. Die Bandbreite ist sehr groß, womit sie das Ergebnis direkt beeinflusst. Im Rahmen der Möglichkeit des Vorhabens konnte keine repräsentative „Die“-Fläche identifiziert werden und somit liegt der Mittelwert von 35 cm²/SSD für die Modellierung zugrunde. Trotzdem zeigt Tabelle 59 die Bandbreite der Umweltaspekte, wenn 25 cm² und 45 cm² in der Modellierung zugrunde gelegt wären. Zusätzlich ist der THG-Wert in der Herstellungsphase aus einer Lebenszyklusanalyse einer Seagate-SSD in der Tabelle dargestellt [Seagate Technology LLC 2011]. In der vorliegenden Untersuchung verursacht eine SSD in der Herstellungsphase fast doppelt so viele Treibhausgase wie die bei [Seagate Technology LLC 2011]. Anzumerken ist, dass in der Seagate-Analyse die ecoinvent v2.2-Datenbank zugrunde gelegt ist, während im Forschungsvorhaben die ecoinvent v3.2-Datenbank verwendet wurde.

Die beiden oben genannten Aspekte sollten in zukünftigen Untersuchungen nach dem Stand des Wissens und der Datengrundlage in Verbindung mit technologischen Parametern der SSD geprüft und verbessert werden.

Tabelle 59 Zusammenstellung der aus der Herstellungsphase resultierenden Umweltindikatoren bezogen auf eine SSD, variiert nach „Die“-Fläche

Umweltaspekte	Einheit (bezogen auf eine SSD)	Fall A: „Die“-Fläche: 25cm ² /SSD	Fall B: „Die“-Fläche: 45cm ²	Zum Vergleich: Pulsar 2 SSD* (Seagate Technology LLC 2011)	In der vorliegenden Untersuchung (Mittelwert: 35cm ² /SSD liegt zugrunde)
ADP	kg Sb.eq. (Sb: Antimon)	4,20E-03	6,80E-03	k.A.	5,49E-03
KEA	MJ	1.099	1.887	k.A.	1.490
THG	kg CO ₂ -eq.	83	143	68	113
Wasserverbrauch	kg	510	897	k.A.	702

Eigene. *modelliert mit ecoinvent v2.2-Datenbank

4.2.2.6 Netzwerkgeräte

Die Server und Datenspeichersysteme im RZ werden mit Netzwerktechnik verbunden, welche typischerweise die Komponenten Switches, Router, Gateway, Kupferkabel, Glasfaserkabel etc. umfasst. Um die große Bandbreite an Netzwerkgeräten zu reduzieren, werden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens vereinfachend nur Switches untersucht.

Der Modellierung des Produktionsaufwands liegt als Referenzgerät ein Switch mit einem Gewicht von 9,6 kg zugrunde [Mahadevan et al. 2010]. Die fehlende Angabe über das Gewicht des Switches und der Steckplatine wurden durch eigene Annahmen ergänzt. Für die Modellierung der „Die“-Fläche der ICs wurde die Annahmen aus [Teehan und Kandikar 2013] herangezogen, in der ein kleiner Switch (2,1 kg) untersucht wurde. Die „Die“-Fläche der Chips wurde mit dem Verhältnis der Leiterplattenfläche aus beiden Studien skaliert. Dies stellt eine starke Vereinfachung dar.

Die Berechnung des Herstellungsaufwands im KPI4DCE-Tool erfolgt durch die Angabe der Anzahl und der Einzelgewichte der Switches durch den RZ-Betreiber. Die Skalierung erfolgt über das Gesamtgewicht. Das bedeutet, dass die „Die“-Fläche der ICs proportional zum Gewicht der individuellen Switches hochskaliert wird. Mögliche repräsentative andere Bezugsgrößen (z. B. Port-Anzahl) sollten in Zukunft geprüft werden.

4.2.3 Interpretation der Ergebnisse für die Berechnung des Ressourcenaufwands

4.2.3.1 Ergebnisvergleich auf Produktebene anhand des Untersuchungsgegenstands in der EuP Lot 9-Studie und der JRC-Studie

Die in der EuP Lot 9-Studie [Bio by Deloitte 2015] und in der JRC-Studie [Peiró und Ardente 2015] ökobilanziell untersuchten Rack Server haben eine fast identische Material- und Komponentenzusammensetzung. Die technische Beschreibung des Rack Servers ist im Folgenden dargestellt:

- ▶ Der Rack Server hat 2 HE und wiegt 23 kg (ohne Verpackung).
- ▶ Die zeitliche Repräsentativität dieses Standes der Technik liegt ca. bei 2012.
- ▶ 2 x Prozessor Intel E5-26XX
- ▶ 6 x RAM-Module
- ▶ 4 x 3,5"-HDD

Im KPI4DCE-Tool wurden die oben genannten Parameter des Rack Servers eingegeben, um zu ermitteln, wie sich die Ergebnisse des KPI4DCE-Tools von denen in [Bio by Deloitte 2015] und [Peiró und Ardente 2015] unterscheiden. Für die Herstellung eines Rack Servers ergeben sich mit dem KPI4DCE-Tool ein THG von 812 kg CO₂-eq. und ein KEA-Wert von 11.625 MJ (siehe Tabelle 60).

Tabelle 60: Zusammenstellung der KEA- und THG-Ergebnisse in der Herstellungsphase

Quelle	KEA [MJ] / Rack Server	THG [kg CO ₂ -eq.] / Rack Server
in der vorliegenden Studie	11.625	812
[Bio by Deloitte 2015]	9.002	508
[Peiró und Ardente 2015]	13.000	919

Eigene.

Obwohl [Bio by Deloitte 2015] und [Peiró und Ardente 2015] hinsichtlich der Materialliste den gleichen Rack Server betrachtet haben, unterscheiden sich die Ergebnisse stark. Ursache ist die verwendete Hintergrunddatenbank. In [Peiró und Ardente 2015] wurden zur Modellierung die GABI-Datenbank für mikroelektronische Komponenten und die ecoinvent-Datenbank für allgemeine Materialien ver-

wendet. Beide Datenbanken liefern ausführliche Datensätze und werden häufig in Ökobilanzierungen verwendet. Hingegen wurde in [Bio by Deloitte 2015] in Anlehnung an die methodische Grundlage MEErP [Kemna et al. 2011] auf einem vergleichsweise weniger detaillierten Niveau modelliert.

Zusätzlich wurde das mit dem KPI4DCE-Tool berechnete THG der Herstellung der Rack Server den Werten aus anderen Literaturquellen gegenübergestellt. Die Spannbreite des THG in der Herstellungsphase liegt zwischen 332 kg CO₂-eq. und 919 kg CO₂-eq.. Die Zusammenstellung in Tabelle 61 gibt einen Überblick über die Bandbreite des THG der Rack Server in der Herstellungsphase in verschiedenen Studien. Die absoluten Werte sind nicht direkt miteinander vergleichbar, da sie unterschiedliche Rack Server repräsentieren, die mit unterschiedlichen Technologien, Konfigurationen, HE und Produktionsjahren verbunden sind. Außerdem beeinflussen die für die Modellierung zugrunde gelegten Datenbanken die getroffenen Annahmen und unterschiedliche methodische Festlegungen (z. B. die Definition der Systemgrenzen) die Ergebnisse der Ökobilanz.

Tabelle 61: THG-Werte von Rack Servern in der Herstellungsphase

Quelle	betrachtete Rack Server	THG (kg CO ₂ -eq./Rack Server)
[Bio by Deloitte 2015]	EuP Lot 9-Studie	508
[FUJITSU 2010]	Fujitsu PRIMERGY TX300 S5	450
[Peiró und Ardente 2015]	JRC-Studie	919
[Stutz 2013]	Dell PowerEdge R710 (11G)	499
[Stutz 2013]	Dell PowerEdge R720 (12G)	554
[Stutz et al. 2012]	Dell R710 2U Rack Server	471
[Teehan und Kandlikar 2013a, 2013b]	Dell PowerEdge EMU3710	383
[Weber 2012; Hilton und Welch 2012]	IBM Rack Server	332

Eigene.

4.2.3.2 Ergebnisvergleich auf Komponentenebene mit der JRC-Studie

Tabelle 62 zeigt die Anteile von IT-Komponenten an den betrachteten Umweltaspekten der Herstellung eines in [Bio by Deloitte 2015] betrachteten Rack Servers. Die CPU (zwei Stück in der Bilanz) tragen jeweils ca. fünf Prozent zum THG und KEA bei. ICs und sonstige mikroelektronischen Komponenten auf der Hauptplatine verursachen in der Herstellung eines Rack Servers jeweils ca. 18 Prozent des THGs. Die sonstigen Komponenten des Rack Servers, wie das Gehäuse, die Netzteile, Erweiterungskarten und optische Laufwerke haben einen Anteil am THG von 34 Prozent. Beim ADP haben die sonstigen Komponenten mit ca. 69 Prozent den größten Anteil, wovon der überwiegende Teil auf die Netzteile entfällt.

Für die Modellierung der Herstellung der Leiterplatte eines Netzteils wurde der ecoinvent-Datensatz „printed wiring board production, for power supply unit, desktop computer, Pb containing“ zugrunde gelegt. Eine weitere Aufschlüsselung des Datensatzes ergibt, dass die Tantal-Kondensatoren die dominierende Rolle für das ADP spielen. Die Angabedaten des Datensatzes zeigen, dass pro Kilogramm Leiterplatte eines Netzteils 25 Gramm Tantal-Kondensatoren benötigt werden. Der ecoinvent-Datensatz „PSU-Leiterplatte“ bezieht sich dabei auf eine Leiterplatte für ein Netzteil eines Desktop-Computers. Dieser Aspektes sollte in Zukunft überprüft werden. Die Angabe der Tantal-Kondensatoren eines Netzteils für einen Desktop-Computer ist nicht übertragbar auf ein Netzteil eines Servers. Außerdem hat der Datensatz einen zeitlichen Bezug von 2005-2015. Die mikroelektronische Komponentenzusammensetzung eines Netzteils für einen Server sollte in Zukunft nach Stand der Technik genauer untersucht werden.

Tabelle 62: Beitrag der im KPI4DCE-Tool berechneten Umweltaspekte in der Herstellungsphase anhand des Untersuchungsgegenstands in der EuP Lot 9 Studie

Herstellungsphase	ADP [kg Sb- eq./Rack Server]	KEA [MJ/Rack Server]	THG [kg CO ₂ -eq. /Rack Server]	Wasserverbrauch [Liter/Rack Server]
CPU	0,2 %	4,9 %	4,6 %	6,5 %
CPU-Kühlkörper	0,5 %	0,8 %	0,7 %	0,7 %
ICs (inkl. RAM-Module + andere ICs)	0,9 %	15,8 %	17,0 %	26,8 %
Unbestückte Hauptplatine	1,2 %	12,8 %	12,1 %	11,1 %
elektronische Komponenten auf der Leiterplatte (ohne CPUs und ICs)	27,6 %	18,9 %	18,5 %	16,5 %
3,5" HDD	1,0 %	11,3 %	11,3 %	9,4 %
Sonstige Komponenten	68,5 %	33,6 %	34,0 %	28,2 %
Verpackung	0,0 %	1,3 %	0,9 %	0,6 %
Stromverbrauch (für Montage und Test)	0,0 %	0,6 %	0,9 %	0,1 %
Summe	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %

Eigene.

Aus der Lebenszyklusanalyse eines Rack Servers in [Peiró und Ardente 2015] resultiert, dass die CPU und Hauptplatine wichtige Beiträge für das THG-Potenzial (50 Prozent) und ADP (54 Prozent) in der Herstellungsphase eines Servers sind, gefolgt von den RAM-Modulen, dem Gehäuse und den HDD (siehe Tabelle 63). Der CPU-Anteil am gesamten THG-Wert ist ziemlich hoch. In [Peiró und Ardente 2015] wurden absolute THG-Werte von 229 kg CO₂-eq. für zwei CPUs ermittelt. Das bedeutet, laut [Peiró und Ardente 2015] werden 115 kg CO₂-eq. pro CPU in der Herstellungsphase verursacht. Der absolute THG-Wert ist im Vergleich mit dem in der vorliegenden Untersuchung nach ProBas modellierten THG-Ergebnis und auch mit Blick auf anderen Literaturen außergewöhnlich hoch (siehe Tabelle 64). Der CPU-Wert in [Peiró und Ardente 2015] ist vermutlich überschätzt.

Tabelle 63: THG- und ADP-Beitrag der wichtigsten Komponenten eines Rack Servers in der Herstellungsphase

Herstellungsphase	CPU	Hauptplatine (ohne CPU und RAM)	RAM-Modul	Gehäuse	HDD	Erweiterungskarte	PSU	Summe: Beitrag der wichtigsten Komponenten
THG	25,0 %	24,3 %	16,1 %	10,9 %	9,4 %	5,9 %	3,8 %	95,3 %
ADP	26,4 %	27,7 %	12,3 %	4,4 %	10,3 %	7,4 %	4,0 %	92,5 %
Wasser-	22,0 %	32,4 %	13,4 %	4,9 %	10,6 %	5,8 %	4,3 %	93,4 %

ver- brauch								
----------------	--	--	--	--	--	--	--	--

Eigene nach (Peiró und Ardente 2015, Tabelle 22).

Tabelle 64: Vergleich der Prozessoren in verschiedenen Literaturen hinsichtlich des THG-Wertes

Quelle	THG in der Literatur	Umrechnung: THG pro CPU	„Die“-Fläche des betrachteten Prozessors
[Peiró und Ardente 2015]	229,4 kg CO ₂ -eq. / 2 CPUs	115 kg CO ₂ -eq. / CPU	keine Angabe
(Prakash et al. 2016, Tabelle 96 und Tabelle 97)	5,9 kg CO ₂ -eq./CPU für Laptop		0,94 cm ² /CPU
	6,3 kg CO ₂ -eq./CPU für Desktop		0,94 cm ² /CPU
[O’Connell und Stutz 2010]	2,5 kg CO ₂ -eq./CPU für Laptop		1,08 cm ² /CPU
[Boyd et al. 2010]	0,044 kg CO ₂ -eq. / mm ² „Die“	4,1 kg CO ₂ -eq./CPU	Annahme: 0,94 cm ² /CPU
	0,049 kg CO ₂ -eq. / mm ² „Die“	4,6 kg CO ₂ -eq. /CPU	Annahme: 0,94 cm ² /CPU
	0,054 kg CO ₂ -eq. / mm ² „Die“	5,0 kg CO ₂ -eq. /CPU	Annahme: 0,94 cm ² /CPU
	0,057 kg CO ₂ -eq. / mm ² „Die“	5,3 kg CO ₂ -eq. /CPU	Annahme: 0,94 cm ² /CPU
In der vorliegenden Studie	40,8 t CO ₂ -eq. / m ² „Die“	3,8 kg CO ₂ -eq. /CPU	Annahme: 0,94 cm ² /CPU
		18,6 kg CO ₂ -eq. /CPU	Annahme: 4,56 cm ² /CPU*

Eigene. *Intel Xeon E5-2698 V4

4.2.3.3 Ergebnisvergleich auf Komponentenebene mit der Studie von [Teehan und Kandlikar 2013b]

[Teehan und Kandlikar 2013b, 2013a] haben einen Rack Server von Dell aus dem Jahr 2005 untersucht. Die mit dem KPI4DCE-Tool berechneten Anteile der THG-Werte in der Herstellungsphase werden in Tabelle 65 mit denen des Rack Servers nach [Bio by Deloitte 2015] verglichen. Der Vergleich dient zur Orientierung, um die Auswirkung der unterschiedlichen Konfigurationen eines Rack Servers darzustellen. Die Ergebnisse zeigen, dass Netzteile, ICs (inkl. CPU) und die bestückte Leiterplatte die wesentlichen Beiträge zum THG-Wert in der Herstellungsphase eines Rack Servers leisten.

Tabelle 65: Beitrag der wichtigsten Komponenten von Rack Servern zum THG-Wert der Herstellungsphase

Herstellungsphase	THG nach (Teehan und Kandlikar 2013)	THG in der vorliegenden Studie
Netzteile	23 %	13 %
Gehäuse	5 %	14 %
ICs	32 %	22 %
Leiterplatte (ohne ICs)	34 %	31 %
HDD	k.A.	11 %
Summe: Beitrag der wichtigsten Komponenten	94 %	91 %

Eigene.

4.2.4 Robustheit und Richtungssicherheit des Kennzahlensystems

Mit den Datensätzen aus den drei Fallbeispielen waren Aussagen über die Richtungssicherheit und Robustheit des Kennzahlensystems eingeschränkt möglich. Basierend auf den zur Verfügung stehenden Datensätzen wurden ergänzend zentrale Aspekte des RZ-Betriebes simuliert, die die Ressourceneffizienzkennzahlen unterschiedlich beeinflussen. Dazu wurden die Daten des RZ1 in Bezug auf die Auslastung und die Lebensdauern der IT-Geräte verändert und die mit den Änderungen berechneten Kennzahlenwerte den ursprünglichen Ausprägungen vergleichend gegenübergestellt. Hierbei zeigten sich Wirkungsketten, die die Robustheit und Richtungssicherheit des Kennzahlensystems bestätigen:

- ▶ Höhere Auslastungen des IT-Bestandes (CPU-Auslastung, belegter Speicherplatz) führen immer zu höheren Ausprägungen aller für die IT-Geräte entwickelten Ressourceneffizienzkennzahlen. Denn eine höhere Auslastung der IT ist gleichbedeutend mit einer höheren IT-Leistung; der Energieverbrauch der IT-Geräte in der Nutzungsphase steigt aufgrund des bereits hohen Leerlaufstromverbrauchs im Verhältnis zur Auslastung der IT-Geräte stets geringfügiger an.
- ▶ Durch die Betrachtung der Ressourceninanspruchnahme über den Lebensweg wirken sich Überkapazitäten auf die Ausprägungen der Ressourceneffizienzkennzahlen negativer aus, als wenn nur der Energieverbrauch in der Nutzungsphase betrachtet wird. Die Höhe des Ressourceneffizienzanstieges durch eine höhere Auslastung der Kapazitäten hängt von der Wirkungskategorie ab und kann für diese nicht pauschal vorhergesagt werden. Denn die IT-Geräte eines RZ haben immer individuelle von der Komponentenausstattung abhängige Herstelllaufwände und lastabhängige Stromverbrauchsprofile.
- ▶ Es besteht kein proportionaler Zusammenhang zwischen Kapazität und Energieaufwand der Herstellung eines IT-Gerätes. Vielmehr ist jede Folgegeneration von IT-Geräten leistungsfähiger (und nach Koomeys Gesetz auch energieeffizienter) bei gleichem (modellierten) Energieeinsatz für die Herstellung. Daher wirken sich kürzere Erneuerungszyklen (Lebensdauern) der IT positiv auf den KEA und das THG und somit auf die entsprechenden Ressourceneffizienzkennzahlen aus. Dies gilt aber nur, sofern eine Mindestlebensdauer der IT-Geräte nicht unterschritten wird, die Verbesserung der Energieeffizienz neuer Generationen von IT-Geräten wie bisher auf hohem Niveau bleibt und die IT-Geräte in den RZ weiterhin rund um die Uhr betrieben werden. Denn für das THG und den KEA ist dann der Stromverbrauch in der Nutzungsphase entscheidend, wohingegen der Herstelllaufwand eine geringere Rolle spielt (siehe Abbildung 48). Der Zusammenhang gilt insbesondere, wenn der Ersatz alter Geräte mit einer Konsolidierung der Arbeitslasten auf weniger IT-Geräte (z. B. durch Virtualisierung) einhergeht.
- ▶ Auf der anderen Seite führt eine verlängerte Lebensdauer der IT-Geräte gegenüber kürzeren Erneuerungszyklen in der Gesamtbilanz meist zu einer höheren Rohstoffeffizienz (geringerer ADP). Eine möglichst lange Lebensdauer von IT-Geräten ist daher auch in RZ ratsam. Da in die Berechnung des abiotischer Rohstoffverbrauchs der Energieverbrauch in der Nutzungsphase über den Verbrauch fossiler Brennstoffe auch mit eingeht, kann es bei extrem alten, ineffizienten IT-Geräten zur Verbesserung der Rohstoffeffizienz unter Umständen aber durchaus sinnvoll sein, diese durch neuere, sehr energieeffiziente IT-Geräte zu ersetzen.

Im Rahmen der Simulation der Veränderung von RZ-Betriebsparametern und Analyse der Auswirkungen auf das Kennzahlensystem wurde deutlich, dass pauschale Aussagen zu Steigerungsraten der Ressourceneffizienz durch längere Lebensdauern oder höhere Auslastungen je Umweltwirkungskategorie nicht möglich ist und mit dem KPI4DCE-Tool im direkten Anwendungszusammenhang abgeleitet werden müssen. Weitere Fallbeispiele und die Erfassung von Daten für eine Vielzahl von RZ mit unterschiedlichen Größen, Ausstattungsvarianten und Betriebsmodellen könnten für weitere Klarheit sorgen. Die Kennzahlen selbst erwiesen sich im Rahmen der Simulationen unter Berücksichtigung der in den vorangegangenen Abschnitten bereits angeführten Schwächen der zu Grunde liegenden Nutzen- und Aufwandsindikatoren jedoch als richtungssicher und robust.

4.2.5 Bewertung der Erfüllung der Anforderungen an Kennzahlensysteme

Zu Beginn des Forschungsvorhabens wurden generische Anforderungen an Kennzahlen und Kennzahlensysteme definiert (siehe Abschnitt 2.1.1). Auf eine Bewertung der Einhaltung der für jede Kennzahl spezifizierten Anforderungen (Zielorientierung, Messbarkeit, Verständlichkeit, Optimierbarkeit, Vergleichbarkeit) wird an dieser Stelle verzichtet, da diese in den vorangehenden Abschnitten bereits implizit mitdiskutiert wurden. Nachstehend wird ausschließlich die vorhabenspezifische Erfüllung der Anforderungen an Kennzahlensysteme (Vollständigkeit, Handhabbarkeit, Unabhängigkeit und Einheitlichkeit) beleuchtet.

Das entwickelte Kennzahlensystem deckt alle für ein RZ wesentlichen Ressourceninanspruchnahmen und Umweltwirkungen (ADP, KEA, THG, Wasserverbrauch) ab. Es umfasst sowohl die Gebäudetechnik als auch alle IT-Subsysteme und berücksichtigt explizit die von den IT-Geräten erbrachte Leistung. Gegenüber allen anderen in der Literatur vorgeschlagenen Kennzahlensystemen ist der in diesem Forschungsvorhaben entwickelte Ansatz umfassender und genauer. Ein möglicher Kritikpunkt in Bezug auf die Vollständigkeit besteht darin, dass mit den Indikatoren für die IT-Leistung nicht jeder Aspekt der IT-Leistung, allen voran nicht die „nützliche“ IT-Leistung aus Sicht der Endanwender beschrieben werden kann, sondern ausschließlich die Hardwareleistung. Dies wurde für das vorliegende Forschungsvorhaben aber bewusst in Kauf genommen, da Leistungsindikatoren auf Anwendungs- und Dienstebene derzeit noch nicht RZ-übergreifend miteinander vergleichbar sind.

Das entwickelte Kennzahlensystem besteht, wenn alle definierten Kennzahlen angewendet werden, aus 24 Kennzahlen. Damit ein Kennzahlensystem handhabbar bleibt, sollte es fünf bis acht Kennzahlen umfassen. Daher sollte die Anzahl der Kennzahlen reduziert werden. Hierfür bieten sich zwei Ansatzpunkte. Einerseits könnte die Bewertung der Ressourceneffizienz der Netzwerke aufgrund der geringen Bedeutung für die Gesamtressourcenbilanz verzichtet werden. Auch korrelieren das THG und der KEA gut miteinander, sofern das RZ nicht eigenständig Strom produziert. Gleiches gilt für den Wasserverbrauch des RZ. Somit könnte, auch zur Wahrung der Unabhängigkeit der verwendeten Kennzahlen, auf das THG und den Wasserverbrauch ggfs. verzichtet werden. Diese sollten nur bei Vorhandensein von Eigenerzeugungsanlagen oder Adiabater Kühlung mit erfasst werden. Dementsprechend könnte bei Datenspeichersystemen aufgrund der Proportionalität von Datendurchsatz und Transaktionsrate (bei konstanter Blockgröße) die Anzahl der Leistungsindikatoren ggfs. ebenfalls reduziert werden.

Nicht zuletzt sollten die Datenerhebungs- und Berechnungsmethoden für die Kennzahlen eines Kennzahlensystems möglichst einheitlich sein. Durch das KPI4DCE-Tool wird sichergestellt, dass alle Nutzer des Kennzahlensystems die gleiche Hintergrunddatenbasis und Berechnungsmethoden nutzen. Jedoch werden zur Berechnung der Kennzahlen teilweise Messdaten aus Produktivumgebungen mit modellierten Werten aus Ökobilanz- und IT-Benchmark-Datenbanken kombiniert. Auch mussten im Rahmen des Praxistests aufgrund fehlender Messtechnik häufig Schätzungen (z. B. Strombedarf der IT-Subsysteme) oder punktuelle Referenzmessungen (z. B. CPU-Auslastung) vorgenommen werden.

Weiterhin werden in der aktuellen Form des KPI4DCE-Tools zu einem Zeitpunkt punktuell gemessene Daten zum Gerätebestand mit dem im zurückliegenden Jahr gemessenen Nutzen (IT-Leistung) und Betriebsmittelverbrauch (Energie-, Kältemittel-, Wasserverbrauch) kombiniert. Unterjährige Bestandsveränderungen werden mit dem KPI4DCE-Tool noch nicht richtig abgebildet. Der Herstelleraufwand für ein Gerät, welches zum Zeitpunkt der Bestandsaufnahme nicht mehr im Betrieb ist, weil es vorher stillgelegt wurde, taucht in der Ressourcenbilanz nicht mehr auf, der bis dahin erbrachte Nutzen aber schon. Korrekterweise müsste der Herstelleraufwand anteilig für die Zeit des Jahres, in der das Gerät in Betrieb war, bilanziert werden. Das Gegenteil gilt für ein Gerät, welches unterjährig in Betrieb genommen wurde. Für dieses wird der Herstelleraufwand für ein volles Jahr angesetzt, der Nutzen aber nur für den Zeitraum ab Inbetriebnahme angerechnet. Bei gravierenden Bestandsveränderungen kann es zu Verzerrungen der Kennzahlenwerte kommen. Das KPI4DCE-Tool zur Berechnung sollte dahingehend verbessert werden.

5 Empfehlungen zur Verwendung der Ergebnisse

5.1 Empfehlungen für den Blauen Engel RAL UZ 161

Das Umweltzeichen Blauer Engel für RZ wird seit dem Jahr 2012 als RAL-UZ 161 vergeben. In seiner ersten Fassung vom Juli 2012 lautete der Titel der Vergabegrundlage „Energiebewusster Rechenzentrumsbetrieb“. Neben Mindestanforderungen an die Energieeffizienz von IT-Geräte, das Kühlsystem und die unterbrechungsfreie Stromversorgung, die den Stand der Technik repräsentierten, lag der Schwerpunkt der Vergabegrundlage in der Einführung eines Energiemonitorings und der Durchführung von kontinuierlichen Messungen. Dies geschah vor dem Hintergrund, dass viele RZ-Betreiber ihren Energieverbrauch bis dato nicht kannten bzw. den einzelnen Infrastrukturbereichen nicht zuordnen konnten. Durch die Einführung eines Energiemonitorings sollten sie mithilfe vorgegebener Messpunkte dazu in die Lage versetzt werden, Energieverbräuche zu erkennen und das Gesamtsystem zu optimieren. In der ersten Anwendung der Vergabegrundlage bei den Nutzern des Umweltzeichens wurden dadurch Verbrauchsdaten gesammelt und einer weiteren Auswertung durch das UBA zugänglich gemacht.

Mit der Weiterentwicklung der Vergabegrundlage im Jahr 2015 wurden Mindestanforderungen für die Energieeffizienz der Rechenzentren in Form der *Energy Usage Effectiveness* (EUE) sowie verschärfte Anforderungen an die Energieeffizienz der Kühlsysteme festgelegt. Seit der Ausgabe vom Februar 2015 lautet der Titel der Vergabegrundlage folgerichtig „Energieeffizienter Rechenzentrumsbetrieb“. Diese Ausgabe des Umweltzeichens ist voraussichtlich noch bis zum 31.12.2018 gültig.

Die aktuelle Vergabegrundlage enthält keine expliziten Anforderungen zum Ressourcenschutz bzw. zum sparsamen Einsatz von IT-Geräten. Jedoch sind die Kriterien darauf ausgelegt, eine lange Nutzungsdauer der IT-Geräte zu ermöglichen. Denn eine lange Nutzungsdauer von IT-Geräten führt i. d. R. zu einer Einsparung von Ressourcen. Dies trifft oft auch dann zu, wenn die älteren Komponenten in der Nutzungsphase höhere Energieverbräuche aufweisen, als energieeffizientere Neugeräte. Dies ist in der Vergabegrundlage implizit berücksichtigt, indem sowohl für die EUE als auch für die JAZ unterschiedlich ambitionierte Grenzwerte festgelegt werden, abhängig vom Zeitpunkt der Inbetriebnahme des RZ. An ältere Komponenten werden weniger scharfe Anforderungen gestellt als an Neukomponenten. Die Vergabegrundlage motiviert also ausdrücklich nicht dazu, funktionstüchtige Komponenten durch energieeffizientere Neugeräte zu ersetzen. Werden jedoch während der Nutzungszeit des Umweltzeichens Komponenten neu angeschafft, so müssen hohe Energieeffizienzstandards erfüllt bzw. klimaschonende Kältemitteln eingesetzt werden.

Der Informationsverarbeitung in zentralen RZ kommt eine immer wichtigere Rolle zu. Dadurch gewinnen der Energieverbrauch und die Inanspruchnahme abiotischer Rohstoffe durch RZ in Deutschland zusehends an Bedeutung. Mit Blick auf die Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesrepublik Deutschland und das darin enthaltene Deutsche Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes) müssen die Entwicklungen im Bereich der RZ deshalb aufmerksam beobachtet und nach Möglichkeit in eine ressourcenschonende Richtung gelenkt werden.

Das Umweltzeichen Blauer Engel bietet die Möglichkeit, umweltfreundliches Verhalten von Unternehmen auf freiwilliger Basis hervorzuheben und Kunden die Entscheidung zugunsten umweltfreundlicher Produkte und Dienstleistungen zu erleichtern. Daher sollte der Blaue Engel für RZ zu einem Umweltzeichen für „energie- und ressourceneffizientem Rechenzentrumsbetrieb“ weiter entwickelt werden. Idealerweise könnte das Umweltzeichen die Betreiber in die Lage versetzen, die Ressourceninanspruchnahme durch ihre RZ zu bilanzieren und einer Effizienzstrategie zugänglich zu machen.

Die im Rahmen dieses Projektes entwickelte Methodik zur Bewertung der Ressourceninanspruchnahme von RZ bietet dazu einen ersten Baustein. Allerdings sind die Ergebnisse der entwickelten Methodik noch mit einigen Unsicherheiten behaftet. Weder die Ermittlung der IT-Leistung eines RZ (siehe

Abschnitt 3.3) noch die Bilanzierung der Umweltauswirkungen (siehe Abschnitt 3.4) sind derzeit ohne großen Aufwand möglich. Hinzu kommen noch methodische Probleme und Schwierigkeiten bei der Datenverfügbarkeit. Ein Vergleich verschiedener RZ mit unterschiedlicher Ausstattung und unterschiedlichen Aufgaben ist daher derzeit noch nicht möglich. Die Methodik eignet sich jedoch bereits jetzt dazu, die Verteilung des Ressourcenaufwandes über die verschiedenen Infrastrukturkomponenten der RZ zu erfassen und in einem Ressourcen-Monitoring auszuwerten. Weiterhin eignet sich die Methodik dazu, Investitionsentscheidungen zur Optimierung von RZ im Hinblick auf die Ressourcenanspruchnahme zu unterstützen. So könnte bspw. die Fragestellung, ob sich der Austausch einer ineffizienten USV-Anlage durch eine Neuanlage mit einem höheren Wirkungsgrad aus Umweltsicht lohnt, durch das Abwägen des Herstellungsaufwandes gegenüber der eingesparten Energie in der Nutzungsphase beantwortet werden.

Bezogen auf das Umweltzeichen kann das KPI4DCE-Tool in seiner jetzigen Form als Monitoring-Tool genutzt werden. Jedoch ist es derzeit noch nicht möglich, Kennzahlen für ressourceneffiziente RZ festzulegen. Bislang ist nicht bekannt, welcher Ressourcenaufwand für eine IT-Dienstleistung (z. B. Bereitstellung eines hochverfügbaren, klimatisierten Servers) ressourcensparsam und als umweltfreundlich zu bezeichnen ist. Entsprechend können auch keine Mindestanforderungen festgelegt werden, die durch ein umweltverträgliches RZ erfüllt werden müssen.

Analog zur Einführung eines Energiemonitorings in RZ mit der ersten Ausgabe der Vergabegrundlage RAL-UZ 161 im Jahr 2012, könnte das KPI4DCE-Tool dazu genutzt werden, ein verbindliches Ressourcen-Monitoring einzuführen. Der Titel einer entsprechenden Vergabegrundlage könnte dann bspw. „Energieeffizienter und ressourcenbewusster Rechenzentrumsbetrieb“ lauten. Bereits bei der bestehenden Vergabegrundlage wird für Server, Datenspeichersysteme und Netzwerkgeräte gefordert, deren technische Daten aus der Inventar-Datenbank (CMDB) auszulesen und in einer IT-Geräteliste zu dokumentieren. Zusätzlich wird bei der bestehenden Vergabegrundlage ein verbindliches Monitoring gefordert, das die Auslastung der wesentlichen IT-Komponenten (CPU, RAM, HDD) sowie die Leistungsaufnahme der verschiedenen Infrastrukturbereiche an definierten Messpunkten dokumentieren muss. Das hier entwickelte KPI4DCE-Tool baut auf dieser IT-Geräteliste und dem Monitoring auf, weshalb ein Grundstock an Daten vergleichsweise leicht übernommen werden kann. Zusätzlich werden im KPI4DCE-Tool aber noch jene Parameter erfasst, die den Ressourcenverbrauch der Rechenzentren wesentlich beeinflussen (z. B. das Gewicht der jeweiligen IT-Geräte und Daten zu den eingesetzten Halbleiterchips). Auch das Monitoring müsste ausgeweitet werden. Für das KPI4DCE-Tool müssen zusätzlich noch IT-Geräte spezifische Daten erfasst werden (z. B. CPU-Auslastung pro Server, Schreib-/Lesezugriffe der externen Datenspeicher oder Datendurchsatz der einzelnen Netzwerkgeräte). Der Aufwand zum Monitoring und zur Erfassung und Pflege der Inventar-Datenbank werden mit der Weiterentwicklung des Umweltzeichens ansteigen.

Aufbauend auf den durch die Zeichennehmer des Umweltzeichens und den Anwendern der Berechnungsmethodik gesammelten Daten könnten perspektivisch Kennzahlen für ressourceneffiziente RZ entwickelt werden. Hilfskriterien des bestehenden Umweltzeichens, wie die EUE oder der Virtualisierungsgrad können durch die neu entwickelten Ressourceneffizienz Kennzahlen ersetzt werden. Anders als bei der EUE ist die Datenlage für die hier entwickelten Indikatoren zur Beurteilung der Ressourceneffizienz jedoch noch sehr dünn. Daher wird der Übergang vom Monitoring der Ressourcen bis zur Festlegung von Mindestanforderungen schwieriger sein, als bei der Energieeffizienz.

Das KPI4DCE-Tool zur Anwendung der Ressourceneffizienz-Methodik wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens als wissenschaftlicher Prototyp entwickelt. Damit es im Rahmen eines Umweltzeichens durch die RZ-Betreiber genutzt werden kann, sollte dieses zu einem Ressourcen-Monitoring-Tool weiterentwickelt werden. Diese Weiterentwicklung sollte gegenüber dem bestehenden KPI4DCE-Tool noch einige Verbesserungen und Optimierungen beinhalten:

- ▶ Einfachere Bedienbarkeit: Schutz vor Fehlbedienung, Vorgabe von Default-Werten, Vorgabe verschiedener RZ-Konzepte, Plausibilitätsprüfungen bei der Eingabe.
- ▶ Optimierte Struktur: Modularer Aufbau, Erweiterungsmöglichkeit von Datensätzen und Infrastrukturkomponenten, transparentere Datenverknüpfungen, Einbeziehung anwendereigener Datensätze.
- ▶ Verbesserte Datengrundlage für die IT-Geräte, Gebäudetechnik, Ökobilanz-Datensätze, Performance-Benchmarks, RZ-Architekturen, Auslastungsdaten und Vorgabewerte.
- ▶ Zentrale Bereitstellung von neuen Datenmodulen (z. B. über einen Server zur Versionsverwaltung) und Möglichkeiten im KPI4DCE-Tool zum einfachen Update.
- ▶ Werkzeuge für den Anwender des KPI4DCE-Tools zur kontinuierlichen Pflege und Ergänzung der von ihm erfassten Daten und Inventarlisten.
- ▶ Ausbau der Auswertungsmöglichkeiten (z. B. auf IT-Anwendungsebene) und Optimierungswerkzeuge (z. B. Sensitivitätsanalysen), grafische Ergebnisdarstellung, Export von Berichten.
- ▶ Kompatibilität zu anderen Monitoring-Instrumenten: Datenimport aus CMDB, Möglichkeiten zum Datenexport, Harmonisierung mit Systemen zur Planung nachhaltiger Bauwerke (z. B. Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude).
- ▶ Erstellung eines Handbuchs für die Anwendung des Ressourcen-Monitoring-Tools.

Zusammenfassend kann als Empfehlung für das Umweltzeichen Blauer Engel formuliert werden:

- ▶ Weiterentwicklung des KPI4DCE-Tools zu einem Ressourcen-Monitoring-Tool
- ▶ Einführung eines verbindlichen Ressourcen-Monitorings beim Umweltzeichen
- ▶ Berechnung von Ressourceneffizienzkennzahlen für die beteiligten Rechenzentren
- ▶ Bereitstellung dieser Daten an das UBA zur Weiterentwicklung der Berechnungsmethodik und des Umweltzeichens, ggf. verpflichtende Veröffentlichung ausgewählter Kennzahlen durch den Nutzer des Umweltzeichens.

5.2 Empfehlungen für die Normung

Der Schutz der natürlichen Ressourcen ist bereits in der politischen Agenda angekommen. In Deutschland sind die Ziele zum Ressourcenschutz im Deutschen Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes) verankert. Mit dem Kreislaufwirtschaftspaket hat die EU-Kommission angekündigt, europaweit eine kreislauforientierte Wirtschaft zu etablieren und den Kreislauf von Design, Herstellung, Nutzung und Entsorgung zu schließen. Vor diesem Hintergrund muss auch in den Normungen der politische Wille umgesetzt und müssen Indikatoren für die Ermittlung der Ressourceneffizienz etabliert werden.

Für die ganzheitliche Betrachtung des **Ressourcenaufwandes** für ein RZ können aus den Ergebnissen des Forschungsvorhabens vor allem die Indikatoren ADP, KEA und THG für die weitere Verwendung in der internationalen Normung empfohlen werden.

Insbesondere der ADP scheint gut geeignet zu sein, um die Bereiche des tatsächlichen Ressourcenaufwandes zu schließen. Denn bisher wird die Ressourcenaufwandseite in der Normung lediglich über den Strombedarf des RZ abgebildet. Der ADP erfüllt hierbei bereits fast alle Voraussetzungen für die Standardisierung. Die allgemeine Berechnungsvorschrift für den ADP ist in der ISO 14040 dargestellt und müsste für den abiotischen Rohstoffaufwand von RZ aber noch angepasst bzw. erweitert werden. Die Projektergebnisse bilden dafür eine gute Grundlage. Die technische Machbarkeit und die Anwendbarkeit der Methode wurden im Projekt anhand von drei RZ nachgewiesen. In diesem Zusammenhang müsste zusätzlich geprüft werden, ob die im Forschungsvorhaben genutzten Datenbanken (ecoinvent, ProBas) die Anforderungen an die Normung erfüllen können.

Auch für den Aufwandsindikator THG sollte die spezifische Ausrichtung auf den RZ-Betrieb herausgearbeitet werden, damit eine klare Abgrenzung zu dem bestehenden allgemeinen Normungsansatz des „Carbon Footprinting“ erfolgen kann. Für die Betrachtung der CO₂-Emissionen gibt es in der aktuellen

Normung mit der *Carbon Usage Effectiveness* (CUE) zwar schon einen ersten Ansatz, der bisher allerdings auch nur auf den Strombedarf des RZ beschränkt ist. Auf der Grundlage der Projektergebnisse wird deutlich, dass der hier verwendete Indikator THG deutlich besser geeignet ist, um den Ressourcenaufwand eines RZ über die tatsächliche Lebensdauer darzustellen.

Im Bereich der **Leistungsindikatoren** gibt es auf internationaler Ebene bereits einen Ansatz zur standardisierten Erfassung der Leistung der IT im RZ. Der aktuelle Ansatz der Norm *ISO 30134* mit den Kennwerten $ITEE_{SV}$ und $ITEU_{SV}$ in Verbindung mit der Norm *ISO 21836* (SEEM) findet breiten Zuspruch unter den Normungsexperten. Mittlerweile besteht allgemeiner Konsens in der weltweiten ISO-Normung. Die Messmethoden und Berechnungsvorschriften sind über den SPECpower_ssj2008-Benchmark erprobt und anerkannt. Der Vorteil in der praktischen Anwendung ist, dass die Messungen nicht nur von den RZ-Betreibern, sondern auch von den Herstellern mit der gleichen definierten Messmethode durchgeführt werden können. Der Nachteil ist, dass mit dieser Methode bisher keine kontinuierliche Messung der tatsächlich erbrachten Serverleistung möglich ist.

An dieser Stelle könnte der in diesem Forschungsvorhaben untersuchte Ansatz zur Bestimmung des Leistungsvermögens der Server über CPU-spezifische SPECint_rate-Werte in Verbindung mit der kontinuierlichen Messung der CPU-Auslastung einen echten Mehrwert bieten. Dafür müsste aber für die CPU-Messungen eine allgemeingültige Vergleichbarkeit nach einem definierten Standard erreicht werden. Für die praktische Umsetzung bzw. die Normungsrelevanz als anerkannte Regel/Stand der Technik könnte der relativ große Aufwand bei der Datenerfassung (sehr große Anzahl von CPU-Messungen) nachteilig sein.

Der Ansatz in der *ISO 30134* ($ITEE_{SV}$, $ITEU_{SV}$) in Verbindung mit der *ISO 21836* (SEEM) geht einen anderen Weg. Im Gegensatz zu der im Forschungsvorhaben vorgeschlagenen kontinuierliche Messung von CPU-spezifischen SPECint_rate-Werten werden Methoden und Tools definiert, die es dem Betreiber ermöglichen, den RZ-spezifischen Wert in der realen RZ-Umgebung des Betreibers in Form einer Referenzmessung zu erheben. Hierfür soll der RZ-Betreiber das Benchmark-Tool für den SEEM auf ausgewählten Servern in seiner Produktivumgebung installieren und den Benchmark für den definierten Zeitraum unter realen Bedingungen in seiner RZ-Umgebung ausführen. Dabei können z. B. auch Cluster für verschiedene Server und Anwendungen gebildet werden. Der Messaufwand wird damit deutlich reduziert, was allerdings auch zu einem Verlust an Information führt. Damit der in diesem Vorhaben entwickelte Ansatz in die bestehenden Ansätze der *ISO 30134* und *ISO 21836* eingebunden werden kann, müsste ein deutlicher Mehrwert für die Betreiber nachgewiesen werden, der den deutlich größeren Aufwand bei der Datenerfassung rechtfertigt.

Zum aktuellen Stand der internationalen Normung im Bereich der Leistungsindikatoren könnte der hier gewählte Ansatz über die kontinuierliche Messung von CPU-spezifischen SPECint_rate-Werten als Ergänzung bzw. Variante innerhalb des $ITEU_{SV}$ bzw. $ITEE_{SV}$ vorgeschlagen werden. Ein Vorschlag des hier gewählten Ansatzes als Einzelindikator neben dem oben beschriebenen Ansatz der *ISO 30134* erscheint hingegen wenig aussichtsreich, da die Überschneidungen mit dem bestehenden Ansatz der *ISO 31034* sehr groß sind.

Für den hier vorgeschlagenen **Gesamtansatz** eines Kennwertes, der den Aufwand über Ressourceninanspruchnahme und den Nutzen über die Leistungsindikatoren verbindet, ist der aktuelle Stand der Technik noch nicht ausreichend erprobt. Es fehlen an vielen Stellen noch wesentliche Voraussetzungen für die Standardisierung. Insbesondere die Erprobung der hier wissenschaftlich beschriebenen Methode für die Einzelmessungen im realen Betrieb eines RZ über einen längeren Zeitraum fehlt noch. Auch die Untersuchung der wesentlichen Einflussfaktoren mit ihren Wechselwirkungen sollte z. B. über eine detaillierte Sensitivitätsanalyse anhand realer Betriebsdaten von RZ durchgeführt werden. Auf der anderen Seite erscheint auch der aktuelle Stand der Normung noch nicht reif für eine solche übergeordnete Kennzahl.

Empfehlung: Im ersten Schritt wurden bereits die hier untersuchten Indikatoren ADP, KEA und THG für die EU-weiten Normung dem TC 215 CENELC für die EN 50600-4 bzw. EN 50600-99 vorgeschlagen. Anschließend sollten diese Indikatoren auch im Rahmen der ISO 30134 vorgeschlagen werden. Dieses Vorgehen hat sich auch bei der EN 50600 bewährt. Der Vorteil liegt hier bei der deutlich kürzeren Umsetzungszeit im Rahmen der EU-Normung im Vergleich zur weltweiten ISO-Normung. Wenn die Standards für Indikatoren zum Ressourcenaufwand und die Leistungsindikatoren abgestimmt und konsensfähig sind, dann könnte der hier betrachtete Ansatz zur Gesamteffizienz im Sinne von Nutzen in Bezug zum Aufwand auch für die internationale Normung als übergeordneter Kennwert als Produkt abgestimmter, standardisierter und erprobter Indikatoren vorgeschlagen werden.

5.3 Empfehlungen für weitere Forschungsarbeiten

Im Rahmen des Vorhaben konnten zur Begrenzung des Umfangs nicht alle identifizierten Problemstellungen vollständig geklärt werden. Teilweise ergaben sich auch neue Fragestellungen. Nachstehend sind daher mögliche zukünftige Forschungsarbeiten aufgeführt.

Überprüfung und Weiterentwicklung der Modelle für die Erfassung des Ressourcenaufwands

Bei der Modellierung der Ressourceninanspruchnahme durch das RZ wurde zur Begrenzung des Umfangs der Untersuchung, zur Vereinfachung der Realität oder mangels Verfügbarkeit von Daten eine Reihe von Annahmen getroffen. Die Annahmen beeinflussen die Ergebnisse und können Ausstattungsvarianten von RZ bevor- oder benachteiligen. Als ein Beispiel sei die Modellierung der Blade Systeme angeführt, bei denen für alle Blade Server Module eine einheitliche Größe der Leiterplatte angenommen wurde. In der Realität existieren verschiedene Größenklassen von Blade Servern, so dass für ein RZ mit Modulen eines kleineren Formfaktors mit dem Modell eine zu große Inanspruchnahme von Ressourcen bilanziert wird. Eine zukünftige Forschung könnte ausgehend von dem aktuellen Arbeitsstand die getroffenen Annahmen überprüfen, das Ressourcenaufwandsmodell an geeigneter Stelle verfeinern und um bisher nicht betrachtete Komponenten der Gebäudetechnik erweitern.

Weiterentwicklung der Indikatoren zur Erfassung der Leistung der Datenspeichersysteme

Das Kennzahlensystem erfasst die Leistung der Datenspeichersysteme mit drei Indikatoren, die jeweils der Ressourceninanspruchnahme der gesamten Datenspeichersysteme gegenübergestellt werden. Da durch die Fallstudien keine verlässlichen Daten aus Produktivumgebungen zur vertiefenden Analyse zur Verfügung standen, sollte sich ein Forschungsprojekt mit der richtungssicheren Erfassung der Ressourceneffizienz der Datenspeichersysteme befassen. Basierend auf einer feingranularen Erfassung der Leistung für voneinander abgrenzbare Anwendungsbereiche von Datenspeichersystemen könnte untersucht werden, ob die Anzahl der Indikatoren reduziert werden kann oder es im Sinne der Richtungssicherheit zwingend notwendig ist, den Ansatz nach Anwendungsbereich der Datenspeichersysteme zu differenzieren. Auch sollte untersucht werden, ob und wie die Latenz der Datenspeichersysteme in die Leistungsbewertung einfließen kann. Darüber hinaus könnte geprüft werden, ob und wie ein Leistungsindikator zur Erfassung des belegten Speicherplatzes die Anwendung von Mechanismen zur ressourcenschonenden Reduktion der Menge gespeicherter Daten abbilden könnte.

Erweiterung des KPI4DCE-Indikatorensatzes um die Bewertung der Kosteneffizienz

Der KPI4DCE-Indikatorensatz fokussiert in seiner derzeitigen Form ausschließlich die Bewertung der Effizienz der Inanspruchnahme natürlicher Ressourcen. In der Praxis interessieren Betreiber von Rechenzentren vor allem aber auch die finanziellen Aspekte, also die Kosten und der Gewinn. Während der Gewinn immer von den Preisen abhängt, die je nach Wettbewerb und Zusatzdiensten stark variieren können, könnte ein zukünftiges Forschungsvorhaben den KPI4DCE-Indikatorensatz auf Basis eines Modells zur Erfassung der Lebenszykluskosten um vergleichbare Kennzahlen zur Erfassung der Kos-

teneffizienz erweitern. Aus umweltwissenschaftlicher Sicht ist vor allem interessant, ob und wie die verschiedenen Dimensionen der Effizienz zueinander in Beziehung stehen. Das heißt eine hohe Kosteneffizienz sollte aus ökologischer Sicht idealerweise mit einer geringen Inanspruchnahme von Rohstoffen und einer hohen Energieeffizienz einhergehen.

Durchführung einer Feldstudie zur Generierung von Benchmarks

Die in den Fallstudien untersuchten RZ haben gezeigt, dass die Messung der Indikatoren prinzipiell möglich ist, die flächendeckende Erhebung der erforderlichen Daten aber für die RZ eine große Herausforderung darstellt. Daher mussten zur Vervollständigung der Datensätze teilweise Annahmen getroffen und trotzdem konnten nicht alle spezifizierten Kennzahlen berechnet werden. Unabhängig davon sind drei Datensätze nicht ausreichend, um Benchmarks z. B. für den Blauen Engel zu bestimmen. Daher sollte es ein Ziel der Forschung die Erweiterung der Fallbeispiele um 20 bis 30 unterschiedliche RZ sein. Die RZ sollten sich in Größe und Kernaufgaben deutlich voneinander unterscheiden. Idealerweise setzen die in einer Feldstudie betrachteten RZ jeweils eine technische oder prozedurale Innovation zur Steigerung der Ressourceneffizienz um, so dass auch die Wirkungen von Best Practices auf die Ausprägung der Kennzahlen untersucht werden können.

Weiterentwicklung des KPI4DCE-Indikatorensatzes für HPC-Systeme

Die für das HPC konstruierten IT-Systeme dienen der performanten Abarbeitung komplexer Rechenaufgaben. Hierbei kommt es auf das optimale Zusammenspiel der über ein extrem schnelles Netzwerk miteinander verbundenen Rechen- und Speicherknoten an. Da HPC-Systeme für die Gesamtheit der Rechenzentren eine untergeordnete Rolle spielen, wurden sie in dieser Studie nicht gesondert betrachtet. In Hinblick auf die Richtungssicherheit des Indikatorensatzes muss beachtet werden, dass die Ressourceneffizienz der HPC-Systeme nicht für einzelne IT-Subsysteme, sondern auf Ebene des Gesamtsystems z. B. mit dem LINPACK-Benchmark bewertet werden sollte. Zudem kommen meist zusätzliche Management-Komponenten und Hardwarebeschleuniger (z. B. Grafikprozessoren) zum Einsatz, die mit dem bestehenden Modell zur Erfassung der Ressourceninanspruchnahme nicht abgebildet werden. Da HPC-Systeme in Zukunft sehr wahrscheinlich eine größere Verbreitung finden werden, ist eine diesbezügliche Anpassung des KPI4DCE-Indikatorensatzes und Erprobung der Methodik an realen HPC-Systemen empfehlenswert.

Bewertung der Ressourceneffizienz und Umweltwirkungen von Cloud Services

Die in diesem Vorhaben entwickelten Kennzahlen erfassen die Ressourceneffizienz der IT auf Ebene der physischen Infrastruktur. Sie erlauben eine Bewertung, ob die IT-Geräte ressourceneffizient arbeiten. Inwiefern Applikationen und Dienste mit den IT-Geräten ressourcenschonend bereitgestellt werden, kann mit dem Indikatorensatz nicht beurteilt werden. Hierzu müsste nicht die IT-Leistung der IT-Subsysteme Server, Datenspeicher und Netzwerke auf Infrastrukturebene erfasst werden, sondern die Menge der bereitgestellten Instanzen der IT-Dienste. Vor allem IT-Dienste aus Public Clouds mit ihren hohen Volumina und ihrem hohen Grad an Standardisierung bieten eine Möglichkeit, die Methodik dahingehend weiterzuentwickeln. Ziel der Forschung könnte es sein, Berechnungsvorschriften und Allokationsregeln zu definieren, mit denen in standardisierter Form die Inanspruchnahme von Ressourcen pro Instanz eines IT-Dienstes ermittelt werden kann. Die Methodik könnte beispielhaft auf ausgewählte Cloud Dienste verschiedener Anbieter angewendet werden und idealerweise die Ressourceneffizienz vergleichbarer Cloud Dienste gegenübergestellt werden.

6 Ausblick

RZ werden im Angesicht der fortschreitenden digitalen Transformation immer wichtiger. Zentrale Wachstumstreiber sind im Unternehmensbereich Data Analytics, Industrie 4.0, Kollaboration und bei den Endverbrauchern Video Streaming, Soziale Netzwerke und das Internet der Dinge. Auch in Zukunft werden Innovationen dafür sorgen, dass die Branche kräftig weiterwachsen wird. Gleichzeitig ist eine globale Verknappung der natürlichen Ressourcen beobachtbar. Die Bedeutung des effizienten Umgangs mit natürlichen Ressourcen wird daher zunehmen.

Um der steigenden Ressourceninanspruchnahme der RZ zu begegnen, sind Kraftanstrengungen aller Beteiligten erforderlich. Bisher wird im Bereich der RZ überwiegend auf die Freiwilligkeit der Betreiber gesetzt. Bei steigendem Umweltbewusstsein der Konsumenten kann die Ressourceneffizienz eines RZ für die Betreiber ein wichtiger Wettbewerbsvorteil sein. Auch ist die Ressourceneffizienz des eigenen RZ ein wichtiges Pro-Argument des CIO gegenüber der Unternehmensleitung für den Erhalt des eigenen RZ gegenüber einem möglichen Outsourcing.

Die Rohstoff- und Energieeffizienz müssen hierbei abgewogen werden. Mit dem in diesem Vorhaben entwickelten Kennzahlensystem wurde ein wichtiger Schritt getan, um die Ressourceneffizienz von RZ ganzheitlicher und richtungssicherer beurteilen zu können. Auf dem in diesem Forschungsvorhaben entwickelten Kennzahlensystem beruhend, können zukünftig besser Best Practices bestimmt und zielgerichtete Optimierungsmaßnahmen abgeleitet werden.

Entscheidend wird sein, dass die Messung der Ressourceneffizienz in den RZ zum Standard wird. Hier besteht großer Nachholbedarf. Die aktuellen Bemühungen zur Normung von Rechenzentren und die weitere Verbreitung des Cloud Computing werden die Standardisierung vorantreiben und in Zukunft einen Vergleich der ökologischen Qualität von IT-Diensten ermöglichen. Mittelfristig könnte sich dann ein Wettbewerb zwischen den RZ um die höchste Ressourceneffizienz etablieren, der über ein bloßes Green Washing hinausgeht.

7 Quellenverzeichnis

- Acton, M.; Bertoldi, P.; Booth, J.; Flucker, S.; Newcombe, L.; Rouyer, A. (2017): 2017 Best Practice Guidelines for the EU Code of Conduct on Data Centre Energy Efficiency Version 8.1.0. European Commission Directorate – General. Joint Research Centre. Institute for Energy Renewable and Energy Efficiency Unit. Online verfügbar unter [http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC104370/2017 best practice guidelines v8.1.0 final.pdf](http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC104370/2017%20best%20practice%20guidelines%20v8.1.0%20final.pdf), zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Aebischer, B.; Frischknecht, R.; Genoud, C.; Huser, A.; Varone, F. (2003): Energy- and Ecoefficiency of Data Centres. Commissioned by DIAE / ScanE of the Canton of Geneva. Département de l'intérieur, de l'agriculture et de l'environnement Genève, Service cantonal de l'énergie Genève, Genf. Online verfügbar unter http://www.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mtec/cepe/cepe-dam/documents/people/baebischer/Aebischer_data_centres_final_report_05012003.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Alliance for Telecommunication Industry Solutions (2009): Energy Efficiency for Telecommunications Equipment: Methodology for Measurement and Reporting for Router and Ethernet Switch Products. ATIS. Washington D.C.
- Almes, G.; Kalidindi, S.; Zekauskas, M. (2016): Request for Comments: 7679: A One-Way Delay Metric for IP Performance Metrics (IPPM). Online verfügbar unter <https://tools.ietf.org/html/rfc7679>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Anderson, D.; Cader, T.; Darby, T.; Gruendler, N.; Hariharan, R.; Holler, A.; Lindberg, C.; Long, C.; Morris, P.; Rawson, A.; Rawson, F.; Saletore, V.; Simonelli, J.; Singh, H.; Tiple, R.; Verdun, G.; Wallerich, J. (2008): A Framework for Data Center Energy Productivity. The Green Grid, Beaverton. OR. Online verfügbar unter <http://www.greenbiz.com/sites/default/files/document/GreenGrid-Framework-Data-Center-Energy-Productivity.pdf>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Apple (2012): Mac mini with OS X Server. Environmental Report. Online verfügbar unter http://images.apple.com/euro/environment/pdf/e/generic/products/archive/2012/macmini_server_oct2012.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Avelar, V.; Azevedo, D.; French, D. A. (2012): PUE : A comprehensive examination of the metric. The Green Grid. Beaverton. OR. 2010. Online verfügbar unter [https://datacenters.lbl.gov/sites/all/files/WP49-PUE A Comprehensive Examination of the Metric v6.pdf](https://datacenters.lbl.gov/sites/all/files/WP49-PUE%20A%20Comprehensive%20Examination%20of%20the%20Metric_v6.pdf), zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Azevedo, D.; Cooley, J.; Patterson, M.; Blackburn M. (2011): Data Center Efficiency Metrics: mPUE, Partial PUE, ERE, DCcE. The Green Grid Technical Forum. Online verfügbar unter http://www.cloud-finder.ch/fileadmin/Dateien/PDF/Reports/Data_Center_Efficiency_Metrics_2011.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Azevedo, D.; Rawson, A. (2008): Measuring Data Center Productivity, The Green Grid Technical Forum. Presentation.
- Barroso, L.; Hoelzle, U. (2009): The Datacenter as a Computer. An Introduction to the Design of Warehouse-Scale Machines. San Rafael. Online verfügbar unter <http://web.eecs.umich.edu/~mosharaf/Readings/DC-Computer.pdf>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Belady, C.; Patterson, M. (2008): The Green Grid Productivity Indicator. The Green Grid. Beaverton. OR. Online verfügbar unter <https://www.thegreengrid.org/en/resources/library-and-tools/395-WP>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Belady, C.; Azevedo, D.; Patterson, M.; Pouchet, J.; Tiple, R. (2010): Carbon Usage Effectiveness (CUE) - A Green Grid Data Center Sustainability Metric. The Green Grid. Beaverton. OR. Online verfügbar unter https://www.netalis.fr/wp-content/uploads/2016/04/Carbon-Usage-Effectiveness-White-Paper_v3.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Belady, C.; Rawson, A.; Pflueger, J.; Cader, T. (2008): Green Grid Data Center Power Efficiency Metrics: PUE and DCIE. The Green Grid, Beaverton.
- Bengt Steen (1999): A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS). Version 2000 – Models and data of the default method. Chalmers University of Technology, Technical Environmental Planning. Online verfügbar unter [http://www.cpm.chalmers.se/document/reports/99/EPS Version 2000 Models and Data of the Vorgabe Method CPM Report 1999-5.pdf](http://www.cpm.chalmers.se/document/reports/99/EPS%20Version%202000%20Models%20and%20Data%20of%20the%20Vorgabe%20Method%20CPM%20Report%201999-5.pdf), zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Berger, Manfred (18.07.2016). Einschätzung der Fläche der Leiterplatte in SSDs (Email).
- Berger, Markus; Bach, Vanessa und Finkbeiner, Matthias (2015): ESSENZ Methode zur Messung der Ressourceneffizienz. Online verfügbar unter <http://www.matresource.de/fileadmin/redakteure/pdf/Vortraege/Berger.pdf>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.

- Berwald, Anton (2017a): Midplane und Backplane in Blade-Server-Gehäuse, 30.05.2017. Email an Ran Liu.
- Berwald, Anton (2017b): CPU heatsinks, 25.06.2017. Email an Ran Liu.
- Bio by Deloitte (2015): Preparatory study for implementing measures of the Ecodesign Directive 2009/125/EC DG ENTR Lot 9. Enterprise servers and data equipment. Online verfügbar unter http://www.eup-network.de/fileadmin/user_upload/BIO_ENTR_Ecodesign_Lot_9_1st_support_document.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- BITKOM (2015): Energieeffizienz in Rechenzentren. Online verfügbar unter <https://www.bitkom.org/Publikationen/2015/Leitfaden/LF-Energieeffizienz-in-Rechenzentren/150911-LF-Energieeffizienz-in-RZ.pdf>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Blackburn, M. (2012): Data Center Storage Efficiency Metrics. The Green Grid Forum. Online verfügbar unter <https://www.thegreengrid.org/en/resources/library-and-tools/145-2012-Forum-%E2%80%93-Data-Center-Storage-Efficiency-Metric>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Blackburn, M. Azevedo, D.; Hawkins, A.; Ortiz, Z.; Tiple, R.; Berghe, S.: (2010): The Green Grid Data Center Compute Efficiency Metric: DCCe. The Green Grid, Beaverton, OR, 2010. Online verfügbar unter <http://docshare03.docshare.tips/files/14778/147781031.pdf>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- BMU/UBA (1997): Leitfaden Betriebliche Umweltkennzahlen. BMU/UBA. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/419/publikationen/leitfaden_betriebliche_umweltkennzahlen.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Boulos, Stephanie; Nuttall, Chris; Harrison, Bob; Moura, Pedro und Jehle, Christoph (2014): ErP Lot 27-Uninterruptible Power Supplies. Preparatory Study -Final Report (ENERG/C3/413-2010-LOT 27-Sli2.611335) (European Commission, DG Energy, Hrsg.) (Ricardo-AEA/R/ED56828). Ricardo-AEA. Online verfügbar unter http://www.eup-network.de/fileadmin/user_upload/Lot-27-Consolidated-Final-Report.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Boyd, S. B.; Horvath, S; Dornfeld, D.A. (2010): Supplementary data for 'Life-cycle assessment of computational logic produced from 1995 through 2010'. Online verfügbar unter <http://iopscience.iop.org/1748-9326/5/1/014011/media>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Brill, K. (2007): Data Center Energy Efficiency and Productivity. Uptime Institute, New York, NY. Online verfügbar unter [https://connect.ufl.edu/cns/DCO/ecdc/ECDC_Construction_Project/Whitepapers/Data_Center_Energy_Efficiency_\(Uptime_Inst\).pdf](https://connect.ufl.edu/cns/DCO/ecdc/ECDC_Construction_Project/Whitepapers/Data_Center_Energy_Efficiency_(Uptime_Inst).pdf), zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Brown, E.; Banks, M.; Benjamin, E.; Calderwood, T.; Llera, R.; Pflueger, J.; Schroeder, G.; Singh, H.; Stawarz, S.; Watson, M. (2012): Electronic Disposal Efficiency (EDE): An IT Recycling Metric For Enterprises And Datacenters. The Green Grid. Beaverton. OR. Online verfügbar unter [https://www.thegreengrid.org/en/resources/library-and-tools/235-Electronics-Disposal-Efficiency-\(EDE\)%3A-An-IT-Recycling-Metric-for-Enterprises-and-Data-Centers-](https://www.thegreengrid.org/en/resources/library-and-tools/235-Electronics-Disposal-Efficiency-(EDE)%3A-An-IT-Recycling-Metric-for-Enterprises-and-Data-Centers-), zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Cappuccio (2012): Rack Unit Effectiveness—A Useable Data Center Metric. Gartner. Online verfügbar unter http://blogs.gartner.com/david_cappuccio/2012/11/09/rack-unit-effectiveness-a-useable-data-center-metric/, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Daim, T., Justice, J., Krampits, M., Letts, M., Subramanian, G. und Thirumalai, M. (2009). Data center metrics: an energy efficiency model for information technology managers. Management of Environmental Quality: An International Journal, 20 (6), 712–731.
- De Graaf (2016): HFKW-Emissionen in der stationären Klimatisierung. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/produkte/fluorierte-treibhausgase-fckw>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- DIN EN ISO 14044:2006-10, 2006: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14044:2006.
- Drenkelfort, G., Pröhl, T. und Ere, K. (2013). Energiemonitoring von IKT-Systemen. Kennzahlen. Projektberichte IKM, 3. Online verfügbar unter https://depositonce.tu-berlin.de/bitstream/11303/3853/1/Dokument_25.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- eBay (2013): Digital Service Efficiency. Solutions Brief. San Jose. Online verfügbar unter http://www.ebaytechblog.com/wp-content/uploads/2013/03/FINAL_DSE-Solution-Paper.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.

- ecoinvent V3.2 (2015): ecoinvent life cycle inventory database, current Version 3.2 (released on the 30th November 2015). Online verfügbar unter <http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-32/ecoinvent-32.html>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Emerson Network Power (2011): Recycling Ratios: The Next Step for Data Center Sustainability. Emerson Electric Co.. St. Louis. MO. Online verfügbar unter <http://www.aboutdc.ru/docs/aboutdc/4/RecyclingRatios.pdf>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Energy Consumption Rating Initiative (2008): Energy Efficiency For Network Equipment. ECR. 2008.
- EU Amtsblatt 2013/179/EU (2013): EMPFEHLUNG DER KOMMISSION vom 9. April 2013 für die Anwendung gemeinsamer Methoden zur Messung und Offenlegung der Umwelleistung von Produkten und Organisationen. Online verfügbar unter <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32013H0179>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Fischer, Werner (Thomas-Krenn, Hrsg.) (2016): AMD Server CPUs im Überblick. Online verfügbar unter https://www.thomas-krenn.com/de/wiki/AMD_Server_CPUs_im_Überblick, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Frischknecht, Rolf; Steiner, Roland.; Jungbluth, Niels. (2009): Methode der ökologischen Knappheit – Ökofaktoren 2006. Methode für die Wirkungsabschätzung in Ökobilanzen. Umwelt-Wissen Nr. 0906. Hg. v. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern. Online verfügbar unter https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/wirtschaft-konsum/uw-umwelt-wis-sen/methode_der_oekologischenknappheitoeffaktoren2006.pdf.download.pdf/methode_der_oekologischenknappheitoeffaktoren2006.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- FUJITSU (Hrsg.) (2010a): White Paper: Life Cycle Assessment and Product Carbon Footprint. PRIMERGY TX 300 S5 and PRIMERGY RX 300 S5 Server. Online verfügbar unter http://fujitsu.fleishmaneuropa.de/wp-content/uploads/2010/12/LCA_PCF-Whitepaper-PRIMERGY-TX-RX-300-S5.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- FUJITSU (Hrsg.) (2010b): White Paper: FUJITSU PRIMERGY SERVER – Grundlagen DISK-I/O-PERFORMANCE. Online verfügbar unter <https://sp.ts.fujitsu.com/dmsp/Publications/public/wp-basics-of-disk-io-performance-ww-de.pdf>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Garnier, Christophe (2016): Product Environmental Footprint Category Rules - Uninterruptible Power Supply (UPS). Version: 1.7. Online verfügbar unter http://ec.europa.eu/environment/eusssd/smngp/pdf/pilots/PEFCR_UPS.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Giegrich, Jürgen; Liebich, Axel; Lauwigi, Christoph; Reinhardt, Joachim (2012): Indikatoren / Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion. Hg. v. UBA. ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg GmbH (Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, UBA-FB 001563). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4237.pdf>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- GITPC (2012): New Data Center Energy Efficiency Evaluation Index - (DPPE) Datacenter Performance per Energy Measurement Guidelines (Ver 2.05). Green IT Promotion Council. Tokyo. Online verfügbar unter http://home.jeita.or.jp/greenit-pc/topics/release/pdf/dppe_e_DPPE_Measurement_Guidelines.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- GITPC (2011): Proposal of OGE, On-site Generation Efficiency Metric, and ECI, Energy Carbon Intensity. Green IT promotion Council. Tokyo. Online verfügbar unter http://home.jeita.or.jp/greenit-pc/topics/release/pdf/dppe_e_20110222.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Goedkoop, Mark; Heijungs, Reinout; Huijbregts, Mark; De Schryver, An; Struijs, Jaap; van Zelm, Rosalie (2013): ReCiPe main report (updated May 2013). A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Online verfügbar unter https://35f23ee4-a-62cb3a1a-s-sites.googlegroups.com/site/lciarecipe/file-cabinet/ReCiPe_main_report_MAY_2013.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Goedkoop, Mark; Spriensma, Renilde (2001): The Eco-indicator 99. A damage oriented method for life cycle impact assessment. Methodology Report. Hg. v. PRé Consultants B.V. Online verfügbar unter https://www.pre-sustainability.com/download/EI99_methodology_v3.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Greenberg, S.; Tschudi, W.; Weale, J. (2006): Self Benchmarking Guide for Data Center Energy Performance Version 1.0. Lawrence Berkeley National Laboratory. Berkeley. CA. Online verfügbar unter https://datacenters.lbl.gov/sites/all/files/self_benchmarking_guide-2.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.

- Haas, J.; Monroe, M.; Pflugler, J.; Pouchet, J.; Snelling, P.; Rawson, A.; Rawson, Fr. (2009): Proxy Proposals for measuring Data Center Productivity. The Green Grid. Beaverton. Online verfügbar unter <http://rad.ihu.edu.gr/smartihu/storage/GreenGridProxies.pdf>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Hauschild, Michael; Potting, José (2005): Spatial differentiation in Life Cycle impact assessment. The EDIP2003 methodology. Hg. v. Danish ministry of the environment. Institute for Product Development, Technical University of Denmark (80). Online verfügbar unter <http://www2.mst.dk/udgiv/publications/2005/87-7614-579-4/pdf/87-7614-580-8.pdf>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Herrlin, M. (2008): Airflow and Cooling Performance of Data Centers: Two Performance Metrics. ASHRAE. Atlanta. GA. Online verfügbar unter http://www.ancis.us/images/SL-08-018_Final.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Hilton, Brian; Welch, Michael (2012): Server Primer. Understanding the current state of the industry. Golisano Institute for Sustainability. Online verfügbar unter <http://www.epeat.net/wp-content/uploads/2012/11/ServerPrimer2012.pdf>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Hintemann, R.; Clausen, J. (2016): Der Rechenzentrumsmarkt in Hessen – Aktueller Stand im Jahr 2015 und Ausblick. Berlin. Borderstep Institut im Auftrag der Aktionslinie Hessen IT. Online verfügbar unter <http://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2016/01/Studie-Rechenzentren-in-Hessen-2015-Stand-13-01-2016.pdf>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Hintemann, R. (2015): Deutliches Wachstum bei deutschen Rechenzentren – Update 2015. Berlin. Borderstep Institut. Online verfügbar unter http://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2015/01/Borderstep_Rechenzentren_2015_Stand_16_12_2015.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Hintemann, R.; Clausen, J. (2014): Rechenzentren in Deutschland: Eine Studie zur Darstellung der wirtschaftlichen Bedeutung und der Wettbewerbssituation. Berlin. Borderstep Institut im Auftrag des BITKOM e.V.. Online verfügbar unter <https://www.bitkom.org/Publikationen/2014/Studien/Studie-zu-Rechenzentren-in-Deutschland-Wirtschaftliche-Bedeutung-und-Wettbewerbssituation/Borderstep-Institut-Studie-Rechenzentren-in-Deutschland-05-05-20141.pdf>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Hintemann, R.; Fichter, K.; Stobbe, L. (2010): Materialbestand der Rechenzentren in Deutschland - Eine Bestandsaufnahme zur Ermittlung von Ressourcen- und Energieeinsatz. Borderstep Institute im Auftrag des UBA. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4037.pdf>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Humbert, Sébastien; De Schryver, An; Bengoa, Xavier; Margni, Manuele; Jolliet, Olivier (2012): IMPACT 2002+: User Guide. Draft for version Q2.21. Online verfügbar unter http://www.quantis-intl.com/pdf/IMPACT2002_UserGuide_for_vQ2.21.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- ILCD Handbuch (2010): Analysis of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment. Background document. First edition. Hg. v. European Commission, Joint Research Centre. European Commission Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability. Online verfügbar unter <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-LCIA-Background-analysis-online-12March2010.pdf>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- ILCD Handbuch (2011): Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context. - based on existing environmental impact assessment models and factors. Hg. v. European Commission-Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability (EUR 24571 EN. Luxemburg. Publications Office of the European Union). Online verfügbar unter <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Recommendation-of-methods-for-LCIA-def.pdf>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- ILCD Handbuch (2012): Characterisation factors of the ILCD Recommended Life Cycle Impact Assessment methods. Database and supporting information. Hg. v. European Commission, Joint Research Centre. European Commission Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability (EUR 25167 EN - 2012). Online verfügbar unter <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/LCIA-characterization-factors-of-the-ILCD.pdf>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Intel (Hrsg.) (2015): Intel 2014 Annual Report. Online verfügbar unter <http://people.stern.nyu.edu/adamodar/pdfiles/cfovhd/webcasts/dividends/IntelAnnualReport.pdf>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- International Panel on Climate Change (IPCC) (2007): IPCC Climate Change Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. Online verfügbar unter <http://www.ipcc.ch/ipccreports/assessments-reports.htm>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.

- Itsubo, Norihiro; Inaba, Atsushi (2003): A New LCIA Method: LIME has been completed. In: Int J Life Cycle Assess 8 (5), S. 305. Online verfügbar unter <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02978923>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Itsubo, Norihiro; Inaba, Atsushi (2012): Life-cycle Assessment Society of Japan. LIME2, life-cycle assessment Method based on End-point modeling, Summary. In: JLCA Newsletter Mar. 2012 (12). Online verfügbar unter http://lca-forum.org/english/pdf/No13_CO_Introduction.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- IDC (2010): Business-Critical Workloads: Supporting Business-Critical Computing with an Integrated Server Platform. Online verfügbar unter <http://www.keyinfo.com/wp-content/uploads/2015/05/IDC-Business-Critical-Workloads.pdf>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- ILNAS; ANEC (2015): Standards Analysis ICT Sector Luxembourg Version 5.0 – September 2015 ISSN 2354-483X. Online verfügbar unter <https://portail-qualite.public.lu/content/dam/qualite/fr/publications/normes-normalisation/etudes-nationales/pub-standards-analysis-ict-v5-0/standards-analysis-ict-5-0.pdf>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- ISO (2013:) DIN EN ISO 14031:2013 - Umweltmanagement - Umweltleistungsbewertung – Leitlinien.
- iSuppli (Statista, Hrsg.) (2016): Anteile der Hersteller am Umsatz mit Mikroprozessoren weltweit vom 1. Quartal 2009 bis zum 3. Quartal 2011. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/168218/umfrage/weltweite-anteile-der-chipanbieter-fuer-mikroprozessoren-seit-2009/>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Jepsen, Dirk; Volz, Susanne; Reihlen, Antonia; Wirth, Olaf; Vollmer, Annette; Spengler, Laura et al. (o.J.): Themenbereich A: Umweltbezogene Bewertung Themenblock 2: Analyse- und Bewertungsmethoden. Die Ökobilanz Methode und Wirkungskategorien. UFOPLAN-Vorhaben FKZ 371295303. Hg. v. UBA. Online verfügbar unter http://ipp-netzwerk.hamburg.de/netzwerk/upload/public/media/1415780861_A_2.1_Oekobilanz.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Jolliet, Olivier; Margni, Manuele; Charles, Raphaël; Humbert, Sébastien; Payet, Jérôme; Rebitzer, Gerald; Rosenbaum, Ralph (2003): IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. In: Int J Life Cycle Assess 8 (6), S. 324–330.
- Juhrich, Kristina (2016): CO₂-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe, CLIMATE CHANGE, Hg. v. UBA. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/co2_emission_factors_for_fossil_fuels_correction.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Kaplan, J.; Forrest, W.; Kindler, N.(2008): Revolutionizing Data Center Energy Efficiency. Mc Kinsey und Company. New York. NY. Online verfügbar unter http://www.sallan.org/pdf-docs/McKinsey_Data_Center_Efficiency.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Kemna, René; Azaïs, Nelly; van Elburg, Martijn; van der Voort, Maaïke und Li, William (2011): Methodology for Ecodesign of Energy-related Products, MEErP 2011, Methodology Report. Part 2: Environmental policies and data (The European Commission, DG Enterprise and Industry, Hrsg.). Online verfügbar unter <http://ec.europa.eu/DocsRoom/documents/10023/attachments/1/translations/en/renditions/pdf>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Klinglmaier, Manfred; Serenella, Sala; Brandão, Miguel (2014): Assessing resource depletion in LCA: a review of methods and methodological issues. In: Int J Life Cycle Assess 19, S. 580–592. DOI: 10.1007/s11367-013-0650-9. Online verfügbar unter <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-013-0650-9>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Klöpper, Walter; Grahl, Birgit (2007): Ökobilanz (LCA). Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf: WILEY-VCH Verlag GmbH und Co.KGaA.
- Kütz, M. (2008): Kennzahlen in der IT: Werkzeuge für Controlling und Management, 3., überarb. u. erw. Aufl. dpunkt Verlag.
- Mahadevan, Priya; Sharma, Puneet; Banerjee, Sujata; Ranganathan, Parthasarathy (2009): A Power Benchmarking Framework for Network Devices. Online verfügbar unter http://www.sysnet.ucsd.edu/~pmahadevan/publications/FinalVersion_Networking2009.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Mahadevan, Priya; Shah, Amip; Bash, Cullen (2010): Reducing Lifecycle Energy Use of Network Switches. Hg. v. Proceedings of IEEE's International Symposium on Sustainable Systems and Technology (ISSST), Washington, DC. Online verfügbar unter http://www.sysnet.ucsd.edu/~pmahadevan/publications/mahadevan_issst2010.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.

- Mathew, P.; Ganguly, S.; Greenberg, S.; Sartor, D. (2009): Self-benchmarking Guide for Data Centers: Metrics, Benchmarks, Actions. Lawrence Berkeley National Laboratory. Berkeley, CA. Online verfügbar unter <https://eetd.lbl.gov/sites/all/files/publications/lbnl-3393e.pdf>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Mathew, P.; Greenberg, S.; Sartor, D.; Bruschi, J.; Chu, L. (2010): Self-benchmarking Guide for Data Center Infrastructure: Metrics, Benchmarks, Actions. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 2010. Online verfügbar unter <https://datacenters.lbl.gov/sites/all/files/datacenter-benchmarking-guide.pdf>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- MatRessource (2015): Leitfaden zur Bewertung von Ressourceneffizienz in Projekten der BMBF-Fördermaßnahme MatRessource. Hg. v. Die Partner des Begleitprojekts MaRKT. Online verfügbar unter http://www.matressource.de/fileadmin/redakteure/pdf/Leitfaden_Bewertung_von_Ressourceneffizienz_V4.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Mattsson, Jenny (2012): Life Cycle Impact Assessment – a study of the EPS method for use within SCA. Master of Science thesis. Hg. v. Department of Energy and Environment, Division of Environmental System Analysis, Chalmers University of Technology. Online verfügbar unter <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/168240/168240.pdf>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Monroe, M.; Haas, J.; Kaiser, J.; Pflugler, J.; Pouchet, J.; Rawson, F.; Snelling, P.; Tiple, R.; Winkler, K. (2009): Productivity Proxy Proposals Feedback – Interim Results. The Green Grid. Beaverton.
- Müller (2008): Leistungszahlen für Kälte-, Klima- und Wärmepumpensysteme, In: friscaldo 1-2008. S. 31-34. Online verfügbar unter <http://www.reftec.ch/downloads/Leistungszahlen.pdf>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Myhre, G.; Shindell, D.; Bréon, F.-M.; Collins, W.; Fuglestedt, J.; Huang, J. et al. (2013): Anthro-pogenic 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. Hg. v. 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. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Newcombe, L.; Limbuwala, Z.; Latham, P.; Smith, V. (2012): Data centre Fixed to Variable Energy Ratio metric DC-FVER. Online verfügbar unter http://www.bcs.org/upload/pdf/dc_fver_metric_v1.0.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Nissen, Nils F. (2001): Entwicklung eines ökologischen Bewertungsmodells zur Beurteilung elektronischer Systeme. Online verfügbar unter http://webdoc.sub.gwdg.de/ebook/diss/2003/tu-berlin/diss/2001/nissen_nils.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Offermann, Marcus; Manteuffel, Bernhard von; Blume, Julia und Kühler, Daniel (2016): Klimaschonende Klimatisierung (Heizen und Kühlen) mit natürlichen Kältemitteln – Konzepte für Nichtwohngebäude mit Serverräumen/Rechenzentren (UBA). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_18_2016_klimaschonende_klimatisierung_0.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- O’Connell, Steve; Stutz, Markus (2010): Product Carbon Footprint (PCF) Assessment of Dell Lap-top – Results and Recommendations. In: Sustainable Systems and Technology (ISSST).
- Olivetti, Elsa A. (03.08.2016): Einschätzung der "Die"-Fläche in SSD, 03.08.2016. Email an Ran Liu.
- PassMark (2017): CPU-Mark-Ergebnisse für Server-CPU. Online verfügbar unter <http://www.cpubenchmark.net>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Patterson, M.; Tschudi, B.; Vangeet, O.; Cooley, J.; Azevedo, D. (2010): ERE: A Metric For Measuring The Benefit Of Reuse Energy From A Data Center. The Green Grid. Beaverton. OR. 2010. Online verfügbar unter https://eehpcwg.llnl.gov/documents/infra/06_energyreuseefficiencymetric.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Patterson, M.; Azevedo, D.; Belady, C.; Pouchet, J. (2011): Water Usage Effectiveness (WUE) - Green Grid Data Center Sustainability Metrics. The Green Grid. Beaverton. OR. 2011. Online verfügbar unter <http://tmp2014.airatwork.com/wp-content/uploads/The-Green-Grid-White-Paper-35-WUE-Usage-Guidelines.pdf>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Patterson, M. K.; Poole, S. W.; Hsu, C.-H.; Maxwell, D.; Tschudi, W.; Coles, H.; Martinez, D. J.; Bates, N. (2011): TUE, a new energy-efficiency metric applied at ORNL's Jaguar. Online verfügbar unter https://dcpro.lbl.gov/sites/all/files/isc13_tuepaper.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Peiró, Laura Talens (2017): JRC Studie: Server LCA, 17.06.2017. Email an Ran Liu.

- Peiró, Laura T. und Ardente, Fulvio (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 (Hrsg.). Online verfügbar unter <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC96944/lb-na-27467-en-n%20.pdf>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Prakash, Siddharth; Antony, Florian; Köhler, Andreas; Liu, Ran; Schlösser, Alexander; Proske, Marina et al. (2016): Ökologische und ökonomische Aspekte beim Vergleich von Arbeitsplatzcomputern für den Einsatz in Behörden unter Einbeziehung des Nutzerverhaltens (Öko-APC). Hg. v. UBA (FKZ 3712 95 301). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/publikationen/endbericht_oko-apc_2016_09_27.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Prakash, Siddharth; Liu, Ran; Schischke, Karsten und Stobbe, Lutz (2012): Zeitlich optimierter Ersatz eines Notebooks unter ökologischen Gesichtspunkten. UBA (Hrsg.) (Forschungskennzahl 363 01 322). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4316.pdf>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Prakash, Siddharth; Liu, Ran; Schischke, Karsten; Stobbe, Lutz (2013): Schaffung einer Datenbasis zur Ermittlung ökologischer Wirkungen der Produkte der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT). Hg. v. UBA (Forschungskennzahl 3709 95 308 (Teil C)). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_82_2013_janssen_informationstechnik_teil_c.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- RAL (2015): Vergabegrundlage für Umweltzeichen - Energieeffizienter Rechenzentrumsbetrieb RAL-UZ 161. Ausgabe Februar 2015. Online verfügbar unter <https://www.blauer-engel.de/de/produktwelt/buero/rechenzentren>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Rivoire, S.; Shah, M.; Ranganathan, P.; Kozyrakis, C. (2007): JouleSort: A Balanced Energy-Efficiency Benchmark. SIGMOD, Peking. Online verfügbar unter <http://csli.stanford.edu/~christos/publications/2007.jsort.sigmod.pdf>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Ryberg, Morten; Vieira, Marisa D. M.; Zgola, Melissa; Bare, Jane; Rosenbaum, Ralph K. (2013): Updated US and Canadian normalization factors for TRACI 2.1. In: Clean Technologies and Environmental Policy 16 (2). DOI: 10.1007/s10098-013-0629-z.
- Safarik, Mathias (12.07.2016). Kältemittel R718 (Email).
- Samsung (Samsung Electronics Ltd. S, Hrsg.) (2012): SSDs for Data Centers: Accelerated Performance with Exceptional Reliability. Online verfügbar unter http://www.samsung.com/global/business/semiconductor/file/media/SM843_Brochure-0.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- SAP (2017): SAP Power Benchmark. Online verfügbar unter <https://www.sap.com/solution/benchmark.html>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Schneider, Laura; Berger, Markus; Finkbeiner, Matthias (2015): Abiotic resource depletion in LCA—background and update of the anthropogenic stock extended abiotic depletion potential (AADP) model. Int J Life Cycle Assess (2015) 20:709–721.
- Schödwell, B.; Drenkelfort, G.; Ereğ, K.; Zarnekow, R.; Behrendt, F. (2012a): Auf dem Weg zu einem ganzheitlichen, quantitativen Bewertungsansatz für das Energiemonitoring in Rechenzentren. Informatik 2012 – 5. Workshop Informatik und Nachhaltigkeitsmanagement, Braunschweig. Online verfügbar unter <http://subs.emis.de/LNI/Proceedings/Proceedings208/189.pdf>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Schödwell, B.; Ereğ, K.; Zarnekow, R. (2013c): Erfolgsfaktoren und Herausforderungen bei der Implementierung eines Messkonzeptes zum energie- und kosteneffizienten Lastmanagement in einer Community-Cloud. In: Proc. 15. Tagung der Fachgruppe Betriebliche Umweltinformationssysteme. Oldenburg. Springer. Online verfügbar unter https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-35030-6_10, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Schödwell, B.; Ereğ, K.; Zarnekow, R. (2013b): Data Center Green Performance Measurement: State of the Art and Open Research Challenges. In: Proc. of the 19th Americas Conference on Information Systems, Chicago. Online verfügbar unter <http://aisel.aisnet.org/cgi/viewcontent.cgi?article=1077undcontext=amcis2013>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Schödwell, B.; Wilkens, M. (2012a): Übersicht zum technischen Aufbau von Rechenzentren. In: Rechenzentren und Green Cloud Computing - Ein aktuelles Handbuch für die Öffentliche Verwaltung. Heise Zeitschriften Verlag.
- Schödwell, B.; Zwerenz, M.; Stolle, T.; Wilkens, M. (2013a): Kennzahlen zur Energie- und Ressourceneffizienz. In: Rechenzentren und Green Cloud Computing - Ein aktuelles Handbuch für die Öffentliche Verwaltung. Heise Zeitschriften Verlag.

- Schödwell, B.; Wilkens, M.; Ereik, K.; Zarnekow, R. (2012b): Towards a Green Performance Indicator Framework (GPIF) to improve the Energy Efficiency of Data Centers – A Resource Usage based Approach. In (Lang, K.-D. et. al. Hrsg.): Proc. Electronic Goes Green 2012+, Berlin.
- UBA (Hrsg.) (Forschungskennzahl 363 01 134 UBA-FB 001103) (2008): Ressourcenverbrauch von Deutschland – aktuelle Kennzahlen und Begriffsbestimmungen. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3426.pdf>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Seagate Barracuda (2016): Seagate Barracuda Datenblatt zur 2,5"-HDD. Online verfügbar unter <https://www.pollin.de/shop/downloads/d703151d.pdf>, zuletzt abgerufen am 16.08.2016.
- Seagate Technology LLC (2011): Pulsar 2 SSD Product Life Cycle Analysis Summary (Seagate Technology LLC, Hrsg.). Online verfügbar unter <http://www.seagate.com/files/www-content/global-citizenship/en-us/docs/final-pulsar-lca-summary-report-10-2-2013-ams-031214.pdf>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Shah, Amip (01.08.2016). Network Switches (Email).
- Sharma, S.; Hsu, C.; Feng, W. (2007): Making a Case for a Green500 List. Los Alamos National Laboratory. Los Alamos. NM. Online verfügbar unter <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.108.4019&rep=rep1&type=pdf>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Shehabi, A.; Smith, S. J.; Horner, N.; Azevedo, I.; Brown, R.; Koomey, J.; Masanet, E.; Sartor, D.; Herrlin, M. und Lintner, W. (2016): United States Data Center Energy Usage Report (LBNL-1005775). Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California. Online verfügbar unter https://eta.lbl.gov/sites/all/files/publications/lbnl-1005775_v2.pdf, zuletzt abgerufen am 03.11.2016.
- Singh, H.; Azevedo, D.; Ibarra, D.; Newmark, R.; O'Donnell, S.; Ortiz, Z.; Pflueger, J.; Simpson, N.; Smith, V. (2011): Data Center Maturity Model. The Green Grid. Beaverton. OR. Online verfügbar unter <http://www.keysource.co.uk/wp-content/uploads/2015/10/Data-Center-Maturity-Model-White-Paper.pdf>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- SPC (2017): SPC BENCHMARK 1™ Full Disclosure Report FUJITSU Limited Eternus DX200 S4. Online verfügbar unter http://www.storageperformance.org/results/results_spc1_v3/results_spc1_v3_fujitsu/spc1_v3_results_fujitsu_a32001/A32001_FDR.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- SPEC (2008): SPECpower_ssj2008. Standard Performance Evaluation Corporation. Online verfügbar unter http://www.spec.org/power_ssj2008/, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- SPEC (2013): Server Efficiency Rating Werkzeug (SERT). Standard Performance Evaluation Corporation. Online verfügbar unter <http://www.spec.org/sert/>, zuletzt abgerufen am 15.05.2016.
- SPEC (2017a): SPECint_rate- und SPECfp_rate-Ergebnisse. Standard Performance Evaluation Corporation. Online verfügbar unter <https://www.spec.org/cpu2006/>, zuletzt abgerufen am 02.05.2017.
- SPEC (2017b): SPECpower_ssj2008-Ergebnisse. Standard Performance Evaluation Corporation. Online verfügbar unter https://www.spec.org/power_ssj2008/, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Stanley, J.; Brill, K.; Koomey, J. (2007): Four Metrics Define Data Center "Greenness". Uptime Institute. New York. NY. Online verfügbar unter <http://www.dcxdc.ru/files%5C4ede4eff-13b0-49d9-b4da-b0406bfc190e.pdf>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Stobbe, Lutz (15.04.2016). EuP Lot 9 Studie (Email).
- Stobbe, Lutz; Nissen, Nils F.; Proske, Marina; Middendorf, Andreas; Schломann, Barbara; Friedewald, Michael; Georgieff, Peter und Leimbach, Timo (2009): Abschätzung des Energiebedarfs der weiteren Entwicklung der Informationsgesellschaft. Abschlussbericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Bearbeitungsnummer I D 4 – 02 08 15 – 43/08). Online verfügbar unter http://www.pt-em.de/documents/IzI-Studie_EnergiebedarfIKT.PDF, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Stobbe, L.; Proske, M.; Zedel, H.; Hintemann, R.; Clausen, J.; Beucker, S. (2015): Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland. Fraunhofer IZM und Borderstep Institute im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Berlin. Online verfügbar unter <http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/entwicklung-des-ikt-bedingten-strombedarfs-in-deutschland-abschlussbericht.pdf>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Stobbe, L., Proske, M., Schlösser, A., Scheiber, S., Rohde, C., Leimbach, T. et al. (2014). Green IT Dossier - IT2 Green. Berlin. Fraunhofer IZM.

- Storage Networking Industry Association (2015): SNIA Emerald Power Efficiency Measurement Specification Version 2.1.1. SNIA, San Francisco. CA. Online verfügbar unter http://www.snia.org/sites/default/files/technical_work/final/EmeraldMeasurementSpecV2_1_1.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Storage Performance Council (2013): SPC Specifications. SPC. Online verfügbar unter <http://www.storageperformance.org/specs>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Stutz, Markus (2013): Comparing the Carbon Footprints of 11G and 12G Rack Servers from Dell. Hg. v. DELL. Online verfügbar unter https://www.thegreengrid.org/en/system/files/Comparing_the_Carbon_Footprints_of_11G_and_12G_Rack_Servers_from_Dell.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Stutz, Markus; O'Connell, Scott; Pflueger, John (2012): Carbon Footprint of a Dell Rack Server. Hg. v. Electronics Goes Green 2012+ (EGG), 2012.
- Sullivan, J.L.; Gaines, L. (2012): Status of life cycle inventories for batteries. In: Energy conservation and management (58), S. 134–148
- Task Force (2014): Harmonizing Global Metrics for Data Center Energy Efficiency Global Taskforce Reaches Agreement Regarding Data Center Productivity. Online verfügbar unter http://home.jeita.or.jp/greenit-pc/topics/release/pdf/dppe_e_20140430.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Teehan, Paul; Kandlikar, Milind (2013b): Comparing Embodied Greenhouse Gas Emissions of Modern Computing and Electronics Products. Supporting Information. In: Environmental Science und Technology 2013 (47), S. 3997–4003.
- Toffoletto, Laurence; Bulle, Cécile; Godin, Julie; Reid, Catherine; Deschênes, Louise (2007): LUCAS – A New LCIA Method Used for a Canadian-Specific Context. In: Int J Life Cycle Assess 12 (2), S. 93–102. DOI: 10.1065/lca2005.12.242.
- Transaction Processing Performance Council (2012): TPC-Energy Specification Standard Specification Version 1.5.0. TPC. Online verfügbar unter http://www.tpc.org/tpc_documents_current_versions/pdf/tpc-energy_v1.5.0.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- UBA (Hrsg.) (Forschungskennzahl 3713 95 323): Klimaschonende Klimatisierung (Heizen und Kühlen) mit natürlichen Kältemitteln – Konzepte für Nichtwohngebäude mit Serverräumen/Rechenzentren, Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/klimaschonende-klimatisierung-heizen-kuehlen>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- van Oers, Laurant; Guinée, Jeroen (2016): The Abiotic Depletion Potential. Background, Updates, and Future. In: Resources 5 (1), S. 16. DOI: 10.3390/resources5010016.
- Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (2014): Ressourceneffizienz. VDI-Richtlinien zur Zielerreichung (VDI Agenda). Online verfügbar unter https://m.vdi.de/fileadmin/vdi_de/redakteur_dateien/geu_dateien/FB2/Agenda_Ressourceneffizienz.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- VMWare (2016): VMMark 2.5 – Virtualization Platform Benchmark. Online verfügbar unter <https://www.vmware.com/de/products/vmmark>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Wang, L.; Kahn, S.U. (2011). Review of performance metrics for green data centers: a taxonomy study (Springer Science and Business Media). JSupercomput. doi:10.1007/s11227-011-0704-3. Online verfügbar unter <https://pdfs.semanticscholar.org/3070/8e26d81644b9a31b15ba6dc8534a5c00ea89.pdf>, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- WD Datenblatt (2017): WD Blue Mobile Series Spec Sheet. Online verfügbar unter https://www.wdc.com/content/dam/wdc/website/downloadable_assets/eng/spec_data_sheet/2879-771437.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.
- Weber, Christopher L. (2012): Uncertainty and Variability in Product Carbon Footprinting. In: Journal of Industrial 16 (2), S. 203–211. DOI: 10.1111/j.1530-9290.2011.00407.x.
- Weiß, D.; Müller, R.; Lössl, S. (2013): Umweltkennzahlen in der Praxis - Ein Leitfaden zur Anwendung von Umweltkennzahlen in Umweltmanagementsystemen mit dem Schwerpunkt auf EMAS, adelphi im Auftrag des Umweltbundesamt. Online verfügbar unter

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/umweltkennzahlen_in_der_praxis_leitfaden_barierefrei.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.

Whitehead, Beth; Andrews, Deborah; Shah, Amip (2015): The life cycle assessment of a UK data centre. In: *Int J Life Cycle Assess* 20, S. 332–349. DOI: 10.1007/s11367-014-0838-7.

Wilde, T., Auweter, A., Patterson, M.K., Shokourian, H., Huber, H., Bodez, A., Labrenz, D., and Cavazzoni, C. (2014). "DWPE, a new data center energy-efficiency metric bridging the gap between infrastructure and workload". *IEEE International Conference on High Performance Computing and Simulation (HPCS)*, Bologna, pp.893-901.

Wilkins, M.; Drenkelfort, G.; Dittmar, L. (2012): Bewertung von Kennzahlen und Kennzahlensystemen zur Beschreibung der Energieeffizienz von Rechenzentren. In: *IZE-Schriftenreihe*, Band 3, ISBN 978-3-7983-2432-9, TU Berlin. Online verfügbar unter https://depositonce.tu-berlin.de/bitstream/11303/3544/1/Dokument_13.pdf, zuletzt abgerufen am 27.09.2017.

8 Anhang

8.1 Kennzahlensteckbriefe

Forschungsarbeiten zu RZ-Kennzahlen sind überwiegend in englischer Sprache verfasst. Daher sind die Bezeichnungen der meisten Kennzahlen in Englisch. Um bei der Dokumentation der Kennzahlen in Steckbriefen eine mit der Bezeichnung der Kennzahlen übereinstimmende Terminologie zu erreichen, werden Symbole und Indizes in Englisch dokumentiert. Speziell bei Energie gilt folgendes: Sofern kein Index eine Energieart (elektrisch, thermisch, chemisch, kinetisch) ausweist, ist zu 100 % in jede andere Form wandelbare Energie (Exergie) gemeint.

Tabelle 66: Messgrößen für Kennzahlensteckbriefe

Symbol	Bezeichnung Englisch	Bezeichnung Deutsch
A	area	Fläche
D	data amount	Datenmenge / Speicherplatz
E	energy	Energie
n	number	Anzahl
P	power	Leistung
Q	volume flow	Volumenstrom
TP	throughput	Datendurchsatz
U	utilization	Auslastung
V	volume	Volumen
W	work	Arbeit (hier: im Sinne von Nutzen)

Tabelle 67: Indizes der Messgrößen für Kennzahlensteckbriefe

Index	Bezeichnung Englisch	Bezeichnung Deutsch
active		aktiv
AE	airside economizer	direkte Freie Kühlung (mit Außenluft)
CS	cooling system	Kühlsystem
DC	data center	Rechenzentrum
EC	electronic components	elektronische Komponenten
el	electrical	elektrisch
full	full	voll
HVAC	heating, ventilation and air conditioning	Heizungs-, Lüftungs-, Kälte- und Klimatechnik (HLK)
in	input	Eingang
inst	installed	installiert
max	maximum	maximal
OG	own generation	Eigenerzeugung
out	output	Ausgang
part	partial	teilweise
PS	power supply	Stromversorgung

PD	power distribution	Stromverteilung
PC	power conversion	Stromwandlung
rate	rated / nameplate	Nennangabe
RE	renewable energy	Erneuerbare Energien
SG	standby generator	Netzersatzanlage
th	thermal	thermisch
WE	waterside economizer	indirekte Freie Kühlung
WP	water pump	Wasserpumpen
UPS	uninterruptible power supply	unterbrechungsfreie Stromversorgung

Tabelle 68: Indizes der Messgrößen für Kennzahlensteckbriefe

Einheit	Bezeichnung
€	Euro
°C	Grad Celsius
a	Jahr
b	Bit
B	Byte
g	Gramm
G	Giga
h	Stunde
k	Kilo
l	Liter
Mrd.	Milliarden
Mio.	Millionen
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
M	Mega
s	Sekunde
t	Tonne
T	Terra
W	Watt

Tabelle 69: Kennzahlenverzeichnis

Kürzel	Bezeichnung	Quelle
<u>AEUF</u>	Air Economizer Utilization Factor	[Mathew, Greenberg, Sartor, Bruschi und Chu 2010]
<u>AFE</u>	Airflow Efficiency	[Mathew, Greenberg, Sartor, Bruschi und Chu 2010]
<u>C1</u>		[Aebischer, Frischknecht, Genoud, Huser und Varone 2003]
<u>C2</u>		[Aebischer, Frischknecht, Genoud, Huser und

		Varone 2003]
<u>CADE</u>	Corporate Average Datacenter Efficiency	[Kaplan, Forrest und Kindler 2008]
<u>CE</u>	(energy) Conversion Efficiency	[Azevedo und Rawson 2008]
<u>CEE</u>	Coefficient of Energy Efficiency	[Aebischer, Frischknecht, Genoud, Huser und Varone 2003]
<u>CEF</u>	Carbon Emission Factor	[Belady et al. 2010]
<u>CeP</u>	Compute energy Productivity	[Azevedo und Rawson 2008], [Anderson et al. 2008]
<u>ChE</u>	Chiller Efficiency	[Greenberg, Tschudi und Weale 2006]
<u>CLD</u>	Cooling Load Density	[Greenberg, Tschudi und Weale 2006]
<u>CLF</u>	Cooling Load Factor	[Belady, Rawson, Pflueger und Cader 2007]
<u>COP</u>	Coefficient of Performance	
<u>CPE</u>	Compute Power Efficiency	[Belady und Patterson 2008]
<u>CPPE</u>	Critical Power Path Efficiency	[Singh et al. 2011]
<u>CSE</u>	Cooling System Efficiency	[Mathew, Greenberg, Sartor, Bruschi und Chu 2010]
<u>CSSF</u>	Cooling System Sizing Factor	[Mathew, Greenberg, Sartor, Bruschi und Chu 2010]
<u>CUE</u>	Carbon Usage Effectiveness	[Belady, Azevedo, Patterson, Pouchet und Tipleby 2010]
<u>CWPE</u>	Chilled Water Plant Efficiency	[Greenberg, Tschudi und Weale 2006]
<u>CWPE-FC</u>	Chilled Water Plant Efficiency While Free Cooling	[Greenberg, Tschudi und Weale 2006]
<u>DCcE</u>	Data Center compute Efficiency	[Blackburn, Azevedo, Hawkins, Ortiz, Tipleby und Berghe 2010]
<u>DCEEP</u>	Data Center Energy Efficiency and Productivity	[Brill 2007]
<u>DCeP</u>	Data Center energy Productivity	[Anderson et al. 2008]
<u>DCFVER</u>	Data Centre Fixed to Variable Energy Ratio	[Newcombe et al. 2012]
<u>DCiE</u>	Data Center infrastructure Efficiency	[Belady, Rawson, Pflueger und Cader 2007]
<u>DCnE</u>	Data Center network Efficiency	
<u>DCP</u>	Data Center Productivity	
<u>DCPD</u>	Data Center Power Density	[Mathew et al. 2009], [Rasmussen 2010]
<u>DCPE</u>	Data Center Performance Efficiency	[The Green Grid 2007]
<u>DCsE</u>	Data Center storage Efficiency	[Blackburn 2012]
<u>DE</u>	(energy) Distribution Efficiency	[Azevedo und Rawson 2008]
<u>DH-UE_{Server}</u>	Deployed Hardware Utilization Efficiency Server	[Stanley, Brill und Koomey 2007]
<u>DH-UR_{Server}</u>	Deployed Hardware Utilization Ratio Server	[Stanley, Brill und Koomey 2007]

<u>DH-UR_{Storage}</u>	Deployed Hardware Utilization Ratio Storage	[Stanley, Brill und Koomey 2007]
<u>DPPE</u>	Data Center Performance Per Energy	[GITPC 2012]
<u>ECI</u>	Energy Carbon Intensity	[GITPC 2011]
<u>EDE</u>	Electronic Disposal Efficiency	[Brown et al. 2012]
<u>EEP</u>	(IT) Equipment Energy Productivity	[Azevedo und Rawson 2008]
<u>EER</u>	Energy Efficiency Ratio	[Müller 2008]
<u>EPR</u>	Electricity Production Rate	[Azevedo und Rawson 2008]
<u>ERE</u>	Energy Reuse Effectiveness	[Patterson et al. 2010]
<u>ERF</u>	Energy Reuse Factor	[Patterson et al. 2010]
<u>EWIF</u>	Energy Water Intensity Factor	[Patterson, Azevedo, C. und Pouchet 2011]
<u>FCP</u>	Free Cooling Potential	[Stanley, Brill und Koomey 2007]
<u>FE</u>	Facility Efficiency	[Kaplan, Forrest und Kindler 2008]
<u>FEE</u>	Facility Energy Efficiency	[Kaplan, Forrest und Kindler 2008]
<u>FU</u>	Facility Utilization	[Kaplan, Forrest und Kindler 2008]
<u>GEC</u>	Green Energy Coefficient	[GITPC 2012], [Taskforce 2014]
<u>H-EOM</u>	Hardware Energy Overhead Multiplier	[Stanley, Brill und Koomey 2007]
<u>H-POM</u>	Hardware Power Overhead Multiplier	[Stanley, Brill und Koomey 2007]
<u>HVAC-SE</u>	HVAC System Effectiveness	[Mathew, Ganguly, Greenberg und Sartor 2009]
<u>ITAE</u>	IT Asset Efficiency	[Kaplan, Forrest und Kindler 2008]
<u>ITEE</u>	IT Equipment Efficiency	[Kaplan, Forrest und Kindler 2008], [GITPC 2012]
<u>ITeP</u>	IT energy Productivity	[Schödwell et al. 2013b] nach [Azevedo und Rawson 2008], [Anderson et al. 2008]
<u>ITEU</u>	IT Equipment Utilization	[GITPC 2012], [Belady und Patterson 2008]
<u>ITLD</u>	IT Load Density	
<u>IT-PEW</u>	IT Productivity per Embedded Watt	[Brill, 2007]
<u>ITU</u>	IT Utilization	[Kaplan, Forrest und Kindler 2008]
<u>ITUE</u>	IT power Usage Effectiveness	[Patterson et al. 2011]
<u>K</u>	Energy Efficiency of Central Infrastructure	[Aebischer, Frischknecht, Genoud, Huser und Varone 2003]
<u>LPD</u>	Lighting Power Density	[Mathew, Ganguly, Greenberg und Sartor 2009]
<u>MRR</u>	Material Recycling Ratio	[Emerson Network Power 2011]
<u>NeP</u>	Network energy Productivity	[Azevedo und Rawson 2008], [Anderson et al. 2008]
<u>OGE</u>	Onsite Generation Efficiency	[GITPC 2011]
<u>OLF</u>	Other Load Factor	[Schödwell et al. 2013b]

<u>PLF</u>	Power Load Factor	[Belady, Rawson, Pflueger und Cader 2007]
<u>PUE</u>	Power Usage Effectiveness	[Belady, Rawson, Pflueger und Cader 2007]
<u>RCI</u>	Rack Cooling Index	[Herrlin 2008]
<u>REF</u>	Renewable Energy Factor	[BITKOM 2015]
<u>RTI</u>	Return Temperature Index	[Herrlin 2008]
<u>RUE</u>	Rack Unit Effectiveness	[Cappuccio 2012]
<u>RUIE</u>	Rack Unit infrastructure Efficiency	[Cappuccio 2012]
<u>ScE</u>	Server compute Efficiency	[Blackburn, Azevedo, Hawkins, Ortiz, Tiple und Berghe 2010]
<u>SE</u>	(energy) Storage Efficiency	[Azevedo und Rawson 2008]
<u>SEER</u>	Seasonal Energy Efficiency Ratio	[Müller 2008]
<u>SeP</u>	Storage energy Productivity	[Azevedo und Rawson 2008], [Anderson et al. 2008]
<u>SGL</u>	Standby Generator Losses	[Greenberg, Tschudi und Weale 2006]
<u>SI-EER</u>	Site Infrastructure Energy Efficiency Ratio	[Brill 2007]
<u>SI-EOM</u>	Site Infrastructure Energy Overhead Multiplier	[Stanley, Brill und Koomey 2007]
<u>SI-POM</u>	Site Infrastructure Power Overhead Multiplier	[Stanley, Brill und Koomey 2007]
<u>SPUe</u>	Server Power Usage Effectiveness	[Barroso und Hölze 2009]
<u>ToE</u>	(cooling) Tower Efficiency	[Greenberg, Tschudi und Weale 2006]
<u>TUE</u>	Total power Usage Effectiveness	[Patterson et al. 2011]
<u>U_{CPU}</u>	CPU Utilization	[Belady und Patterson 2008]
<u>U_{DC}</u>	Data Center Utilization	[Belady und Patterson 2008]
<u>U_{Network}</u>	Network Utilization	[Belady und Patterson 2008]
<u>U_{Server}</u>	Server Utilization	[Belady und Patterson 2008]
<u>U_{Storage}</u>	Storage Utilization	[Belady und Patterson 2008]
<u>UPS-LF</u>	UPS Load Factor	[Mathew, Greenberg, Sartor, Bruschi und Chu 2010]
<u>UPS-SE</u>	UPS System Efficiency	[Mathew, Greenberg, Sartor, Bruschi und Chu 2010]
<u>WRE</u>	Water Re-Usage Effectiveness	[BITKOM 2015]
<u>WEUF</u>	Waterside Economizer Utilization Factor	[Mathew, Greenberg, Sartor, Bruschi und Chu, 2010]
<u>WPE</u>	(Condenser / Chilled) Water Pumps Efficiency	[Greenberg, Tschudi und Weale 2006]
<u>WUE</u>	Water Usage Effectiveness	[Patterson, Azevedo, C. und Pouchet 2011]

Gesamtsystem Rechenzentrum

Coefficient of Energy Efficiency (CEE)				
Beschreibung / Einsatzszenario	misst Energieeffizienz der Gebäudeinfrastruktur und Versorgungsinfrastruktur der IT			
Wertebereich / Ziel	0 – 1; möglichst hoch			
Verantwortlichkeit	IT- und Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Messwerte/Kennzahlen: E _{IT, EC} ; E _{DC} ; E _{IT, EC} CEE = 1/TUE ; C1 = K = DCiE ; C2 = 1/H-EOM = 1/SPUE = 1/ITUE			
Datenaufbereitung	$CEE = \frac{E_{IT, EC} [kWh]}{E_{DC} [kWh]} = C1 \times C2 = DCiE \times \frac{1}{H-EOM}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
	DCiE	+		+
	H-EOM	-		-
Besonderheiten	E _{IT, EC} als Energiebedarf der datenverarbeitenden IT-Komponenten (CPU, RAM, HDD, NIC etc.) derzeit direkt nur im Labor messbar oder indirekt über numerische Verfahren mit komponentennutzungs-basierten Energiemodellen approximierbar			

Data Center Productivity (DCP) / DC energy Productivity (DCeP) / DC Performance Efficiency (DCPE)				
Beschreibung / Einsatzszenario	misst die Energieproduktivität des RZ als Summe des Nutzens vollendeter Aufgaben in Relation zum RZ-Energiebedarf			
Wertebereich, Ziel	0 – unendlich; möglichst hoch			
Verantwortlichkeit	IT- und Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Messwerte/Kennzahlen: W _{IT} ; E _{DC} DCiE ; ITeP			
Datenaufbereitung	$DCeP = DCPE = \frac{W_{IT} [-]}{E_{DC} [kWh]} = DCiE * \frac{W_{IT} [-]}{E_{IT} [kWh]} = DCiE \times ITeP$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
	DCiE ; ITeP	+		+
		-		-
Besonderheiten	Proxys für die nützliche Arbeit siehe (Haas, et al., 2009), Einführung von ITeP, um IT-Energieproduktivität und GT-Energieeffizienz voneinander abzugrenzen			

Data Centre Fixed to Variable Energy Ratio (DC-FVER)	
Beschreibung / Einsatzszenario	misst Dynamik des Energiebedarfs des RZ bzw. der IT
Wertebereich / Ziel	1 - unendlich; möglichst klein
Verantwortlichkeit	IT- und Gebäudemanagement

Datenermittlung	Messwerte/Kennzahlen: $E_{DC, fix}$; $E_{DC, var}$; $E_{IT, fix}$; $E_{IT, var}$			
Datenaufbereitung	$DC-FVER_{utility} = 1 + \frac{E_{DC, fix} [kWh]}{E_{DC, var} [kWh]}$; $DC-FVER_{IT} = 1 + \frac{E_{IT, fix} [kWh]}{E_{IT, var} [kWh]}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
	<u>H-EOM</u>	+		+
		-		-
Besonderheiten	Statischer und dynamischer Strombedarf des RZ und der IT werden über Variabilität des Gesamtstrombedarfes des RZ und der IT über die Zeit bestimmt			

Compute Power Efficiency (CPE)				
Beschreibung / Einsatzszenario	misst Energieeffizienz der Gebäudeinfrastruktur und Auslastung der IT			
Wertebereich, Ziel	0 – 1; möglichst hoch			
Verantwortlichkeit	IT- und Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Messwerte/Kennzahlen: UCPU; EIT; EDC DCiE ; ITEU = UCPU			
Datenaufbereitung	$CPE = U_{CPU} [\%] \times \frac{E_{IT} [kWh]}{E_{DC} [kWh]} = ITEU \times DCiE$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
	ITEU ; DCiE	+		+
	PUE	-		-
Besonderheiten	IT-Auslastung = CPU-Auslastung als Indikator für produktive Arbeit bzw. IT-Energieeffizienz			

Corporate Average Datacenter Efficiency (CADE)				
Beschreibung / Einsatzszenario	misst Energieeffizienz und Auslastung der Gebäudeinfrastruktur und IT			
Wertebereich, Ziel	0 – 1; möglichst hoch			
Verantwortlichkeit	IT- und Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Messwerte/Kennzahlen: <u>FE</u> ; <u>ITAE</u>			
Datenaufbereitung	CADE = FE × ITAE			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
	<u>FE</u> ; <u>ITAE</u>	+		+
		-		-
Besonderheiten	siehe Ursachenkennzahlen			

DC Performance Per Energy (DPPE)				
Beschreibung / Einsatzszenario	misst Energieeffizienz der Gebäudeinfrastruktur, Einsatz „grüner“ Energie, Nenn-Energieproduktivität der IT und Auslastung der IT			
Wertebereich / Ziel	0 – unendlich; möglichst hoch			
Verantwortlichkeit	IT- und Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Messwerte/Kennzahlen: <u>ITEU</u> ; <u>ITEE</u> ; <u>DCiE</u> ; <u>GEC</u>			
Datenaufbereitung	$DPPE = ITEU \times ITEE \times DCiE \times \frac{1}{1 - GEC}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
	<u>ITEU</u> ; <u>ITEE</u> ; <u>DCiE</u> ; <u>GEC</u>	+		+
	<u>PUE</u>	-		-
Besonderheiten				

Electronic Disposal Efficiency (EDE)				
Beschreibung / Einsatzszenario	quantifiziert den Anteil der mittels einem akkreditierten Partner verantwortungsvoll entsorgten elektronischen Ausrüstung an den insgesamt entsorgten elektronischen Geräten			
Wertebereich / Ziel	0 – 1; möglichst hoch			
Verantwortlichkeit	IT- und Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: $M_{disposal, responsible}$; $M_{disposal, total}$			
Datenaufbereitung	$EDE = \frac{M_{disposal, responsible} [t]}{M_{disposal, total} [t]}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
		+		+
		-		-
Besonderheiten				

Material Recycling Ratio (MRR)				
Beschreibung / Einsatzszenario	misst Anteil des recycelten / wiederverwendeten Materials am Nettomaterial; schafft Bewusstsein für verantwortungsvolle Entsorgung zur Verbesserung der Entsorgungsstrategie			
Wertebereich / Ziel	0 – 1; möglichst hoch			
Verantwortlichkeit	IT- und Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Messwerte/Kennzahlen: Recyceltes, eingehendes und ausgehendes Material (Fertige Produkte/Services)			
Datenaufbereitung	$MRR = \frac{\text{Recyceltes/Wiederverwendetes Material [kg]}}{\text{Eingehendes Material - Ausgehendes Material [kg]}}$			
Abhängigkeiten zu	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung

anderen Kennzahlen		+		+
		-		-
Besonderheiten	Erfassung des ein- und ausgehenden Materials erforderlich (z. B. Verpackung von Geräten)			

DC Energy Efficiency and Productivity (DC-EEP)				
Beschreibung / Einsatzszenario	zur Messung der IT-Produktivität und Energieeffizienz der Gebäudetechnik im Betrieb			
Wertebereich / Ziel	0 bis unendlich, kein Zielwert, Widerspruch: IT-PEW möglichst groß / PUE möglichst klein			
Verantwortlichkeit	IT- und Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Messwerte/Kennzahlen: IT-PEW ; SI-EER = PUE			
Datenaufbereitung	$DC-EEP = IT-PEW \times SI-EER = IT-PEW \times PUE$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
	IT-PEW ; PUE	+		+
	DCiE	-		-
Besonderheiten	die Ursachenkennzahlen haben unterschiedliche Optimierungsrichtungen			

Gesamte Gebäudeinfrastruktur

Facility Efficiency (FE)				
Beschreibung / Einsatzszenario	quantifiziert die Energieeffizienz und Auslastung der Gebäudeinfrastruktur zur Bewertung der Gesamteffizienz der Gebäudeinfrastruktur im Betrieb des RZ			
Wertebereich / Ziel	0 – 1; möglichst hoch			
Verantwortlichkeit	Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Nötige Messwerte/Kennzahlen $FU = UDC ; FEE = DCiE$			
Datenaufbereitung	$FE = FU \times FEE = FU \times DCiE$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
	FU ; DCiE	+	CADE	+
	PUE	-		-
Besonderheiten				

Power Usage Effectiveness (PUE) / DC infrastructure Efficiency (DCiE)	
Beschreibung / Einsatzszenario	charakterisieren die Energieeffizienz der Gebäudeinfrastruktur im Betrieb des RZ
Wertebereich / Ziel	0 – 1 (DCiE) bzw. 1 – unendlich (PUE); PUE möglichst klein, DCiE möglichst groß

Verantwortlichkeit	Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Nötige Messwerte/Kennzahlen E _{DC} ; E _{IT} <u>PLF</u> ; <u>CLF</u> ; <u>OLF</u>			
Datenaufbereitung	$PUE = \frac{E_{DC} \text{ [kWh]}}{E_{IT} \text{ [kWh]}} = \frac{1}{DCiE} = PLF + CLF + OLF + 1$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen (für PUE, DCiE invers)	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
	<u>PLF</u> ; <u>CLF</u> ; <u>OLF</u>	+		+
		-	<u>CADE</u> ; <u>CEE</u> ; <u>DPPE</u> ; <u>DCeP</u>	-
Besonderheiten	<p>PUE = SI-POM, SI-EOM, SI-EER, DCiE = K, C1, FEE</p> <p>PUE kann als pPUE partiell für abgegrenzte Zonen eines RZ erhoben werden, OLF: eigener Vorschlag analog zu CLF und PLF für energetische Lasten des Support Systems (Licht etc.)</p> <p># PUE0: Spitzenleistung des RZ [kW] / Spitzenleistung der IT [kW]</p> <p># PUE1: Jahresverbrauch des RZ [kWh] / Jahresverbrauch der IT am USV-Ausgang gemessen [kWh]</p> <p># PUE2: Jahresverbrauch des RZ [kWh] / Jahresverbrauch der IT am PDU-Ausgang gemessen [kWh]</p> <p># PUE3: Jahresverbrauch des RZ [kWh] / Jahresverbrauch der IT am IT-Eingang [kWh]</p>			

Facility Utilization (FU) / Data Center Utilization (U _{DC})				
Beschreibung / Einsatzszenario	misst die Auslastung der Gebäudeinfrastruktur des RZ			
Wertebereich / Ziel	0 – 1; möglichst hoch, Maximum: 1			
Verantwortlichkeit	Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Nötige Messwerte/Kennzahlen P _{IT} ; P _{IT, install, max}			
Datenaufbereitung	$FU = U_{DC} = \frac{P_{IT} \text{ [kW]}}{P_{IT, install, max} \text{ [kW]}}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
		+	<u>CADE</u>	+
		-		-
Besonderheiten	<p>max. mögliche installierbare IT-Nennleistung entspricht i. d. R. der maximal möglichen Ausgangsleistung der USV-Anlagen (ggfs. vermindert um Anschlussleistung anderer über die USV abgesicherter Komponenten); FU kann aber auch als das Minimum oder Maximum der Auslastungen der IT-Stromversorgungskapazität, der Kühlung, der Fläche, des Gewichts und der Luftvolumenstromkapazität definiert werden [Belady und Patterson 2008], je nachdem ob der Engpass überwacht oder die optimale Ausnutzung aller Ressourcen gemessen werden soll</p>			

Carbon Usage Effectiveness (CUE)	
Beschreibung /	misst Verhältnis der durch den Energiebedarf des RZ entstehenden CO ₂ -eq. zum

Einsatzszenario	Energiebedarf der IT; zur Bewertung der Treibhausgasemissionen eines RZ			
Wertebereich / Ziel	0 – 1; möglichst klein			
Verantwortlichkeit	Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Nötige Messwerte/Kennzahlen CO ₂ -Emissionen durch E _{DC} ; E _{IT} <u>CEF</u> ; <u>PUE</u>			
Datenaufbereitung	$CUE = \frac{\text{CO}_2\text{-Emissionen durch } E_{DC}}{E_{IT}} = CEF \times PUE$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
	<u>CEF</u> ; <u>PUE</u>	+		+
	<u>DCiE</u>	-		-
Besonderheiten	siehe Subkennzahlen			

Rack Unit Effectiveness (RUE) / Rack Unit infrastructure Efficiency (RUiE)				
Beschreibung / Einsatzszenario	misst die Auslastung des Platzes in den Racks als Verhältnis aus maximal im RZ installierbaren HE zu den aktuell belegten HE			
Wertebereich / Ziel	0 – 1 (RUiE) bzw. 1 – unendlich (RUE); RUE möglichst klein, RUiE möglichst groß			
Verantwortlichkeit	Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Nötige Messwerte/Kennzahlen RU _{DC, max} ; RU _{DC, used}			
Datenaufbereitung	$RUE = \frac{1}{RUiE} = \frac{RU_{DC, used}}{RU_{DC, max}}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
		+	<u>U_{DC}</u>	+
		-		-
Besonderheiten				

Water Usage Effectiveness (WUE)				
Beschreibung / Einsatzszenario	Beschreibt den RZ-Wasserbedarf im Verhältnis zum IT-Energiebedarf; zur Bewertung der Nachhaltigkeit des RZ im Betrieb			
Wertebereich / Ziel	0 – 1; möglichst klein			
Verantwortlichkeit	Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Nötige Messwerte/Kennzahlen V _{Water, DC} ; E _{IT} <u>EWIF</u> ; <u>PUE</u>			
Datenaufbereitung	$WUE = \frac{V_{Water, DC} [l]}{E_{IT} [kWh]}$; $WUE_{source} = EWIF \times PUE + WUE$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
	<u>EWIF</u> , <u>PUE</u>	+		+
	<u>DCiE</u>	-		-

Besonderheiten	WUE_{source} beinhaltet den Wasserbedarf des Energieversorgers bei der (Strom)Erzeugung
----------------	---

Energy Reuse Effectiveness (ERE)				
Beschreibung / Einsatzszenario	misst das Verhältnis von Differenz aus RZ-Energiebedarf und außerhalb des RZ genutzter RZ-Abwärme zum IT-Energiebedarf; zur Bewertung der Nachhaltigkeit im Betrieb			
Wertebereich / Ziel	0 – unendlich; möglichst klein			
Verantwortlichkeit	Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen E_{DC} ; $E_{th, reuse}$; E_{IT} <u>ERF</u> ; <u>PUE</u>			
Datenaufbereitung	$ERE = \frac{E_{DC} - E_{th, reuse}}{E_{IT}} = (1 - ERF) \times PUE$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
	<u>PUE</u>	+		+
	<u>ERF</u> ; <u>DCiE</u>	-		-
Besonderheiten				

Energy Reuse Factor (ERF)				
Beschreibung / Einsatzszenario	Anteil des RZ-Energiebedarfs, der außerhalb des RZ wiederverwendet wird; zur Bewertung der Nachhaltigkeit des RZ im Betrieb			
Wertebereich / Ziel	0 – 1; möglichst hoch			
Verantwortlichkeit	Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: E_{DC} ; Q_{reuse}			
Datenaufbereitung	$ERF = \frac{Q_{reuse} [kWh]}{E_{DC} [kWh]}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
		+		+
		-	<u>ERE</u>	-
Besonderheiten	Abgrenzung Nutzung der Abwärme innerhalb vs. außerhalb des RZ notwendig			

Energieversorgung

Power Load Factor (PLF)	
Beschreibung / Einsatzszenario	Verhältnis aus Energiebedarf (Verluste) des Stromversorgungssystems zum IT-Energiebedarf; zur Bewertung der Energieeffizienz der Stromversorgung im Betrieb des RZ
Wertebereich / Ziel	0 – unendlich; möglichst klein

Verantwortlichkeit	Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Nötige Messwerte/Kennzahlen E_{PS} ; E_{IT}			
Datenaufbereitung	$PLF = \frac{E_{PS} \text{ [kWh]}}{E_{IT} \text{ [kWh]}}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
	<u>CE</u> ; <u>DE</u> ; <u>SE</u>	+	<u>PUE</u>	+
		-	<u>DCiE</u>	-
Besonderheiten	Verluste des Stromversorgungssystems umfassen Verluste der Trafos, Schaltungen, USV, NEA, PDUs und Kabel aber nicht die Verluste der Energiewandlung bei Eigen-erzeugung			

Critical Power Path Efficiency (CPPE)				
Beschreibung / Einsatzszenario	misst Energieeffizienz der Stromversorgung im Betrieb entlang des kritischen Pfades (beinhaltet Trafo-, Schaltanlagen-, USV-, PDU- und Kabel-Verluste)			
Wertebereich / Ziel	0 – 1; möglichst hoch, Maximum: 1			
Verantwortlichkeit	Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Nötige Messwerte/Kennzahlen <u>CE</u> ; <u>DE</u> ; <u>SE</u>			
Datenaufbereitung	$CPPE = CE \times DE \times SE$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
	<u>CE</u> ; <u>DE</u> ; <u>SE</u>	+	<u>DCiE</u>	+
		-	<u>PUE</u>	-
Besonderheiten	Metrik eigener Vorschlag, da nicht spezifiziert, ohne Verluste der Netzersatzanlage			

(electrical) Storage Efficiency (SE)				
Beschreibung / Einsatzszenario	misst die Energieeffizienz der elektrischen Energiespeicher (z. B. Akkumulatoren) im Betrieb			
Wertebereich / Ziel	0 – 1; möglichst hoch			
Verantwortlichkeit	Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: $E_{Storage, el, out}$; $E_{Storage, el, in}$			
Datenaufbereitung	$SE = \frac{E_{Storage, el, out} \text{ [kWh]}}{E_{Storage, el, in} \text{ [kWh]}}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
		+	<u>UPS-SE</u> ; <u>CPPE</u>	+
		-	<u>PLF</u>	-
Besonderheiten	Metrik eigener Vorschlag, da nicht spezifiziert			

(electrical) Distribution Efficiency (DE)				
Beschreibung / Einsatzszenario	misst die Energieeffizienz des Stromverteilsystems (Schaltanlagen, PDU, Kabel, Stromschienen) im Betrieb			
Wertebereich / Ziel	0 – 1; möglichst hoch			
Verantwortlichkeit	Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: $E_{PD, in}; E_{PD, out}$			
Datenaufbereitung	$DE = \frac{E_{PD, out} [kWh_{el}]}{E_{PD, in} [kWh_{el}]}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
		+	<u>CPPE</u>	+
		-	<u>PLF</u>	-
Besonderheiten	Metrik eigener Vorschlag, da nicht spezifiziert, Verluste des Stromverteilsystems sind i. d. R. nur über Differenzrechnungen bestimmbar			

(electrical) Conversion Efficiency (CE)				
Beschreibung / Einsatzszenario	misst Energieeffizienz der Stromumwandlung (Trafo, USV-Anlagen) im Betrieb			
Wertebereich / Ziel	0 – 1; möglichst hoch			
Verantwortlichkeit	Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: $E_{PC, in}; E_{PC, out}$			
Datenaufbereitung	$CE = \frac{E_{PC, out} [kWh_{el}]}{E_{PC, in} [kWh_{el}]}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
		+	<u>CPPE</u>	+
		-	<u>PLF</u>	-
Besonderheiten	eigener Vorschlag, da keine Metrik spezifiziert, bei USV die Verluste durch Energiespeicher abziehen, da in SE enthalten			

Carbon Emission Factor (CEF)				
Beschreibung / Einsatzszenario	misst CO ₂ -eq. pro verwendeter Energieeinheit zur Bewertung der Nachhaltigkeit des RZ: hier CO ₂ -Emmissionen im Betrieb			
Wertebereich / Ziel	0 – unendlich; möglichst klein			
Verantwortlichkeit	Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: CO ₂ -eq. des E _{DC} ; E _{DC} CEF = ECI			
Datenaufbereitung	$CEF = \frac{CO_2\text{-Äquivalent des } E_{DC} [kg CO_2\text{-eq}]}{E_{DC} [kWh]} \approx ECI$			
Abhängigkeiten zu	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung

anderen Kennzahlen		+	<u>CUE</u>	+
		-		-
Besonderheiten	Stellgrößen: (Energimix, Eigenerzeugung (z. B. Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung))			

Green Energy Coefficient (GEC)				
Beschreibung / Einsatzszenario	misst das Verhältnis von im RZ erzeugtem Strom aus erneuerbaren Energien am Gesamtenergiebedarf des RZ			
Wertebereich / Ziel	0-1; möglichst hoch			
Verantwortlichkeit	Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: $E_{DC, RE}$; E_{DC}			
Datenaufbereitung	$GEC = \frac{E_{DC, RE} [kWh]}{E_{DC} [kWh]}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
		+	<u>DPPE</u> ; <u>CEF</u>	+
		-		-
Besonderheiten	war ursprünglich definiert in (GITPC 2012) als das Verhältnis von im RZ aus erneuerbaren Energien erzeugte Energie zu Gesamtenergiebedarf des RZ			

Energy Water Intensity Factor (EWIF)				
Beschreibung / Einsatzszenario	quantifiziert Wasserbedarf des EVU bei der Erzeugung einer Energieeinheit für das RZ, zur Bewertung der Nachhaltigkeit des RZ im Betrieb; EWIF als Kriterium bei Wahl eines Standortes oder des vom EVU bezogenen Strommixes			
Wertebereich / Ziel	0 – unendlich, möglichst klein			
Verantwortlichkeit	Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: $V_{Water, EVU}$; E_{DC}			
Datenaufbereitung	$EWIF = \frac{V_{Water, EVU} [l]}{E_{DC} [kWh]}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
		+	<u>WUE_{Source}</u>	+
		-		-
Besonderheiten				

Onsite Generation Efficiency (OGE)	
Beschreibung / Einsatzszenario	beschreibt die Energieeffizienz der Eigenerzeugungsanlagen des RZ im Vergleich zur Energieeffizienz der Erzeugung durch den Energieversorger
Wertebereich /	0 – unendlich; möglichst hoch

Ziel				
Verantwortlichkeit	Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: E _{DC} ; E _{DC, OG, EE}			
Datenaufbereitung	$OGE = \frac{E_{DC} \text{ [kWh]}}{E_{DC} \text{ [kWh]} - E_{DC, OG, RE} \text{ [kWh]}}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
		+	<u>CEF</u>	+
		-		-
Besonderheiten				

Electricity Production Rate (EPR)				
Beschreibung / Einsatzszenario	misst das Verhältnis von selbst erzeugtem Strom zum dafür notwendigen Primärenergieeinsatz (z. B. Brennstoffe wie Gas für BHKW)			
Wertebereich / Ziel	0 – 1; möglichst hoch, da Strom 100 % Exergie			
Verantwortlichkeit	Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: E _{el, OG, out} ; E _{OG, in}			
Datenaufbereitung	$EPR = \frac{E_{el, OG, out} \text{ [kWh]}}{E_{OG, in} \text{ [kWh]}}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
		+	<u>OGE</u>	+
		-		-
Besonderheiten				

UPS Load Factor (UPS-LF)				
Beschreibung / Einsatzszenario	misst die Auslastung der USV-Anlagen im Betrieb des RZ (Kapazitätsplanung, Identifikation von Überkapazitäten bzw. Ineffizienzen)			
Wertebereich / Ziel	0 – 1; möglichst hoch, Maximum: 1			
Verantwortlichkeit	Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: P _{UPS, out} ; P _{UPS, out, rated}			
Datenaufbereitung	$UPS-LF = \frac{P_{UPS, out} \text{ [kW]}}{P_{UPS, out, rated} \text{ [kVA]}}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
		+	<u>FU</u>	+
		-		-
Besonderheiten	Ausgangskapazität der USV hängt vom Scheinleistungsfaktor ab			

UPS System Efficiency (UPS-SE)				
Beschreibung / Einsatzszenario	misst die Energieeffizienz der USV-Anlagen im Betrieb des RZ			
Wertebereich / Ziel	0 – 1; möglichst hoch			
Verantwortlichkeit	Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: $E_{UPS, out}$; $E_{UPS, in}$			
Datenaufbereitung	$UPS-SE = \frac{E_{UPS, out} [kWh]}{E_{UPS, in} [kWh]}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
	<u>SE</u>	+	<u>CPPE</u>	+
		-		-
Besonderheiten	enthält die Verluste der Akkumulatoren			

Standby Generator Losses (SGL)				
Beschreibung / Einsatzszenario	misst Energieverluste für die Gewährleistung der Einsatzbereitschaft der NEA (z. B. Beheizung des Treibstoffs) im Verhältnis zur installierten Nennleistung der NEA			
Wertebereich / Ziel	0 – unendlich; möglichst klein			
Verantwortlichkeit	Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: $P_{el, SG, in}$; $P_{el, SG, rated, out}$			
Datenaufbereitung	$SGL = \frac{P_{el, SG, in} [kW]}{P_{el, SG, rated, out} [kVA]}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
			<u>PLF</u>	-
Besonderheiten				

Klimatisierung

HVAC System Effectiveness (HVAC-SE)				
Beschreibung / Einsatzszenario	charakterisiert die Energieproduktivität der Klimatisierung (Heizung, Lüftung, Klima- und Kältetechnik: HLK) zur Messung der Energieproduktivität der HLK im Betrieb des RZ			
Wertebereich / Ziel	0 – unendlich; möglichst hoch			
Verantwortlichkeit	Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: E_{IT} ; E_{HVAC}			
Datenaufbereitung	$HVAC-SE = \frac{E_{IT} [kWh]}{E_{HVAC} [kWh]}$			
Abhängigkeiten zu	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung

anderen Kennzahlen	<u>WEUF ; AEUF</u>	+	<u>DCiE</u>	+
	<u>CSE ; AFE</u>	-	<u>PUE</u>	-
Besonderheiten	Wärmequellen außer IT (z. B. USV) werden zur Vereinfachung nicht berücksichtigt			

Cooling Load Density (CLD) / Data Center Power Density (DCPD)

Beschreibung / Einsatzszenario	Beschreibt das Verhältnis aus Fläche des RZ und Kühllast des RZ zur Dimensionierung der Kühlung			
Wertebereich / Ziel	0 – unendlich; kein Zielwert, ggfs. möglichst hoch			
Verantwortlichkeit	Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: A_{DC} ; $E_{th,DC}$			
Datenaufbereitung	$CLD = \frac{A_{DC} [m^2]}{E_{th,DC} [kW]}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
	<u>ITLD</u>	+		+
		-		-
Besonderheiten	Anstatt der gesamten RZ-Fläche können wie bei <u>ITLD</u> auch andere Bezugsflächen (z. B. IT-Raum) gewählt werden (siehe [Mathew et al. 2009], [Rasmussen 2010])			

Cooling Load Factor (CLF)

Beschreibung / Einsatzszenario	misst das Verhältnis aus Energiebedarf des Kühlsystems und IT-Energiebedarf zur Bewertung der Energieeffizienz			
Wertebereich / Ziel	möglichst klein, Maximum: 0			
Verantwortlichkeit	Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: E_{CS} ; E_{IT}			
Datenaufbereitung	$CLF = \frac{E_{CS}}{E_{IT}}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
	<u>CSE ; AFE</u>	+	<u>PUE</u>	+
	<u>WEUF ; AEUF</u>	-	<u>DCiE</u>	-
Besonderheiten				

Cooling System Efficiency (CSE)

Beschreibung / Einsatzszenario	misst die Energieproduktivität des Kühlsystems als Verhältnis aus Kühllast des RZ und Energiebedarf des Kühlsystems			
Wertebereich / Ziel	0 – unendlich; möglichst klein			
Verantwortlichkeit	Gebäudemanagement			

Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: E _{CS} ; E _{th, DC}			
Datenaufbereitung	$CSE = \frac{E_{CS} \text{ [kWh]}}{E_{th, DC} \text{ [kWh]}}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
	<u>CWPE</u> ; <u>CWPE-FC</u> <u>WEUF</u> ; <u>AEUF</u>	+ -	<u>CLF</u> <u>HVAC-SE</u>	+ -
Besonderheiten	Kühlsystem umfasst Kältemaschinen, Pumpen, Rückkühler, Freikühler, bei Splitgeräten und direktverdampfenden ULK muss Energiebedarf der Lüfter im IT-Raum abgezogen werden			

Cooling System Sizing Factor (CS-SF)	
Beschreibung / Einsatzszenario	misst die max. Auslastung des Kühlsystems als Verhältnis von installierter Kühlleistung der Kälteanlagen zu Spitzenkühlleistung des RZ
Wertebereich / Ziel	0 – 1; möglichst hoch
Verantwortlichkeit	Gebäudemanagement
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: P _{th, Ch, rated} ; P _{th, DC, peak}
Datenaufbereitung	$CS-SF = \frac{P_{th, DC, peak} \text{ [kW}_{th}]}{P_{th, Ch, rated} \text{ [kW}_{th}]}$
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen
Besonderheiten	

Chilled Water Plant Efficiency (CWPE)				
Beschreibung	misst Energieeffizienz des Kühlsystems (Kälteanlagen, Rückkühler, Pumpen) ohne Freikühlung als Verhältnis des Energiebedarfs des Kühlsystems zur Abwärme des RZ			
Wertebereich / Ziel	möglichst klein, Maximum: 0			
Verantwortlichkeit	Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: E _{CWP} ; E _{th, DC}			
Datenaufbereitung	$CWPE = \frac{E_{CWP} \text{ [kWh]}}{E_{th, DC} \text{ [kWh]}}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
	<u>ChE</u> ; <u>TE</u> ; <u>WPE</u>	+ -	<u>CLF</u> <u>HVAC-SE</u>	+ -
Besonderheiten	keine			

Chilled Water Plant Efficiency While Free Cooling (CWPE-FC)				
Beschreibung / Einsatzszenario	misst Energieeffizienz des Kühlsystems mit Freikühlung als Verhältnis des Energiebedarfs des Kühlsystems inkl. Freikühler zur Abwärme des RZ			
Wertebereich / Ziel	0 – unendlich; möglichst klein			
Verantwortlichkeit	Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: E_{CS} ; $E_{th, DC}$			
Datenaufbereitung	$CWPE-FC = \frac{E_{CWP-FC} \text{ [kWh]}}{E_{th, DC} \text{ [kWh}_{th}]}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
	<u>ChE</u> ; <u>TE</u> ; <u>WPE</u>	+	<u>CLF</u>	+
	<u>AEUF</u> ; <u>WEUF</u>	-	<u>HVAC-SE</u>	-
Besonderheiten				

Airside / Waterside Economizer Utilization Factor (AEUF / WEUF)				
Beschreibung / Einsatzszenario	misst den Anteil der Stunden pro Jahr, in denen eine wasser- (indirekt) oder luftbasierte (direkte) freie Kühlung die volle oder teilweise Kühlung des RZ übernimmt			
Wertebereich / Ziel	0 – 1; möglichst hoch			
Verantwortlichkeit	Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: $T_{AE, full}$; $T_{AE, part}$; $T_{WE, full}$; $T_{WE, part}$			
Datenaufbereitung	$AEUF_{full} = \frac{T_{AE, full} \text{ [h]}}{8760 \text{ [h]}} ; AEUF_{part} = \frac{T_{AE, part} \text{ [h]}}{8760 \text{ [h]}} ;$ $WEUF_{full} = \frac{T_{WE, full} \text{ [h]}}{8760 \text{ [h]}} ; WEUF_{part} = \frac{T_{WE, part} \text{ [h]}}{8760 \text{ [h]}}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
		+		+
		-	<u>CWPE-FC</u>	-
Besonderheiten	Freikühlzeit ist stark abhängig von den örtlichen Umweltbedingungen (Temperatur, Luftfeuchte, Standort)			

Free Cooling Potential (FCP)	
Beschreibung / Einsatzszenario	beschreibt die Menge elektrischer Energie, die durch (indirekte) Freie Kühlung gespart wird
Wertebereich / Ziel	0 – 1; möglichst hoch
Verantwortlichkeit	Gebäudemanagement
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: $E_{th, FC}$; $P_{el, CS, utility}$ $COP_{Ch} \approx \underline{ChE}$

Datenaufbereitung	$FCP = \frac{E_{th, FC} \times E_{el, CS, total} [kW_{th}]}{COP_{Ch} [kW_{th} / kW_{el}]}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
		+	<u>HVAC-SE</u>	+
		-	<u>CLF ; CSE</u>	-
Besonderheiten	F _{el, CS, utility} als Verhältnis von Leistungsaufnahme des Kühlsystem zu insgesamt durch das Kühlsystem verursachter Leistungsaufnahme (Zuschlag anteilige Verluste USV, NEA, Trafo)			

Rack Cooling Index (RCI)				
Beschreibung / Einsatzszenario	Misst wie effektiv die IT in den Racks innerhalb von definierten Temperaturbereichen gekühlt wird bzw. wie groß die Über- bzw. Unterschreitungen der Schwellenwerte sind			
Wertebereich / Ziel	- unendlich bis 1; möglichst hoch			
Verantwortlichkeit	Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: ϑ_{exceed} ; $\vartheta_{exceed, max allowed}$; ϑ_{below} ; $\vartheta_{below, max allowed}$			
Datenaufbereitung	$RCI_{high} = (1 - \frac{\Delta\vartheta_{exceed}}{\Delta\vartheta_{exceed, max allowed}})$ $RCI_{low} = (1 - \frac{\Delta\vartheta_{below}}{\Delta\vartheta_{below, max allowed}})$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
Besonderheiten	Ober- und Untergrenze für die empfohlenen Temperaturen nach ASHRAE			

Return Temperature Index (RTI)				
Beschreibung / Einsatzszenario	Misst Effektivität der Luftführung in Hinblick auf die Vermeidung der Vermischung von warmer und kalter Luft als Indikator für die Energieeffizienz			
Wertebereich / Ziel	Maximum: 1			
Verantwortlichkeit	Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: $\vartheta_{air, crah, exhaust}$; $\vartheta_{air, crah, supply}$; $\vartheta_{air, rack, exhaust}$; $\vartheta_{air, rack, supply}$			
Datenaufbereitung	$RTI = \frac{\vartheta_{air, crah, exhaust} - \vartheta_{air, crah, supply}}{\vartheta_{air, rack, exhaust} - \vartheta_{air, rack, supply}}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
		+		+
		-		-
Besonderheiten				

Airflow Efficiency (AFE)				
Beschreibung / Einsatzszenario	misst die Energieproduktivität der Ventilatoren der ULK und Spielgeräte			
Wertebereich / Ziel	0 – unendlich; möglichst klein			
Verantwortlichkeit	Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: E_{Fan} ; V_{AF} ; P_{Fan} ; Q_{AF}			
Datenaufbereitung	$AFE = \frac{E_{Fan} [kWh]}{V_{Fan} [m^3]} = \int \frac{P_{Fan} [kW]}{Q_{Fan} [m^3/h]}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
		+	<u>CLF</u>	+
		-	<u>HVAC-SE</u>	-
Besonderheiten				

Chiller Efficiency (ChE)				
Beschreibung / Einsatzszenario	misst Energieeffizienz der Kälteanlagen als Verhältnis aus Energiebedarf der Kälteanlagen und Kühllast des RZ			
Wertebereich / Ziel	0 – unendlich; möglichst klein			
Verantwortlichkeit	Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: E_{Ch} ; $E_{th, DC}$			
Datenaufbereitung	$ChE = \frac{E_{Ch} [kWh]}{E_{th, DC} [kWh]}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
			<u>CSE</u> , <u>CWPE</u>	+
Besonderheiten				

(cooling) Tower Efficiency (ToE)				
Beschreibung / Einsatzszenario	misst Energieeffizienz der Kühltürme als Verhältnis aus Energiebedarf der Kühltürme und Energiebedarf des RZ			
Wertebereich / Ziel	0 – 1; möglichst klein			
Verantwortlichkeit	Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: E_{Tower} ; $E_{th, DC}$			
Datenaufbereitung	$ToE = \frac{E_{Tower} [kWh]}{E_{th, DC} [kWh]}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
		+	<u>CSE</u> , <u>CWPE</u>	+

Besonderheiten

(Condenser / Chilled) Water Pumps Efficiency (WPE)	
Beschreibung / Einsatzszenario	misst die Energieeffizienz der Pumpen der Kühlkreisläufe als Verhältnis aus Energiebedarf der Pumpen und Energiebedarf des RZ
Wertebereich / Ziel	0 – 1; möglichst klein
Verantwortlichkeit	Gebäudemanagement
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: $E_{\text{pump, primary}}$; $E_{\text{pump, secondary}}$; $E_{\text{th, DC}}$
Datenaufbereitung	$\text{WPE}_{\text{primär}} = \frac{E_{\text{pump, primary}} \text{ [kWh]}}{E_{\text{th, DC}} \text{ [kWh]}}$ $\text{WPE}_{\text{sekundär}} = \frac{E_{\text{pump, secondary}} \text{ [kWh]}}{E_{\text{th, DC}} \text{ [kWh]}}$
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen
Besonderheiten	keine

Sonstiges

Other Load Factor (OLF)				
Beschreibung / Einsatzszenario	misst Energieeffizienz sonstiger unterstützender Systeme im RZ (Sicherheit, Beleuchtung)			
Wertebereich / Ziel	möglichst gering, Maximum: 0			
Verantwortlichkeit	Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: E_{other} ; E_{IT}			
Datenaufbereitung	$\text{OLF} = \frac{E_{\text{Support}} \text{ [kWh]}}{E_{\text{IT}} \text{ [kWh]}}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
	<u>LPD</u>	+	<u>PUE</u>	+
		-	<u>DCiE</u>	-
Besonderheiten	E_{other} als Energiebedarf der unterstützenden Systeme (Brand- und Gefahrenschutz, Beleuchtung, etc.) i. d. R. nur über Differenzrechnung ermittelbar			

Lighting Power Density (LPD)	
Beschreibung / Einsatzszenario	misst die Energieeffizienz der Beleuchtung des RZ
Wertebereich / Ziel	0 – unendlich, möglichst gering

Verantwortlichkeit	Gebäudemanagement			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: E_{Light} ; A_{DC}			
Datenaufbereitung	$LPD = \frac{E_{Light} [kWh]}{A_{DC} [m^2]}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
		+	<u>OLF</u>	+
Besonderheiten				

Gesamtes IT-System

IT Asset Efficiency (ITAE)				
Beschreibung / Einsatzszenario	misst die IT-Energieeffizienz und IT-Auslastung			
Wertebereich / Ziel	0 – 1 ; möglichst hoch			
Verantwortlichkeit	IT-Management			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: <u>ITEE</u> ; <u>ITU</u> = <u>ITEU</u>			
Datenaufbereitung	$ITAE = ITEE \times ITU = ITEE \times ITEU$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
	<u>ITEE</u> ; <u>ITEU</u>	+	<u>CADE</u> ; <u>DPPE</u>	+
Besonderheiten	siehe Ursachenkennzahl			

IT energy Productivity (ITeP) / (IT) Equipment Energy Productivity (EEP)				
Beschreibung / Einsatzszenario	misst die IT-Energieproduktivität als Summe des gewichteten Nutzens vollendeter IT Aufgaben in Relation zum IT-Energiebedarf			
Wertebereich / Ziel	möglichst hoch			
Verantwortlichkeit	IT- Management			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: W_{IT} ; E_{IT}			
Datenaufbereitung	$ITeP = \frac{W_{IT} [-]}{E_{IT} [kWh]}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
	<u>CeP</u> ; <u>SeP</u> ; <u>NeP</u>	+	<u>DCeP</u>	+
		-		-
Besonderheiten	Proxys zur nützlichen Arbeit der IT siehe (Haas, et al., 2009)			

IT Equipment Efficiency (ITEE)

Beschreibung / Einsatzszenario	misst IT-Energieeffizienz der IT; Für DPPE: Summe der normalisierten gewichteten Spitzenenergieproduktivität der im RZ vorgehaltenen Server, Speicher und Netzwerkgeräte (Benchmark normalisiert über Produktivität der Geräte von 2005), Für CADE: Konstante geschätzt (0,05)			
Wertebereich / Ziel	Maximum: möglichst hoch			
Verantwortlichkeit	IT-Management			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: W_{IT} ; E_{IT}			
Datenaufbereitung	$ITEE = \frac{W_{IT} [OPS/IOPS/GbPS]}{E_{IT} [kWh]}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
		+	<u>CADE</u> ; <u>DPPE</u> ; <u>ITAE</u>	+
		-		-
Besonderheiten				

IT Productivity per Embedded Watt (IT-PEW)				
Beschreibung / Einsatzszenario	misst die Energieproduktivität der IT-Geräte			
Wertebereich / Ziel	möglichst hoch			
Verantwortlichkeit	IT-Management			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: $W_{IT, Hardware}$; E_{IT}			
Datenaufbereitung	$IT-PEW = \frac{W_{IT, Hardware} [Trans/IO/Cycles]}{E_{IT} [kWh]}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
		+	<u>DC-EEP</u>	+
		-		-
Besonderheiten	beschreibt die geleistete Arbeit der IT-Geräte in der Form der Anzahl von Netzwerktransaktionen, Lese- und Schreiboperationen (IO) der Datenspeichersysteme oder Rechenzyklen der CPU der Server			

Hardware Energy / Power Overhead Multiplier (H-EOM / H-POM)				
Beschreibung / Einsatzszenario	misst Energieeffizienz der IT-Versorgungskomponenten (Lüfter, Netzteile, VRMs etc.);			
Wertebereich / Ziel	0 – 1; möglichst niedrig			
Verantwortlichkeit	IT-Management			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: E_{IT} ; P_{IT} ; $E_{IT, EC}$; $P_{IT, EC}$ $H-EOM = SPUE = ITUE = 1/ C2$			
Datenaufbereitung	$H-EOM = \int H-POM(t) dt = \frac{1}{C2} = ITUE = SPUE = \frac{E_{IT} [kWh]}{E_{IT, EC} [kWh]} = \int \frac{P_{IT}(t) [kW]}{P_{IT, EC}(t) [kW]} dt$			

Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
			<u>DC-EEP</u>	+
			<u>CEE ; CeP ; NeP ; SeP</u>	-
Besonderheiten	E _{IT, EC} als Energiebedarf bzw. P _{IT, EC} als Leistungsbedarf der datenverarbeitenden IT-Komponenten (CPU, RAM, HDD, NIC etc.) ist derzeit nur im Labor messbar oder über numerische Verfahren mit komponentennutzungsbasierten Energiemodellen approximierbar			

IT Equipment Utilization (ITEU) / IT Utilization (ITU)

Beschreibung / Einsatzszenario	misst die Auslastung der IT			
Wertebereich / Ziel	0 – 1 ; möglichst hoch			
Verantwortlichkeit	IT-Management			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: E _{IT} ; E _{IT, rated} <u>U_{Server}</u> , <u>U_{Storage}</u> , <u>U_{Network}</u> ; <u>U_{CPU}</u>			
Datenaufbereitung	nach (Belady and Patterson 2008): $ITEU = U_{Server} = U_{CPU}$ oder $ITEU = \min(U_{Server}, U_{Storage}, U_{Network})$ nach (Kaplan et al 2008): $ITEU = ITU = U_{CPU}$ nach (Green IT Promotion Council 2012): $ITEU = \frac{E_{IT} [kWh]}{E_{IT, rated} [kWh]}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
	<u>U_{server}</u> , <u>U_{storage}</u> , <u>U_{net}</u>	+	<u>CPE</u> , <u>DPPE</u> , <u>ITAE</u>	+
		-		-
Besonderheiten				

IT Equipment Load Density (ITLD)

Beschreibung / Einsatzszenario	misst die Leistungsdichte der IT im RZ			
Wertebereich / Ziel	0 – unendlich; keiner, ggfs. möglichst groß			
Verantwortlichkeit	IT-Management			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: P _{IT, inst} ; A _{IT}			
Datenaufbereitung	$ITLD = \frac{P_{IT, inst} [kW]}{A_{IT} [m^2]}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
		+	<u>CLD</u>	+
		-		-
Besonderheiten				

Server

Compute energy Productivity (CeP)				
Beschreibung / Einsatzszenario	misst die Energieproduktivität der Server als Summe des gewichteten Nutzens vollendeter Aufgaben der Server in Relation zum Energiebedarf der Server			
Wertebereich / Ziel	möglichst hoch			
Verantwortlichkeit	IT- Management			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: $W_{IT, Server}; E_{IT, Server}$			
Datenaufbereitung	$CeP = \frac{W_{IT, Server} [-]}{E_{IT, Server} [kWh]}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
	<u>H-EOM</u>	+		+
		-		-
Besonderheiten	Proxys für die nützliche Arbeit der Server siehe (Haas, et al., 2009)			

Data Center und Server compute Efficiency (DCcE und ScE)				
Beschreibung / Einsatzszenario	misst Verhältnis von primären Diensten mit Nutzen für den Kunden zu insgesamt auf den Servern laufenden Diensten (Virtualisierung, Virenschutz, Backup, etc.)			
Wertebereich / Ziel	möglichst hoch, Maximum: 1			
Verantwortlichkeit	IT-Management			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: $n_{Services, primary}; Server i; n_{Services, total, Server i}; n_{Server}$			
Datenaufbereitung	$DCcE = \sum_{i=1}^n ScE_i = \sum_{i=1}^n \frac{n_{Services, primary, i}}{n_{Services, total, i}}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
		+		+
		-		-
Besonderheiten				

Deployed Hardware Utilization Ratio (DH-UR _{Server})				
Beschreibung / Einsatzszenario	bestimmt den Anteil der betriebenen Server, auf denen produktive Applikationen laufen; zur Verbesserung der Kapazitätsplanung (Provisionierung), Konsolidierung			
Wertebereich / Ziel	Maximum: 1			
Verantwortlichkeit	IT-Management			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: $n_{Server, use}; n_{Server, use, productive}$			
Datenaufbereitung	$DH-UR_{Server} = \frac{n_{Server, use, productive}}{n_{Server, use}}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
		+		+
		-		-

Besonderheiten	keine
----------------	-------

Deployed Hardware Utilization Efficiency Server (DH-UE_{Server})

Beschreibung / Einsatzszenario	Bestimmt die Effizienz der Serverkapazitätsplanung zur Verbesserung der Kapazitätsplanung (Provisioning), Konsolidierung			
Wertebereich / Ziel	0 – 1 ; möglichst hoch			
Verantwortlichkeit	IT-Management			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: n _{Server, needed for peak load} ; n _{Server, deployed}			
Datenaufbereitung	$DH-UE_{Server} = \frac{n_{Server, use, needed for peak load}}{n_{Server, use}}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
Besonderheiten				

Server Utilization (U_{Server})

Beschreibung / Einsatzszenario	misst Auslastung des Servers als das Verhältnis der Prozessoraktivität zur maximalen Leistung im höchsten Frequenzzustand			
Wertebereich / Ziel	Maximum: 1			
Verantwortlichkeit	IT-Management			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: f _{CPU, actual} ; f _{CPU, max} U _{Server} = U _{CPU}			
Datenaufbereitung	$U_{Server} = U_{CPU} = \frac{f_{CPU, actual} [Hz]}{f_{CPU, max} [Hz]}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
		+	<u>ITEU</u>	+
		-		-
Besonderheiten	ggfs. auch als Min/Max. der Auslastung der Einzelkomponenten (CPU, RAM, HDD, NIC)			

Datenspeicher

Storage energy Productivity (SeP)

Beschreibung / Einsatzszenario	misst die Energieproduktivität der Datenspeicher im RZ als Summe des gewichteten Nutzens vollendeter Speicher Aufgaben in Relation zum Energiebedarf der Datenspeicher zur Messung der Energieproduktivität der Datenspeicher im operativen Betrieb			
Wertebereich / Ziel	möglichst hoch			
Verantwortlichkeit	IT- Management			

Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: $W_{IT, Storage}$; $E_{IT, Storage}$			
Datenaufbereitung	$SeP = \frac{W_{IT, Storage} [-]}{E_{IT, Storage} [kWh]}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
	<u>H-EOM</u>	+	<u>ITeP</u>	+
		-		-
Besonderheiten	Proxys für die nützliche Arbeit der Datenspeicher siehe (Blackburn, Data Center Storage Efficiency Metrics, 2012)			

Data Center storage Efficiency (DCsE)				
Beschreibung / Einsatzszenario	Misst die Effizienz der Datenspeichersysteme auf verschiedene Arten: Kapazität ($DCsE_{cap}$), Workload ($DCsE_{io}$) oder Durchsatz ($DCsE_{tp}$) Effizienzüberwachung des Datenspeichersystems im laufenden Betrieb, Kapazitätsplanung, als Grundlage für Effizienzverbesserungen			
Wertebereich / Ziel	möglichst hoch			
Verantwortlichkeit	IT-Management			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: $D_{DC, use}$; IO ; TP ; $P_{IT, Storage, avg}$			
Datenaufbereitung	$DCsE_{cap} = \frac{D_{DC, use} [GB]}{P_{IT, Storage, avg} [W]}$ $DCsE_{io} = \frac{IO [IOPS]}{P_{IT, Storage, avg} [W]}$ $DCsE_{tp} = \frac{TP [MBPS]}{P_{IT, Storage, avg} [W]}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
	<u>H-EOM</u>	+		+
		-		-
Besonderheiten				

Deployed Hardware Utilization Ratio Storage (DH-UR _{Storage})				
Beschreibung / Einsatzszenario	bestimmt Anteil des im RZ eingesetzten Speicherplatzes, der aktive Daten (regelmäßiger Zugriff) beherbergt; zur Verbesserung der Kapazitätsplanung (Provisionierung)			
Wertebereich / Ziel	0 – 1; möglichst hoch			
Verantwortlichkeit	IT-Management			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: $D_{DC, use, active}$; $D_{DC, use}$			
Datenaufbereitung	$DH-UR_{Storage} = \frac{D_{DC, use, active} [TB]}{D_{DC, use} [TB]}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
		+		+
		-		-

Besonderheiten	
----------------	--

Storage Utilization ($U_{Storage}$)

Beschreibung / Einsatzszenario	misst Auslastung der installierten Speicherplatzkapazität; für Kapazitätsplanung			
Wertebereich / Ziel	0 – 1; möglichst hoch			
Verantwortlichkeit	IT-Management			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: $D_{DC, use}$; $D_{DC, inst}$			
Datenaufbereitung	$U_{Store} = \frac{D_{DC, use} [GB]}{D_{DC, inst} [GB]}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
		+	<u>ITEU</u>	+
		-		-
Besonderheiten				

Netzwerk

Network energy Productivity (NeP)

Beschreibung / Einsatzszenario	misst die Energieproduktivität der Netzwerke als Summe des gewichteten Nutzens vollendeter Netzwerkaufgaben in Relation zum Energiebedarf der Netzwerke			
Wertebereich / Ziel	0 – unendlich; möglichst hoch			
Verantwortlichkeit	IT- Management			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: W_{net} ; E_{net}			
Datenaufbereitung	$NeP = \frac{W_{net} [-]}{E_{net} [kWh]}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
	<u>H-EOM</u>	+	<u>ITeP</u>	+
Besonderheiten				

Data Center network Efficiency (DCnE)

Beschreibung / Einsatzszenario	misst Effizienz der Netzwerke im RZ analog zum <u>DCsE</u> und <u>DCcE</u>			
Wertebereich / Ziel	0 – 1; möglichst hoch			
Verantwortlichkeit	IT-Management			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: tba			
Datenaufbereitung	tba			
Abhängigkeiten zu	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung

anderen Kennzahlen		+		+
		-		-
Besonderheiten	Metrik in Entwicklung			

Network Utilization (U_{Net})				
Beschreibung / Einsatzszenario	misst die Auslastung der im RZ zur Verfügung stehenden Netzwerkbandbreite; dient der Überwachung der Verfügbarkeit und der Kapazitätsplanung			
Wertebereich / Ziel	0 – unendlich; möglichst hoch			
Verantwortlichkeit	IT-Management			
Datenermittlung	Messwerte / Kennzahlen: B_{DC} ; $B_{DC, max.}$			
Datenaufbereitung	$U_{Net} = \frac{B_{DC, used} [Hz]}{B_{DC, inst} [Hz]}$			
Abhängigkeiten zu anderen Kennzahlen	Ursachenkennzahlen	Wirkrichtung	Wirkungskennzahlen	Wirkrichtung
		+	<u>ITEU</u>	+
		-		-
Besonderheiten				

8.2 Charakterisierungsfaktoren

Tabelle 70: 43 Charakterisierungsfaktoren für ADP nach der CML-Methode

Characterisation factors	group	Extraction	unit	Problem orient- ed approach: baseline [CML 2001]	Problem oriented approach: non baseline [CML 2001]	Problem oriented approach: non baseline [CML 2001]
impact category:				abiotic depletion (elements, ultimate reserves)	abiotic depletion (elements, reserve base)	abiotic depletion (elements, economic reserve)
alternatives:				ADP _{elements} [Oers et al. 2001]	ADP _{elements} [Oers et al. 2001]	ADP _{elements} [Oers et al. 2001]
Substance				kg antimony eq.	kg antimony eq.	kg antimony eq.
aluminium (Al)	element	resources	kg	1,09E-09	0,0000253	0,0000214
antimony (Sb)	element	resources	kg	1	1	1
arsenic (As)	element	resources	kg	0,00297	3,17	3,07
barium (Ba)	element	resources	kg	0,00000604	0,00337	0,0155
beryllium (Be)	element	resources	kg	0,0000126		
bismuth (Bi)	element	resources	kg	0,0411	4,49	10,8
boron (B)	element	resources	kg	0,00427	0,00528	0,0174
bromine (Br)	element	resources	kg	0,00439		
cadmium (Cd)	element	resources	kg	0,157	1,11	1,92
chlorine (Cl)	element	resources	kg	0,0000271		
chromium (Cr)	element	resources	kg	0,000443	0,0000196	0,0000377
cobalt (Co)	element	resources	kg	0,0000157	0,0256	0,0489

copper (Cu)	element	resources	kg	0,00137	0,0025	0,00394
gallium (Ga)	element	resources	kg	0,000000146		
germanium (Ge)	element	resources	kg	0,000000652	19500	10400
gold (Au)	element	resources	kg	52	36	39,9
helium (He)	element	resources	kg		0,0942	
indium (In)	element	resources	kg	0,00689	555	1150
iodine (I2)	element	resources	kg	0,025	0,00222	0,0031
iron (Fe)	element	resources	kg	5,24E-08	0,00000166	0,00000364
kalium (K;potassium)	element	resources	kg	0,000000016	0,000009	0,0000159
lead (Pb)	element	resources	kg	0,00634	0,015	0,0267
lithium (Li)	element	resources	kg	0,0000115	0,0133	0,0438
magnesium (Mg)	element	resources	kg	2,02E-09		
manganese (Mn)	element	resources	kg	0,00000254	0,0000235	0,00058
mercury (Hg)	element	resources	kg	0,0922	2,62	4,52
molybdenum (Mo)	element	resources	kg	0,0178	0,0711	0,146
nickel (Ni)	element	resources	kg	0,0000653	0,00418	0,0169
niobium (Nb)	element	resources	kg	0,0000193	0,0655	0,0696
palladium (Pd)	element	resources	kg	0,571	9,36	4,99
phosphorus (P)	element	resources	kg	0,00000552	0,0000621	0,000254
platinum (Pt)	element	resources	kg	2,22	9,09	4,85
rhenium (Re)	element	resources	kg	0,603	31,9	266
selenium (Se)	element	resources	kg	0,194	7,35	10,9
silicium (Si; si- licon)	element	resources	kg	1,4E-11		
silver (Ag)	element	resources	kg	1,18	8,42	8,16
Sodium (Na)	element	resources	kg	0,000000055		
strontium (Sr)	element	resources	kg	0,000000707	0,177	0,238
sulfur (S)	element	resources	kg	0,000193	0,000391	0,00105
tantalum (Ta)	element	resources	kg	0,0000406	11,5	22,8
tellurium (Te)	element	resources	kg	40,7	7,21	11,2
thallium (Tl)	element	resources	kg	0,0000243	2980	3750
tin (Sn)	element	resources	kg	0,0162	0,115	0,0777
titanium (Ti)	element	resources	kg	2,79E-08	0,00152	0,00178
tungsten (W); wolfram	element	resources	kg	0,00452	0,254	0,28
uranium (U)	element	resources	kg	0,0014	0,0656	0,0385
vanadium (V)	element	resources	kg	0,00000077	0,00493	0,0155
yttrium (Y)	element	resources	kg	0,000000569	0,816	0,423
zinc (Zn)	element	resources	kg	0,000538	0,00365	0,00805
Zirconium (Zr)	element	resources	kg	0,00000544	0,0164	0,023

(Version 4.7, 2016) ⁶⁰

Tabelle 71: 19 Charakterisierungsfaktoren nach ILCD-Handbuch

Element	Charakterisierungsfaktor (kg Sb-eq.)
bauxite	8,70E-06
beryllium	3,95E+00
brown coal; 11.9 MJ/kg	7,79E-09
carbon	4,44E-04
crude oil; 42.3 MJ/kg	7,79E-09
Oil sand (10 % bitumen) (in MJ)	7,79E-09
Oil sand (100 % bitumen) (in MJ)	7,79E-09
fluorspar	2,62E-03
gallium	6,30E-03
hard coal; 26.3 MJ/kg	7,79E-09
magnesium	2,48E-06
natural gas; 44.1 MJ/kg	7,79E-09
Pit Methane (in MJ)	7,79E-09
peat; 8.4 MJ/kg	6,75E-09
perlite	3,88E-05
sodium chloride	5,56E-07
sodium sulfate	9,92E-06
talc	1,18E-03
uranium	3,59E-07

CFs dataset (Version 1.0.10, August 2016) ⁶¹

Tabelle 72: Charakterisierungsfaktoren AADP

Materialien	AADP
Aluminium	3,00E-10
Antimony	1,00E+00
Beryllium	1,80E-04
Bismuth	8,35E-01
Boron	2,44E-02
Cadmium	3,08E+00
Chromium	9,03E-05
Cobalt	1,04E-03

⁶⁰ Dokumentenname: CML-IA_jan_2016.xls; <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors> (abgerufen am 10.05.2016)

⁶¹ http://eplca.jrc.ec.europa.eu/?page_id=140 (Stand: 19.05.2016)

Copper	5,41E-04
Gallium	3,82E-06
Germanium	1,84E-04
Gold	1,59E+00
Indium	7,48E-01
Iron	2,75E-08
Lead	4,80E-04
Lithium	2,42E-06
Magnesium	8,61E-10
Manganese	7,57E-05
Mercury	9,34E-01
Molybdenum	6,17E-03
Nickel	3,03E-05
Niobium	1,05E-03
PGM	6,93E+00
REE	1,19E-05
Rhenium	2,54E+03
Silver	2,28E-01
Strontium	6,77E-06
Tantalum	2,52E-03
Thallium	3,77E-05
Tin	1,52E-03
Titanium	9,15E-09
Tungsten	5,51E-02
Vanadium	2,40E-05
Zinc	8,60E-05
Zirconium	1,19E-06

Eigene, [Schneider et al. 2015], in Antimon-Äquivalenten (Sb-eq.)

Tabelle 73: Charakterisierungsfaktoren Ressourcenverbrauch nach Eco-Indicator 99

Minerals	Damage Factor	Fossil fuels	Unit: MJ Surplus Energie bezogen auf	Damage Factor
aluminium (in ore)	2,3800	coal	kg	0,25200
bauxite	0,5000	coal ETH	kg	0,15500
chromium (in ore)	0,9165	hard coal (resource)	MJ	0,00859
chromium (ore)	0,2750	energy from coal	MJ	0,00859
copper (in ore)	36,7000	crude oil	kg	5,90000
copper (ore)	0,4150	crude oil (feedstock)	kg	5,90000

iron (in ore)	0,0510	oil	kg	6,05000
iron (ore)	0,0290	crude oil ETH	kg	6,13000
lead (in ore)	7,3500	crude oil IDEMAT	kg	6,15000
lead (ore)	0,3680	crude oil (resource)	MJ	0,14400
manganese (in ore)	0,3130	energy from oil	MJ	0,14400
manganese (ore)	0,1410	crude gas	kg	4,20000
mercury (in ore)	165,5000	natural gas	kg	4,55000
molybdene (in ore)	41,0000	natural gas (feed-stock)	m ³	5,25000
molybdenum (ore)	0,0410	natural gas ETH	m ³	5,25000
nickel (in ore)	23,7500	natural gas (vol)	m ³	5,49000
nickel (ore)	0,3560	energy from natural gas	MJ	0,15000
tin (in ore)	600,0000	natural gas (resource)	MJ	0,15000
tin (ore)	0,0600			
tungsten (ore)	0,9270			
zinc (in ore)	4,0900			
zinc (ore)	0,1640			

Eco-Indicator 99 in der Einheit MJ Surplus Energie pro kg extrahiertes Metall oder Erz (direkt entnommen aus [Goedkoop und Spriensma 2001]). Die Tabelle zeigt die Charakterisierungsfaktoren für die Bewertung des Ressourcenverbrauchs nach Eco-Indicator 99, eine schadensorientierte Bewertungsmethode. Die Schäden an den Ressourcen werden durch den erhöhten Energiebedarf, welcher bei der Förderung entsteht, in Surplus Energie ausgedrückt. Die hinter den Metallen in klammerstehenden Angaben „in ore“ und „ore“, beschreiben ob es sich um das reine Metall (in ore) oder um das eigentliche Erz (ore) handelt. Bspw. verursacht ein kg Kupfererz einen Schaden von 0,415 MJ Surplus Energie. Das bedeutet, dass bei einer weiteren Förderung pro kg Kupfererz zusätzlich 0,415 MJ an Energie, aufgrund der niedrigeren Konzentration von Ressourcen oder anderer ungünstiger Merkmale der verbleibenden Vorräte erforderlich wird.

Tabelle 74: Charakterisierungsfaktoren Metal Depletion nach ReCiPe 2008

Compartments	Substance name (ReCiPe)	Substance name	Unit	MDP: Midpoint (kg Fe eq.)
raw	Ag	Silver	kg	286,10
raw	Al	Aluminium	kg	0,10
raw	Au	Gold	kg	69940,30
raw	Co	Cobalt	kg	1,00
raw	Cr	Chromium	kg	24,90
raw	Cu	Copper	kg	42,70
raw	Fe	Iron	kg	1,00
raw	Ir	Iridium	kg	92,50
raw	Mn	Manganese	kg	76,60
raw	Mo	Molybdenum	kg	207,50
raw	Ni	Nickel	kg	12,50

raw	Os	Osmium	kg	6484,60
raw	Pb	Lead	kg	1,80
raw	Pd	Palladium	kg	3812,30
raw	Pt	Platinum	kg	162805,20
raw	Rh	Rhodium	kg	20328,20
raw	Ru	Ruthenium	kg	2007,70
raw	Sn	Tin	kg	1271,30
raw	U	Uranium	kg	122,50
raw	Zn	Zinc	kg	2,30
raw		Copper in ore, in ground (zusammenfassend)	kg	42,70
raw		Gold, in ore, in ground (zusammenfassend)	kg	69900,00
raw		Lead, in ore, in ground	kg	1,77
raw		Molybdenum, in crude ore, in ground	kg	208,00
raw		Nickel, in crude ore, in ground	kg	12,50
raw		Pd, in ore, in ground	kg	3810,00
raw		Pt, in ore, in ground	kg	163000,00
raw		Rh, in ore, in ground	kg	20300,00
raw		Silver, in ground	kg	286,00
raw		Zinc, in ore, in ground	kg	2,25

Stand: Version 1.11 - Dezember 2014⁶²

Tabelle 75: Charakterisierungsfaktoren Fossil depletion nach ReCiPe 2008

Compartments	Substance name	Unit	FDP (Midpoint: kg oil eq)
raw	Coal, 18 MJ per kg, in ground	kg	0,41
raw	Coal, 26.4 MJ per kg, in ground	kg	0,60
raw	Coal, 29.3 MJ per kg, in ground	kg	0,67
raw	Coal, brown, 10 MJ per kg, in ground	kg	0,23
raw	Coal, brown, 8 MJ per kg, in ground	kg	0,18
raw	Coal, brown	kg	0,22
raw	Coal, feedstock, 26.4 MJ per kg, in ground	kg	0,60
raw	Coal, hard	kg	0,43
raw	Energy, from coal	MJ	0,02
raw	Energy, from coal, brown	MJ	0,02
raw	Energy, from gas, natural	MJ	0,02
raw	Energy, from oil	MJ	0,02
raw	Energy, from peat	MJ	0,02

⁶² <http://www.lcia-recipe.net/file-cabinet>

raw	Energy, from sulfur	MJ	0,02
raw	Gas, mine, off-gas, process, coal mining/kg	kg	1,07
raw	Gas, mine, off-gas, process, coal mining/m3	m3	0,86
raw	Gas, natural, 30.3 MJ per kg, in ground	kg	0,72
raw	Gas, natural, 35 MJ per m3, in ground	m3	0,84
raw	Gas, natural, 36.6 MJ per m3, in ground	m3	0,87
raw	Gas, natural, 46.8 MJ per kg, in ground	kg	1,11
raw	Gas, natural, feedstock, 35 MJ per m3, in ground	m3	0,84
raw	Gas, natural, feedstock, 46.8 MJ per kg, in ground	kg	1,11
raw	Gas, natural	m3	0,82
raw	Gas, off-gas, oil production, in ground	m3	0,86
raw	Gas, petroleum, 35 MJ per m3, in ground	m3	0,84
raw	Methane	kg	1,19
raw	Oil, crude, 38400 MJ per m3, in ground	m3	916,88
raw	Oil, crude, 41 MJ per kg, in ground	kg	0,98
raw	Oil, crude, 42 MJ per kg, in ground	kg	1,00
raw	Oil, crude, 42.6 MJ per kg, in ground	kg	1,01
raw	Oil, crude, 42.7 MJ per kg, in ground	kg	1,02
raw	Oil, crude, feedstock, 41 MJ per kg, in ground	kg	0,98
raw	Oil, crude, feedstock, 42 MJ per kg, in ground	kg	1,00
raw	Oil, crude	kg	1,04

Stand: Version 1.11 - Dezember 2014⁶³

Tabelle 76: Wirkungsindikatoren hinsichtlich ADP nach ESP 2000

Safeguard subject: Abiotic Stock Resource		
Impact Category	Indicator name	unit
Depletion of element reserves	“element name” reserves	Kg of element
Depletion of fossil reserves	Natural gas reserves	Kg
Depletion of fossil reserves	Oil reserves	Kg
Depletion of fossil reserves	Coal reserves	Kg
Depletion of mineral reserves	“mineral name” reserves	Kg of minerals

(Direkt entnommen aus Mattsson 2012) - Safeguard subject: Abiotic Stock Resource

⁶³ <http://www.lcia-recipe.net/file-cabinet>

8.3 „Die“-Fläche der Serverprozessoren nach technischen Parametern

Tabelle 77: Intel Serverprozessoren

Intel Xeon Processor E7 v3 Family	Intel Xeon Processor D Family
Intel Xeon Processor E7 v2 Family	Intel Xeon Processor 7000 Sequence
Intel Xeon Processor E7 Family	Intel Xeon Processor 6000 Sequence
Intel Xeon Processor E5 v4 Family	Intel Xeon Processor 5000 Sequence
Intel Xeon Processor E5 v3 Family	Intel Xeon Processor 3000 Sequence
Intel Xeon Processor E5 v2 Family	Intel Xeon Phi Processor Coprocessor x100 Product Family
Intel Xeon Processor E5 Family	Legacy Intel Xeon Processor
Intel Xeon Processor E3 v5 Family	Intel Itanium Processor
Intel Xeon Processor E3 v4 Family	Intel Atom Processor for Storage
Intel Xeon Processor E3 v3 Family	Intel Atom Processor for Server
Intel Xeon Processor E3 v2 Family	Intel Pentium Processor
Intel Xeon Processor E3 Family	Legacy Intel Pentium Processor

<http://ark.intel.com/De - @Processors>)

Tabelle 78: AMD Serverprozessoren [Fischer 2016]

Modelname	Codename
K8	Sledgehammer
K8	Venus
K8	Troy
K8	Athens
K9: Opteron 100	Denmark
K9: Opteron 200	Italy
K9: Opteron 800	Egypt
K9: Opteron 1200	Santa Ana
K9: Opteron 2200/8200	Santa Rosa
K10: Opteron 1300	Budapest
K10: Opteron 2300/8300	Barcelona
K10: Opteron 2300/8300	Shanghai
K10: Opteron 2400/8400	Istanbul
K10: Opteron 4100	Lisbon
K10: Opteron 6100	Magny-Cours
Bulldozer: Opteron 3200	Zurich
Bulldozer: Opteron 4200	Valencia
Bulldozer: Opteron 6200	Interlagos
Bulldozer 2nd Gen: Opteron 3300	Dehli

Bulldozer 2nd Gen: Opteron 4300	Seoul
Bulldozer 2nd Gen: Opteron 6300	Abu Dhabi
Bulldozer 2nd Gen: Opteron 6300	Warsaw

<http://ark.intel.com/De#@Processors> (Stand: 17.05.2016)

Tabelle 79: Zusammenfassung der „Die“-Fläche der Intel-Prozessoren nach technischen Parametern

Hersteller	Codename	Strukturbreite	Anzahl der Kerne	„Die“-Fläche	Quelle
Intel	Broadwell, HCC	14nm	16-24	456 mm ²	http://www.golem.de/news/xeon-e5-e7-v4-moore-s-law-lebt-bei-entsprechender-auslegung-1603-119531.html
Intel	Broadwell, LCC	14nm	<10	246 mm ²	http://www.golem.de/news/xeon-e5-e7-v4-moore-s-law-lebt-bei-entsprechender-auslegung-1603-119531.html
Intel	Broadwell, MCC	14nm	11-15	306 mm ²	http://www.golem.de/news/xeon-e5-e7-v4-moore-s-law-lebt-bei-entsprechender-auslegung-1603-119531.html
Intel	Skylake	14nm	4	122 mm ²	Skylake GT2 4C als Annahme, http://www.anandtech.com/show/9505/skylake-cpu-package-analysis
Intel	Avoton	22nm	4	105 mm ²	http://investorshub.advfn.com/boards/read_message.aspx?message_id=98513208
Intel	Avoton	22nm	2/8	105 mm ²	Die angenommene Fläche entspricht der von Avoton mit vier Kernen.
Intel	Haswell, LCC ⁶⁴	22nm	4-8	354 mm ²	http://wccftech.com/intel-xeon-e52600-v3-haswellep-workstation-server-processors-unleashed-highperformance-computing/
Intel	Haswell, MCC	22nm	10-12	492 mm ²	http://wccftech.com/intel-xeon-e52600-v3-haswellep-workstation-server-processors-unleashed-highperformance-computing/
Intel	Haswell, HCC	22nm	14-18	662 mm ²	http://wccftech.com/intel-xeon-e52600-v3-haswellep-workstation-server-processors-unleashed-highperformance-computing/
Intel	IvyBridge EN/EP, LCC	22nm	2-6	257 mm ²	http://www.golem.de/news/xeon-e5-e7-v4-moore-s-law-lebt-bei-entsprechender-auslegung-1603-119531.html
Intel	IvyBridge EN/EP, MCC	22nm	8-10	341 mm ²	http://www.golem.de/news/xeon-e5-e7-v4-moore-s-law-lebt-bei-entsprechender-auslegung-1603-119531.html

⁶⁴ LCC (Low Core Count); MCC (Medium Core Count); HCC (High Core Count)

Intel	IvyBridge EN/EP, HCC	22nm	11-15	541 mm ²	http://www.golem.de/news/xeon-e5-e7-v4-moore-s-law-lebt-bei-entsprechender-auslegung-1603-119531.html
Intel	Briarwood	32nm	2	81 mm ²	Die angenommene Fläche entspricht der von Clarkdale
Intel	Centerton	32nm	2	81 mm ²	Die angenommene Fläche entspricht der von Clarkdale
Intel	Clarkdale	32nm	2	81 mm ²	http://ark.intel.com/#@Processors
Intel	Gulftown	32nm	6	239 mm ²	http://ark.intel.com/#@Processors
Intel	Poulson	32nm	4	544 mm ²	angenommen wie Poulson mit 8 Kernen.
Intel	Poulson	32nm	8	544 mm ²	http://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/white-papers/itanium-poulson-isscc-paper.pdf
Intel	SandyBridge	32nm	2,4	295 mm ²	Die angenommene Fläche entspricht der von SandyBridge EP mit 2-4 Kernen
Intel	SandyBridge EN	32nm	6,8	435 mm ²	Die angenommene Fläche entspricht der von SandyBridge EP mit 6-8 Kernen
Intel	SandyBridge EP	32nm	2-4	295 mm ²	http://www.golem.de/news/xeon-e5-e7-v4-moore-s-law-lebt-bei-entsprechender-auslegung-1603-119531.html
Intel	SandyBridge EP	32nm	6-8	435 mm ²	http://www.golem.de/news/xeon-e5-e7-v4-moore-s-law-lebt-bei-entsprechender-auslegung-1603-119531.html
Intel	WestmereEP	32nm	4-6	248 mm ²	https://en.wikipedia.org/wiki/Westmere%28microarchitecture%29
Intel	WestmereEX	32nm	8-10	513 mm ²	https://en.wikipedia.org/wiki/Westmere%28microarchitecture%29
Intel	Bloomfield	45nm	4	263 mm ²	http://ark.intel.com/#@Processors
Intel	Dunnington	45nm	4	503 mm ²	http://ark.intel.com/#@Processors
Intel	Dunnington	45nm	6	503 mm ²	http://ark.intel.com/#@Processors
Intel	Harpertown	45nm	4	214 mm ²	http://ark.intel.com/#@Processors
Intel	Lynnfield	45nm	4	296 mm ²	http://ark.intel.com/#@Processors
Intel	NehalemEP/EX	45nm	2	296 mm ²	https://en.wiki2.org/wiki/Nehalem%28microarchitecture%29
Intel	NehalemEP/EX	45nm	4	263 mm ²	http://ark.intel.com/#@Processors
Intel	NehalemEP/EX	45nm	8	684 mm ²	https://en.wiki2.org/wiki/Nehalem%28microarchitecture%29
Intel	Wolfdale	45nm	2	107 mm ²	http://ark.intel.com/#@Processors
Intel	Yorkfield,	45nm	4	214 mm ²	http://ark.intel.com/#@Processors

	12MB Cache				
Intel	Yorkfield, 6MB Cache	45nm	4	164 mm ²	http://ark.intel.com/#@Processors
Intel	Clovertown	65nm	4	286 mm ²	http://ark.intel.com/#@Processors
Intel	Conroe2M Cache	65nm	2	111 mm ²	http://ark.intel.com/#@Processors
Intel	Conroe4M Cache	65nm	2	143 mm ²	http://ark.intel.com/#@Processors
Intel	Dempsey	65nm	2	162 mm ²	http://ark.intel.com/#@Processors
Intel	Kentsfield	65nm	4	286 mm ²	http://ark.intel.com/#@Processors
Intel	Sossaman	65nm	2	90 mm ²	http://ark.intel.com/#@Processors
Intel	Tigerton	65nm	2-4	286 mm ²	http://ark.intel.com/#@Processors
Intel	Tukwila	65nm	2-4	700 mm ²	http://www.cgo.org/cgo2010/epic8/slides/schaelicke.pdf
Intel	Tulsa	65nm	2	435 mm ²	http://ark.intel.com/#@Processors
Intel	Woodcrest	65nm	2	143 mm ²	http://ark.intel.com/#@Processors
Intel	Cranford	90nm	1	112 mm ²	http://ark.intel.com/#@Processors
Intel	Irwindale	90nm	1	135 mm ²	http://ark.intel.com/#@Processors
Intel	Montecito	90nm	2	596 mm ²	http://ark.intel.com/#@Processors
Intel	Montvale	90nm	1-2	596 mm ²	http://ark.intel.com/#@Processors
Intel	Nocona	90nm	1	112 mm ²	http://ark.intel.com/#@Processors
Intel	Paxville	90nm	2	206 mm ²	http://ark.intel.com/#@Processors
Intel	Potomac	90nm	1	112 mm ²	Die angenommene Fläche entspricht der von Nocona
Intel	Gallatin	130nm	1	555 mm ²	http://ark.intel.com/#@Processors
Intel	Madison, 1,5 MB/3 MB/4 MB/6 MB Cache	130nm	1	374 mm ²	http://ark.intel.com/#@Processors
Intel	Madison, 9 M Cache	130nm	1	432 mm ²	http://ark.intel.com/#@Processors
Intel	Prestonia	130nm	1	131 mm ²	http://ark.intel.com/#@Processors
Intel	Tualatin	130nm	1	79 mm ²	https://www.techinsights.com/uploadedFiles/Public_Website/Content_-_Primary/Marketing/2014/Technology%20Roadmap%20INTEL%20Processors%202014.ppt
Intel	Cascades, <2 MB	180nm	1	106 mm ²	http://www.chiplist.com/Intel_Pentium_III_Xeon_processor_Cascades/tree3f-subsection--2431-/
Intel	Cascades,	180nm	1	385 mm ²	http://www.chiplist.com/Intel_Pentium_III_Xe

	2 MB	m			on_processor Cascades 2MB/tree3f-subsection--2437-/
Intel	Foster	180nm	1	217 mm ²	http://www.chiplist.com/Intel_Pentium_4_Xeon_DP_processor_Foster/tree3f-subsection--2163-/
Intel	Tanner	250nm	1	128 mm ²	http://www.chiplist.com/Intel_Pentium_III_Xeon_processor_Tanner/tree3f-subsection--2427-/ /

<http://ark.intel.com/De#@Processors> (Stand: 17.05.2016)

Tabelle 80: Zusammenfassung der „Die“-Fläche der AMD-Prozessoren nach technischen Parametern

Hersteller	Codename	Strukturbreite	Anzahl der Kerne	„Die“-Fläche	Quelle
AMD	Zurich	32nm	4/8	316 mm ²	Die angenommene Fläche entspricht der von Valencia
AMD	Valencia	32nm	6/8	316 mm ²	https://www.amd.com/Documents/Opteron_4000_QRG.pdf
AMD	Interlagos	32nm	4/8/12/16	316 mm ²	https://www.amd.com/Documents/Opteron_6000_QRG.pdf
AMD	Delhi	32nm	4/8	315 mm ²	https://www.amd.com/Documents/Opteron_3300_QRG.pdf
AMD	Seoul	32nm	6/8	316 mm ²	Die angenommene Fläche entspricht der von Valencia
AMD	Abu Dhabi	32nm	4/8/12/16	316 mm ²	Die angenommene Fläche entspricht der von Valencia
AMD	Warsaw	32nm	12/16	316 mm ²	Die angenommene Fläche entspricht der von Valencia
AMD	Shanghai	45nm	4	503 mm ²	Die angenommene Fläche entspricht der von Intel Dunnington
AMD	Istanbul, Lisbon	45nm	6	503 mm ²	Die angenommene Fläche entspricht der von Intel Dunnington
AMD	Magny-Course	45nm	8/12	684 mm ²	Die angenommene Fläche entspricht der von Intel Nehalem EP/EX
AMD	Budapest; Barcelona	65nm	4	286 mm ²	Die angenommene Fläche entspricht der von Intel Clovertown
AMD	Venus; Troy; Athens	90nm	1	135 mm ²	Die angenommene Fläche entspricht der von Intel Irwindale
AMD	Denmark; Italy; Egypt; Santa Ana; Santa Rosa	90nm	2	596 mm ²	Die angenommene Fläche entspricht der von Intel Montecito
AMD	Sledgehammer	130nm	1	555 mm ²	Die angenommene Fläche entspricht der von Intel Gallatin

8.4 ProBas-Datensätze

ProBas-Datensatz für die Herstellung des Prozessors nach [Prakash et al. 2016]

Tabelle 81: Eingabe- und Ausgabedaten für die Herstellung des Front-End-Prozesses des Prozessors

Eingabe	Menge	Einheit	Ausgabe	Menge	Einheit
Silizium Wafer	1,38E+00	m ²	Good die out	1	m ²
Wasser	1,60E+05	kg	Emissionen in Luft:		
Strom	3,02E+04	kWh	2-Methylaminoethanol	2,05E-02	kg
Erdgas	4,55E+01	kWh	Aceton	1,39E-01	kg
Stickstoff (N ₂)	5,36E+03	kg	Aluminiumoxid (Al ₂ O ₃)	2,42E-06	kg
Sauerstoff (O ₂)	2,28E+02	kg	Argon (Ar)	4,51E+01	kg
Chlorwasserstoff (HCl) (37 %)	1,22E+02	kg	Arsen (As)	3,71E-05	kg
Fluorwasserstoffsäure (HF)	8,82E+01	kg	Arsen(III)-oxid (As ₂ O ₃)	1,14E-07	kg
Ammoniak (NH ₃)	1,19E+02	kg	Arsenwasserstoff (AsH ₃)	3,14E-05	kg
Argon	4,51E+01	kg	Bor (B)	3,71E-05	kg
Aceton	1,39E+00	kg	Diboran (B ₂ H ₆)	3,22E-07	kg
2-Methylaminoethanol	5,45E+00	kg	Bortrioxid (B ₂ O ₃)	6,73E-07	kg
Butylacetat	2,94E+00	kg	Brom (Br ₂)	7,82E-05	kg
Ethylendiamintetraessigsäure (EDTA)	2,88E+00	kg	Essigsäure-n-butylester	1,11E-02	kg
Natriumhydroxid (NaOH)	7,44E-01	kg	Hexafluorethan (C ₂ F ₆)	1,06E-02	kg
Phosphorsäure (H ₃ PO ₄) (85 %)	6,84E+00	kg	C ₂ H ₅ OC ₂ H ₅	1,84E-03	kg
Schwefelsäure (H ₂ SO ₄)	7,31E+01	kg	Octafluorocyclobutan (C ₄ F ₈)	8,71E-04	kg
Wasserstoffperoxid (H ₂ O ₂) (30 %)	5,26E+01	kg	Perfluorocyclopenten (C ₅ F ₈)	3,48E-03	kg
Kupfersulfat (CuSO ₄)	5,73E+01	kg	Tetrafluormethan (CF ₄)	2,61E-02	kg
Kaliumhydroxid (KOH)	1,16E+02	kg	Difluormethan (CH ₂ F ₂)	5,13E-05	kg
Isopropanol	3,07E+01	kg	Brommethan (CH ₃ Br)	1,73E-04	kg
Stickstofftrifluorid (NF ₃)	1,61E-01	kg	Chlormethan (CH ₃ Cl)	5,40E-04	kg
Schwefelhexafluorid (SF ₆)	7,25E-01	kg	Fluormethan (CH ₃ F)	3,35E-05	kg
Hexafluorethan (C ₂ F ₆); Octafluorocyclobutan (C ₄ F ₈); Perfluorocyclopenten (C ₅ F ₈)	7,11E-01	kg	Dimethylether (CH ₃ OCH ₃)	7,71E-05	kg
Wasserstoff (H ₂)	1,98E+00	kg	Methan (CH ₄)	2,09E+00	kg
Fluoroform (CHF ₃)	6,90E-03	kg	Fluoroform (CHF ₃)	6,90E-05	kg
Tetrafluormethan (CF ₄)	2,68E-01	kg	Kohlenstoffmonoxid (CO)	5,69E-03	kg
Salpetersäure (HNO ₃) (69 %)	5,04E+00	kg	Kohlenstoffdioxid (CO ₂)	3,12E+01	kg

Quarzsand in Schlacke	9,45E+00	kg	Carbonylfluorid (COF ₂)	2,16E-04	kg
Milchsäureethylester	2,49E+01	kg	Milchsäureethylester	4,37E-01	kg
Distickstoffmonoxid (N ₂ O)	3,65E-01	kg	Fluor (F ₂)	1,02E-03	kg
Hexamethyldisilazan	2,28E-01	kg	γ-Butyrolacton	4,44E-04	kg
Difluormethan (CH ₂ F ₂)	2,95E-02	kg	Wasserstoff (H ₂)	4,19E-01	kg
Siliciumtetrachlorid (SiCl ₄); Siliciumtetrafluorid (SiF ₄)	2,53E-03	kg	Schwefelsäure (H ₂ SO ₄)	4,61E-02	kg
Kohlenstoffmonoxid (CO)	3,68E-03	kg	Bromwasserstoff (HBr)	2,13E-04	kg
chemical, organic	2,02E+01	kg	Salzsäure (HCl)	6,75E-03	kg
			Helium (He)	2,26E-01	kg
			Hexamethyldisilazan	2,69E-05	kg
			Fluorwasserstoffsäure (HF)	9,86E-03	kg
			Salpetersäure (HNO ₃)	5,21E-03	kg
			Isopropanol	3,36E-01	kg
			Methylnonafluorobutyl ether	3,96E-03	kg
			Distickstoffmonoxid (N ₂ O)	2,68E-01	kg
			Stickstofftrifluorid (NF ₃)	5,09E-04	kg
			Ammoniak (NH ₃)	5,48E-02	kg
			Stickstoffmonoxid (NO)	3,34E-05	kg
			Stickstoffdioxid (NO ₂)	1,96E-01	kg
			organische Chlorverbindun- gen	1,24E-07	kg
			1,2-Propandiol	2,70E-03	kg
			Propylen-Glykol-Methyl- Ätheracetat (PGMEA)	2,00E-02	kg
			Schwefelhexafluorid (SF ₆)	2,85E-02	kg
			Schwefeldioxid (SO ₂)	8,37E-04	kg
			Tetramethylammoniumhyd- roxid	7,26E-03	kg
			Trimethylsilanol	2,98E-03	kg

[Prakash et al. 2016], Emissionen ins Wasser und in den Boden wurden nicht aufgelistet, da sie für die vorliegende Untersuchung irrelevant sind.

Tabelle 82: Eingabe- und Ausgabedaten für die Herstellung des Back-End-Prozesses des Prozessors

Eingabe	Menge	Einheit	Ausgabe	Menge	Einheit
Wasserverbrauch	9.000	kg	CPU	1	m ²
Strom	2882,34	kWh			
Na ₂ CO ₃ oder K ₂ CO ₃	7,07E-06	kg			
epoxy resin insulator, SiO ₂	1,84E-08	kg			

Zinn (Sn)	0,4328	kg			
Silber (Ag)	0,0181	kg			
Kupfer (Cu)	0,0023	kg			

[Prakash et al. 2016]

ProBas-Datensatz für die Herstellung des Speicherchips nach [Prakash et al. 2013]

Tabelle 83: Eingabe- und Ausgabedaten für den Datensatz „IC-Fertigung-Front End Prozess\“good die out“ (direkte Emissionen)

Eingabe			Ausgabe ⁶⁵		
Silizium-Wafer	1,38	cm ²	„good die out“	1	cm ²
Strom	1,27	kWh	HFC-23 (Trifluormethan) (Abgasemissionen)	2,26E-06	kg
Gas	0,16	kWh	perfluorethan (C ₂ F ₆) (Abgasemissionen)	3,84E-06	kg
Wasser	7,88	kg	Tetrafluormethan (CF ₄) (Abgasemissionen)	3,25E-06	kg
N ₂ (hochrein)	6,06E-01	kg	Perfluorpropan (C ₃ F ₈) (Abgasemissionen)	2,26E-06	kg
O ₂ (hochrein)	4,13E-03	kg	SF ₆ (Abgasemissionen)	2,26E-06	kg
Ar (Argon) (hochrein)	2,34E-03	kg	Stickstofftrifluorid (NF ₃) (Abgasemissionen)	1,56E-05	kg
H ₂ (hochrein)	6,34E-05	kg			
Schwefelsäure (hochrein)	7,33E-03	kg			
Wasserstoffperoxid (hochrein)	2,04E-03	kg			
Fluorwasserstoffsäure (hochrein)	5,53E-04	kg			
Phosphorsäure (hochrein)	3,32E-03	kg			
2-Propanol (C ₃ H ₈ O)/ Isopropylalkohol (IPA) (hochrein)	2,78E-03	kg			
Ammoniumhydroxid (hochrein)	1,09E-03	kg			
CF ₄	5,94E-05	kg			
CHF ₃	5,66E-06	kg			
NF ₃	3,02E-04	kg			
C ₂ F ₆	6,89E-05	kg			

⁶⁵ Die Zuordnung der Emissionen nach Umweltmedien beruht auf eigene Annahmen. Abfälle und Abwasser konnten wegen fehlenden Daten nicht erfasst werden.

SF ₆	8,96E-06	kg			
NaOH (für Abwasserbehandlung)	2,04E-03	kg			

[Prakash et al. 2013]

Tabelle 84: Eingabe- und Ausgabedaten für Datensatz „IC-Fertigung-Back End Prozess“ (direkte Emissionen)

Eingabe			Ausgabe ⁶⁶		
Strom	0,246	kWh	Speicherchip ⁶⁷	1	Stück (= 0,162g)
Erdgas	0,0305	kWh			
Unverkapselter Chip mit 43mm ² (Silizium)	2,37E-05	kg			
Polymer	1,06E-05	kg			
SiO ₂	4,75E-05	kg			
Au	2,00E-07	kg			
Carbon Black	2,00E-07	kg			
Ag	7,00E-07	kg			
Cu	1,00E-07	kg			
Sn	2,63E-05	kg			
BT-Core (Bismaleimide-triazine)+Cu+Au+Ni	5,26E-05	kg			

[Prakash et al. 2013]

Tabelle 85: Produktionsverteilung der Front-End-Prozesse für die IC-Herstellung nach Ländern

Produktionsverteilung der Front-End-Prozesse nach Ländern	Anteil
USA	15 %
Europa	8 %
Japan	23 %
Korea	14 %
Taiwan	23 %
China	8 %
Singapur	9 %
Summe	100 %

[Prakash et al. 2012]

⁶⁶ Abgasemissionen, Abfälle und Abwasser konnten wegen fehlenden Daten nicht erfasst werden.

⁶⁷ Blei ist in der Material-Deklaration nicht aufgeführt. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass Blei in geringen Mengen im Rahmen von bestehenden RoHS-Ausnahmen enthalten ist.

Tabelle 86: Produktionsverteilung der Back-End-Prozesse 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 %

[Prakash et al. 2012]

Tabelle 87: Eingabe- und Ausgabedaten für den Datensatz „Herstellung Leiterplatte“

Eingabe			Ausgabe		
Glass-Epoxy-Laminat (Dicke: 1,6mm)	4,026	kg	Leiterplatte	1	m ² PCB
Glasfaser	0,312	kg			
Epoxidharz	1,658	kg			
Aluminium	0,217	kg			
Kupfer	1,361	kg			
Aluminiumoxid	0,002	kg			
Eisenoxid	0,100	kg			
Nickelsulfat	0,120	kg			
Gold	0,0002	kg			
Natriumhydroxid	0,208	kg			
Natriumchlorid	0,758	kg			
Fällungsmittel (enthält Eisen, Aluminium und Flockungsmittel)	0,982	kg			
Zellulose	0,564	kg			
Ethylenglykolmonoethylether	0,018	kg			
Organische Chemikalien	0,215	kg			
Anorganische Chemikalien	4,440	kg			
Strom	337,5	kWh			
Wärme	207	MJ			
Wasser	3,3525	m ³			

[Prakash et al. 2016]

ProBas-Datensatz für die Herstellung der internen Festplatte nach [Prakash et al. 2016]

Tabelle 88: Eingabe- und Ausgabedaten für den Datensatz „Herstellung\interne 3,5"-Festplatte“

Eingabeflüsse			Menge	Einheit	Ausgabeflüsse	Menge	Einheit
Komponenten-Zusammenfassung					Produkt	1	3,5"-HDD (1TB; 3 Medien)
NIB-Magnet					Luftemissionen		
	Eisen (Fe)	1,09E-02	kg	Schwefelhexafluorid (SF ₆)	2,42E-08	kg	
	Neodym (Nd)	3,87E-03	kg	Tetrafluormethan (CF ₄)	7,84E-09	kg	
	Praseodym (Pr)	7,73E-04	kg	Stickstofftrifluorid (NF ₃)	7,86E-09	kg	
	Dysprosium (Dy)	3,20E-04	kg	Perfluorpentan	1,00E-03	kg	
	Bor (B)	1,60E-04	kg	VOC	2,45E-03	kg	
Ringmagnet					Abfälle		
	gefährliche Abfälle	gefährliche Abfälle	gefährliche Abfälle	gefährliche Abfälle	1,07E-01	kg	
	unspezifische Abfälle	unspezifische Abfälle	unspezifische Abfälle	unspezifische Abfälle	9,40E-02	kg	
Leiterplatte					Abwasser	9,60E+00	Liter
	unbestückte Leiterplatte (Lagenanzahl: 4-6)	4,21E+01	cm ²				
	Prozessor	3,71E+01	mm ² („Die“-Fläche)				
	Andere Mikrochips (für Motor-Kontroller; Speicherchips)	2,75E+01	mm ² („Die“-Fläche)				
	Widerstände	7,10E-05	kg				
	Kondensatoren	1,61E-04	kg				
	Transistoren	2,24E-04	kg				
	Induktoren	1,92E-04	kg				
	Dioden	1,28E-04	kg				

	Kontakte	8,00E-05	kg			
	Shock Sensor	2,00E-05	kg			
	SATA-Stecker	6,00E-03	kg			
	Flexible Leiterplatte					
	unbestückte Leiterplatte	9,90E+00	cm ²			
	Steckverbinder	1,36E-03	kg			
	davon Kupfer	8,64E-04	kg			
	davon PA66	5,36E-04	kg			
	Lese/Schreibkopf					
	Aluminium	8,00E-03	kg			
	Gold	3,04E-09	kg			
	Mikrochip	1,64E+01	mm ² („Die“- Fläche)			
	Medien (Al-basiert)					
	Al	6,37E-02	kg			
	Nickel	3,09E-03	kg			
	Magnesium	2,16E-03	kg			
	Phosphor	9,00E-05	kg			
	Kobalt	8,40E-06	kg			
	Ruthenium	5,67E-06	kg			
	Chrom	3,50E-06	kg			
	Tantal	2,69E-06	kg			
	Platin	2,31E-06	kg			
	Eisen	2,30E-06	kg			
	Titan	1,98E-06	kg			
	Bor	1,08E-06	kg			
	Zirkonium	7,20E-07	kg			
	Kohlenstoffe	5,70E-07	kg			
	Perfluorpolyether	9,00E-08	kg			
	kristallines Siliziumdioxid	6,00E-08	kg			
	Molybdän	6,00E-08	kg			
	Silizium	6,00E-08	kg			
	Titanium(IV) oxide	3,00E-08	kg			
	Kupfer	1,50E-08	kg			
	Aluminium-Komponenten					
	Gehäuse: Unterer Deckel	2,71E-01	kg			
	Motorringe	7,00E-03	kg			
	Aluminium-Teile zwischen Platten	1,40E-02	kg			

Stahl-Komponenten					
Gehäuse: Oberer Deckel	8,70E-02	kg			
Motor	2,10E-02	kg			
Metallring (Magnet Ring)	5,00E-03	kg			
Spulenring vom Motor (Grün)	6,00E-03	kg			
Träger	5,40E-02	kg			
Kugellagerzylinder	5,27E-03	kg			
Schrauben	6,00E-03	kg			
Kupfer-Komponenten					
Kupferdrähte	3,00E-03	kg			
Kupferspule	3,00E-03	kg			
Produktionsaufwand					
Strom (Malaysia)	9,03E+00	kWh			
davon in der Montage und Test	3,52E+00	kWh			
davon in der Produktion der Slider, HGAs und Medien	5,51E+00	kWh			
Erdgas	2,43E-01	kWh			
Diesel	2,66E-03	kWh			
Benzin	1,60E-05	kWh			
Flüssiggas (LPG: Liquefied Petroleum Gas)	8,18E-03	kWh			
Propan	1,25E-02	kWh			
Heizöl	4,75E-03	kWh			
Wasser	4,76E+01	Liter			
Isopropylalkohol (IPA)	5,00E-04	kg			
Perfluorpentan	1,00E-03	kg			

[Prakash et al. 2016]

Tabelle 89: Materialienzusammensetzung eines glasbasierten Mediums für 2,5"-HDD

Glasbasierte Medien	Menge (g/Medium)	Anteil
kristallines Siliziumdioxid	3,17	66,8 %
Siliziumdioxid	1,33	28,1 %
Al2O3	0,23	4,9 %
Kobalt	0,00122	0,026 %
Ruthenium	0,00092	0,019 %
Tantal	0,00038	0,0080 %
Chrom	0,00032	0,0068 %
Platin	0,00031	0,0065 %
Eisen	0,00018	0,0038 %

Nickel	0,00016	0,0033 %
Titan	0,00015	0,0032 %
Zirkonium	0,00012	0,0025 %
Kohlenstoffe	0,00004	0,0008 %
Molybdän	0,000027	0,0006 %
Palladium	0,000017	0,0004 %
Perfluorpolyether	0,000013	0,0003 %
Bor	0,000013	0,0003 %
Kupfer	0,000013	0,0003 %
Silizium	0,00001	0,0002 %
Sauerstoff	0,00001	0,0002 %
TiO2	0,0000067	0,0001 %
Wolfram	0,0000067	0,0001 %
Vanadin	0,0000067	0,0001 %
Perfluorpolyoxyalkane	0,000005	0,0001 %
Summe	4,74	100 %

[Prakash et al. 2016]

Tabelle 90: Eingabe- und Ausgabedaten für die Herstellung der 2,5"-HDD

Komponente	Material	Gewicht (kg)	An-teil	Ausgabe		
Gehäuse: Unterer Deckel	Aluminium	6,72E-02	44,8 %	Produkt	1	2,5"-Festplatte (2 Medien)
Festplattenmedien (2 Stück)	glas-basierte Medium	9,48E-03	6,32 %	Luftemissionen		
Gehäuse: Oberer Deckel	Stahl	2,16E-02	14,4 %	Schwefelhexafluorid (SF ₆)	5,99E-09	kg
Schwingspulenbetätiger für Neodym-Magnete	Stahl	1,34E-02	8,90 %	Tetrafluormethan (CF ₄)	1,94E-09	kg
Motor	Stahl	5,25E-03	3,50 %	Stickstofftrifluorid (NF ₃)	1,95E-09	kg
Bestückte Leiterplatte (40 cm ²)	Epoxidharz; Kupfer; sowie diverse elektronische Komponenten	1,30E-02	8,68 %	Perfluorpentan	2,49E-04	kg
Neodym-Magnete (2 Stück)	Neodym-Eisen-Bor (NIB) Magnet	3,90E-03	2,60 %	VOC	6,07E-04	kg
Aluminium-Teile zwischen Platten	Aluminium	3,45E-03	2,30 %	Abfälle		

Lese-/Schreibköpfe	Aluminium	1,95E-03	1,30 %	gefährliche Abfälle	2,66E-02	kg
Motorringe	Aluminium	1,80E-03	1,20 %	unspezifische Abfälle	2,33E-02	kg
Spulenring vom Motor	Stahl	1,50E-03	1,00 %			
Schrauben (23 Stück)	Stahl	1,50E-03	1,00 %	Abwasser	2,38E+00	Liter
Kugellagerzylinder	Stahl	1,20E-03	0,80 %			
Metallring des Spindel-motors	Stahl	1,20E-03	0,80 %			
Kupferdrähte	Kupfer	7,50E-04	0,50 %			
Kupferspule	Kupfer	7,50E-04	0,50 %			
Magnetschicht (Magnetring) des Spindel-motors	Sintermetall-magnet	4,50E-04	0,30 %			
Flexible Leiterplatte mit Stecker (4,6 cm ²)	Diverse	4,50E-04	0,30 %			
Schutzfolie; Anti-Staub; Gummi-Ringe; Plastik-Teil zur Befestigung; Schutzschicht; Klebstoffe; etc.	Cut-off	1,20E-03	0,80 %			
Summe		0,150	100 %			
Produktionsaufwand						
	Strom (Malaysia)	6,02E+00 (abgeschätzt 2/3 von 3,5"-HDD)	kWh			
	Erdgas	6,02E-02	kWh			
	Diesel	6,60E-04	kWh			
	Benzin	3,97E-06	kWh			
	Flüssiggas	2,03E-03	kWh			
	Propan	3,10E-03	kWh			
	Heizöl	1,18E-03	kWh			
	Wasser	1,18E+01	Liter			
	Isopropylalkohol	1,24E-04	kg			
	Perfluorpentan	2,48E-04	kg			

Emissionen ins Wasser und in den Boden wurden nicht aufgelistet, da sie für die vorliegende Studie irrelevant sind.

8.5 Annahmen über die geplante Lebensdauern

Tabelle 91: Geplante Lebensdauer der IT und Gebäudetechnik

Angenommene geplante Lebensdauer	Vorgabewerte für die Lebensdauer in Jahr	Quelle
Rack Server	3	eigene Annahme
Blade Server Module u. Blade System Gehäuse	3	
Datenspeichersystem	3	
Switch	3	[Mahadevan et al. 2010]
USV-Anlage (> 10 kVA)	12	USV-Anlage (10,1 bis 200 kVA) [Boulos et al. 2014]
USV-Anlage (≤ 10 kVA)	8	USV-Anlage (1,5 bis 5 kVA) [Boulos et al. 2014]
Batterie für USV-Anlage (> 10 kVA)	6	[Boulos et al. 2014]
Batterie für USV-Anlage (≤ 10 kVA)	4	[Boulos et al. 2014]

Eigene.

8.6 Daten aus den Fallstudien

Tabelle 92: Daten der Fallstudien: Server

Alle Server	Einheit	RZ1	RZ2	RZ3
Anzahl Server	[Stück]	432	88	95
Anzahl Rack Server	[Stück]	362	88	95
Anzahl Blade Server Module	[Stück]	70	0	0
Höheneinheiten Rack Server	[HE]	583	127	195
Gewicht (ohne Verpackung)	[kg]	6.659	1.894	2.282
Rechenkapazität pro Sekunde	[SPECint_rate-Ops]	122.682	11.398	69.895
Rechenkapazität pro Jahr	[Mrd. SPECint_rate-Opa]	3.868,88	359,45	2.204,22
Anzahl CPU	[Stück]	627	100	193
Auslastung CPU	[%]	5,00	13,80	3,76
Rechenleistung pro Jahr	[Mrd. SPECint_rate-Opa]	193,44	49,60	82,81
Anzahl RAM-Module	[Stück]	1.728	536	1.238
Anzahl Festplatten	[Stück]	866	198	221
Anzahl 3,5" HDDs	[Stück]	674	70	0
Anzahl 2,5" HDDs	[Stück]	192	114	221
Anzahl SSDs	[Stück]	0	14	0
mittlere el. Leistung	[kW _{el}]	47,8	26,5	43,9
ADP Server	[kg Sb.eq.]	81	24	42
KEA Server	[MJ]	5.579.552	2.731.099	4.281.974

THG Server	[kg CO ₂ eq.]	335.493	161.126	253.762
Wasserverbrauch Server	[l]	608.969	252.531	417.411

Eigene.

Tabelle 93: Daten der Fallstudien: Datenspeichersysteme

Externe Datenspeichersysteme	Einheit	RZ1	RZ2	RZ3
Anzahl Datenspeichersysteme	[Stück]	31	19	24
Anzahl Controller Enclosure	[Stück]	31	22	26
Anzahl Array Enclosure	[Stück]	33	0	0
Gewicht Datenspeichersysteme	[kg]	1.131	626	684
Gewicht Controller Enclosure	[kg]	600	626	684
Gewicht Disk Array Enclosure	[kg]	531,3	0,0	0,0
Anzahl Festplatten Datenspeichersysteme	[Stück]	966	330	504
Anzahl 3,5" HDDs Datenspeichersysteme	[Stück]	526	148	44
Anzahl 2,5" HDDs Datenspeichersysteme	[Stück]	424	180	460
Anzahl SSD Datenspeichersysteme	[Stück]	16	2	0
Kapazität Festplatten Datenspeichersysteme	[GB]	2.083.520	394.832	340.200
Kapazität pro Festplatte	[GB/Stück]	2.157	1.196	675
belegter Speicherplatz Datenspeichersysteme	[GB]	947.499	198.976	197.316
mittlere el. Leistung Datenspeichersysteme	[kW _{el}]	22,0	8,5	6,4
ADP Datenspeichersysteme	[kg Sb. eq.]	31,9	10,4	13,3
KEA Datenspeichersysteme	[MJ]	2315.676	882.475	710.876
THG Datenspeichersysteme	[kg CO ₂ eq.]	136.995	52.133	42.557
Wasserverbrauch Datenspeichersysteme	[l]	213.052	79.434	69.387

Eigene.

Tabelle 94: Daten der Fallstudien: Netzwerkgeräte

Netzwerkgeräte	Einheit	RZ1	RZ2	RZ3
Anzahl Netzwerkgeräte	[Stück]	56	57	38
Gewicht Netzwerkgeräte	[kg]	740	295	399
mittlere el. Leistungsaufnahme Netzwerkgeräte	[kW _{el}]	10,5	4,1	8,9
ADP Netzwerkgeräte	[kg Sb. eq.]	9,9	3,5	8,7
KEA Netzwerkgeräte	[MJ]	1.083.167	413.362	852.292
THG Netzwerkgeräte	[kg CO ₂ eq.]	63.776	24.301	50.310
Wasserverbrauch Netzwerkgeräte	[l]	98.672	37.084	79.623

Eigene.

Tabelle 95: Daten der Fallstudien: Gebäudetechnik

Gebäudetechnik	Einheit	RZ1	RZ2	RZ3
Anzahl USV-Anlagen	[Stück]	4	4	2
Gewicht USV-Anlagen (ohne Verpackung)	[kg]	1141	684	1680
Nutzungsdauer USV-Anlagen	[a]	12	14	12
Anzahl Batterien	[Stück]	4	72	2
Gewicht Batterien (ohne Verpackung)	[kg]	1038	440	1794
Nutzungsdauer Batterien	[a]	6,4	13,70	6,0
ADP Gebäudetechnik	[kg Sb. eq.]	20,5	11,7	29,9
KEA Gebäudetechnik	[MJ]	2.235.784	1.711.476	2.700.788
THG Gebäudetechnik	[kg CO ₂ eq.]	154.657	103.354	158.097
Wasserverbrauch Gebäudetechnik	[l]	187.122	142.307	226.818

Eigene.

Tabelle 96: Daten der Fallstudien: Effektive Nutzungsdauer der Anlagen

Nutzungsdauern	Einheit	RZ1	RZ2	RZ3
Server	[a]	4,0	7,9	4,2
Datenspeichersysteme	[a]	4,4	5,7	3,4
Netzwerkgeräte	[kg/Stück]	5,5	9,9	3,0
USV-Anlagen	[a]	12,0	14,1	12,0
Batterien	[a]	6,4	13,7	6,0

Eigene.

Tabelle 97: Daten der Fallstudien: Betriebsmittel

Betriebsmittel	Einheit	RZ1	RZ2	RZ3
Stromverbrauch	[kWhel]	901.282	490.939	716.203
Gebäudetechnik	[kWhel]	197.072	151.715	237.299
IT	[kWhel]	704.210	339.224	478.904
Server	[kWhel]	419.865	229.839	351.798
Speicher	[kWhel]	192.470	74.039	55.800
Netzwerk	[kWhel]	91.875	35.346	71.306
el. Leistungsaufnahme	[kWel]	102,9	56,0	81,8
Gebäudetechnik	[kWel]	22,5	17,3	27,1
IT	[kWel]	80,4	38,7	54,7
Server	[kWel]	47,9	26,2	40,2
Speicher	[kWel]	22,0	8,5	6,4
Netzwerk	[kWel]	10,5	4,0	8,1
Kältemittelverluste (Leckagerate)	[kg]	15,9	1,6	0

Wasserverbrauch	[l]	0	0	0
Diesel	[l]	0	0	0
Erdgas	[m ³]	0	0	0

Eigene.