

Abschlussbericht Verbundprojekt TEMPRO

Total Energy Management for Professional Data Center

Ganzheitliches Energiemanagement in professionellen Rechenzentren



<u>Zuwendungsempfänger:</u> Carl von Ossietzky Universität Oldenburg Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit TUHH - Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft BTC IT Services Zweckverband Kommunale Datenverarbeitung Oldenburg (KDO) b.r.m. business resource management dc-ce Berlin-Brandenburg GmbH MAIREC Edelmetallgesellschaft mbH	<u>Förderkennzeichen:</u> FKZ03ET1418A FKZ03ET1418B FKZ03ET1418C FKZ03ET1418D FKZ03ET1418E FKZ03ET1418F FKZ03ET1418G FKZ03ET1418H
<u>Gefördert durch:</u> Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, 6. Energieforschungsprogramm	
<u>Laufzeit des Vorhabens:</u> 01.11.2016-31.10.2019	
<u>Autor*innen:</u> Alexandra Pehlken (koordinierend), Ralph Hintemann, Fernando Penaherrera, Volkan Gizli, Karsten Hurrelmann, Simon Hinterholzer, Kerstin Kuchta, Arina Kosheleva, Hans Kaiser, Fridtjof Chwoyka, Gerald Kielmann, Hansjürgen Wilde, Steffen Leukroth, Dirk Frerichs, Anton Daumlechner	

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

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhalt

Abbildungsverzeichnis.....	4
Tabellenverzeichnis.....	7
I. Kurzdarstellung.....	8
1. Aufgabenstellung.....	8
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	9
3. Planung und Ablauf des Vorhabens	10
4. Wissenschaftlichem und technischem Stand, an den angeknüpft wurde	11
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	12
II. Ausführliche Darstellung	13
1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	14
AP1. Energiebedarf, Ressourcenstock und Rohstoff-, bzw. Energieeffizienz in Rechenzentren ..	14
AP1.1: Entwicklung einer Typologie der ressourcenrelevanten Gerätecluster zur Erhebung des Energie- und Ressourcenbedarfs.....	14
AP1.2: Ermittlung des Energiebedarfs der Gerätecluster und Abgleich mit den Daten der Projektpartner	22
AP1.3: Ermittlung des Ressourcenstocks der Gerätecluster	28
AP2. Wechselwirkungen und gegenseitigen Abhängigkeiten von Rohstoff- und Energieeffizienz	39
AP2.1: Evaluierung geeigneter Modellierungssprachen und Tools für die Lebenszyklusbetrachtung	39
AP2.2: Analyse, Bewertung und Auswahl geeigneter Geräte und Anlagen für die cradle-to-grave- Betrachtung	41
AP2.3: Cradle-to-grave-Analyse der ausgewählten Geräte und Anlagen	43
AP2.4: Analyse von Konzepten zur kaskadierenden Nutzung von IKT-Geräten in Rechenzentren zur Erreichung maximaler Energieeffizienz.....	50
AP3. Informations- und Bewertungsmodelle für die Energieeffizienz in Rechenzentren.....	57
AP3.1: Bestandsaufnahme genutzter Kennzahlen und Indikatoren in Rechenzentren und Entwicklung von Kennzahlen zur grauen Energie und zum Ressourcenstock von Rechenzentren	58
AP3.2: Erstellung eines prototypischen Softwaretools zur Erstbewertung der Energieeffizienz von Rechenzentren inkl. Feldtest.....	66

AP3.3: Entwicklung eines Konzeptes und einer prototypischen Implementierung zur outputorientierten Darstellung und Steigerung der Energieeffizienz eines Rechenzentrums (Sollzustand)	78
AP4 Aktuelle technologische Potenziale zur Steigerung der Energieeffizienz von Rechenzentren	94
AP4.1: Entwicklung eines Analyserasters	95
AP4.2: Identifizierung und Dokumentation ressourcenrelevanter technologischer Entwicklungen in Rechenzentren.....	97
AP4.3: Bewertung der ressourcenrelevanten technologischen Entwicklungen und Bestimmung der für die Umsetzung in TEMPRO geeigneten Technologien	98
AP5 Entwicklung, Erprobung und prototypische Umsetzung erfolgversprechender Effizienztechnologien	104
AP5.1: Effiziente Kühlung	107
AP5.2: Effiziente Cloud	118
AP5.3: Störfall	127
Literaturverzeichnis	138
2. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	149
3. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	150
4. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses	151

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schema des ressourcenrelevanten Geräteclusters mit Fokus auf das definierte IT-System.	21
Abbildung 2: Energiebedarf der Server und Rechenzentren in Deutschland in den Jahren 2010 bis 2018. Quelle: Hintemann (2019a).....	23
Abbildung 3: Entwicklung des Energiebedarfs der Rechenzentren in Deutschland mit Anteil Cloud- Rechenzentren in den Jahren 2010 bis 2018 und Prognose bis 2025)	25
Abbildung 4: Server von Rechenzentrum (links) und verschiedene kombinierte Komponenten (rechts).	29
Abbildung 5: Serverhauptplatinen (Motherboards) Abbildung 6: Serversteckplatinen	30
Abbildung 7: Festplatten-/Laufwerkplatinen Abbildung 8: RAM und CPUs	30
Abbildung 9: Rückwände Abbildung 10: Netzteilplatinen	30
Abbildung 11: 'Minderwertige' Leiterplatten vor (links) und nach (rechts) dem Schneiden.....	31
Abbildung 12: Zerkleinerungsfraktion auf 4 mm (links) und 2 mm (rechts).	31
Abbildung 13: Anteil Edelmetalle in Serverkomponenten.....	33
Abbildung 14: Anteil Basisstoffe in Serverkomponenten	34
Abbildung 15: Anteil seltenen Erden in Serverkomponenten.....	35
Abbildung 16. Unterschied von Daten der Ergebnisse aus TEMPRO mit den vorhandenen Daten aus Literatur für Serverhauptplatinen.	37
Abbildung 17. Unterschied von Daten zwischen den Ergebnissen von TEMPRO und den vorhandenen Daten aus Literatur für RAM/CPU.	38
Abbildung 18. Diagramm des Datenfluss für die Lebenszyklusanalyse für RZ und Komponenten.....	41
Abbildung 19: Komponenten eines PRZ. Quelle: Szczepaniak und Hobohm (2017).....	43
Abbildung 20: Treibhausemissionen (GWP-kg _{CO2-eq}) der untersuchten Materialien pro Kilogramm. Logarithmische farbige Skalierung.	45
Abbildung 21: Kumulierter Energieaufwand (MJ _{eq}). der Stücke pro Referenz Einheit nach Kategorien. Logarithmische Skalierung.	46
Abbildung 22: Abiotischer Ressourcenverbrauch (kg _{Sb-eq}) pro Kilogramm für unterschiedliche Teilekategorien pro Referenz Einhielt.....	47
Abbildung 23: Kumulierter Energieaufwand für die Geräte (MJ _{eq}). Logarithmische Skalierung.	48
Abbildung 24: Normierter kumulierter Energieaufwand der Geräte (MJ _{eq} /kg). Logarithmische Skalierung.	48
Abbildung 25: LCIA Ergebnisse für ausgewählte Kategorien für die IT-System.	49
Abbildung 26: Gesamte Ergebnisse für die Fallstudie. (MDP = Metal Depletion Potential).....	49
Abbildung 27: Goldkonzentration in den verschiedenen Systemen und Subsystemen des modellierten Rechenzentrums.....	50
Abbildung 28. Recycling-Prozess eines EOL-Produkts (European Commission 2010).	50
Abbildung 29. Schematische Darstellung der modellierten metallurgischen Anlage für das Recycling von WEEE (Bigum et al. 2012).	51
Abbildung 30. LCA Model für EOL.	52
Abbildung 31. Ergebnisse der Analyse von Recycling-Szenarien.	52
Abbildung 32. Ressourcenverbrauch für verschiedene Recyclingraten.....	53
Abbildung 33: Auswirkungen einer Leiterplatte (1 Kilogramm) und die möglichen Einsparungen für ausgewählte Kategorien.....	55
Abbildung 34: SQL Datenbank Entity Relationship Diagram (ERD).	56

Abbildung 35: Datenbanken Verbindung und Datenfluss.....	56
Abbildung 36: CPU-Auslastung für unterschiedliche Serversysteme bei gleicher Last.....	62
Abbildung 37: Messergebnisse zur durchschnittlichen CPU-Auslastung für unterschiedliche Serversysteme	63
Abbildung 38: Berechnete Arbeit der Server (W_{Server}) für identische Lastsimulation mit Hilfe des SPECpower-Benchmarks	64
Abbildung 39: Berechnete Arbeit der Server (W_{Server}) für identische Lastsimulation mit Hilfe der Benchmarks SPECpower, LINPACK und Sysbench (normiert, Mittelwert = 100).....	65
Abbildung 40: Value Proposition Canvas (Quelle: Fichter, K., Hurrelmann, K, Seela, A. (2017) nach Osterwalder et al. (2015)).	68
Abbildung 41: Startseite Erbet auf Smartphone und Personal Computer - Erbet unterstützt responsive Design.....	71
Abbildung 42: Die Startseite von Erbet mit der Abfrage der wichtigen Eckdaten des Rechenzentrums	72
Abbildung 43: Ergebnisseite Erbet - oberer Teil: Daten eines vergleichbaren Rechenzentrums	73
Abbildung 44: Ergebnisseite Erbet unterer Teil: Weitere Eingabemöglichkeiten und Ergebnisdarstellung eigenes Rechenzentrum.....	74
Abbildung 45: Online-Befragung zu Erbet – Ergebnisse der Fragen 1 bis 3	76
Abbildung 46: Ausschnitt Vorprototyp (Excel)	79
Abbildung 47: Ausschnitt - Mockup - 1	80
Abbildung 48: Ausschnitt - Mockup - 2	80
Abbildung 49: Ausschnitt - Mockup - 3	80
Abbildung 50: Ausschnitt - ESteig.....	82
Abbildung 51: ESteig - Auswahlmaske	86
Abbildung 52: ESteig – Datenaufnahme – Allgemein.....	86
Abbildung 53: ESteig – Datenaufnahme – Energieverbrauch	87
Abbildung 54: ESteig – Datenaufnahme – Wasserverbrauch	87
Abbildung 55: ESteig – Datenaufnahme – Klimatisierung.....	87
Abbildung 56: ESteig – Datenaufnahme – USV	88
Abbildung 57: ESteig – Diagramm zur Darstellung der KPIs.....	90
Abbildung 58: ESteig – Ausgewählte KPIs	91
Abbildung 59: Schematische Darstellung des Borderstep Technologieradars für Rechenzentren	96
Abbildung 60: Technologieradar für Kühlung und Klimatisierung	99
Abbildung 61: Technologieradar für Energieversorgung und -erzeugung.....	101
Abbildung 62: Technologieradar für IT und IT-Management.....	102
Abbildung 63: Innovationsworkshop zu AP 5.1 auf der Future Thinking 2018	106
Abbildung 64: Prüfstand.....	107
Abbildung 65: Planungsentwurf - Prüfstand für die Kontrolle der Zuluftführung zu den Servern	108
Abbildung 66: Prinzipdarstellung der Umluftregelung über Serverdaten	109
Abbildung 67: Charakteristische CPU-Temperaturverläufe aller Server.....	110
Abbildung 68: Messergebnisse für Server 29. CPU-Temperaturen über CPU-Auslastung.	110
Abbildung 69: Beispiel der Regelwertermittlung.	111
Abbildung 70: Temperaturverläufe (links) und Fehlerabweichung (rechts) bei sprunghafter Änderung von 0 % zu 50 % CPU-Auslastung	112

Abbildung 71: Stationäre Verlaufszeiten aller Server für jeweils zwei Belastungs- und Entlastungsvorgänge.....	112
Abbildung 72: Modellierung der Temperaturcharakteristik aus Messdaten unter Realbedingungen.	113
Abbildung 73: Bestimmtheitsmaß über maximale Standardabweichung des Moving-Average der CPU-Temperatur.....	113
Abbildung 74: Beispiele des Servermodells in CCM+	114
Abbildung 75: Gemessene Leistung, el. (power usage), Ventilator Drehzahl (fan speed) und Durchfluss (flow rate) der untersuchten Server in Abhängigkeit von der CPU-Auslastung (CPU usage)	114
Abbildung 76: Leistungsaufnahme der einzelnen Mainboard-Ventilatoren.....	115
Abbildung 77: Alle Konfigurationen der Bodenplatte	115
Abbildung 78: Simulierte Strömungsgeschwindigkeiten im Kaltgang (seitlicher Schnitt).	116
Abbildung 79: Einfluss der Bodenplatten auf die vertikale Druckverteilung.	116
Abbildung 80 Relative Server-Lüfterleistung der Server 1-40. Symbole: Experimente, Linien: Simulationen	117
Abbildung 81: Änderung der summierten Server-Ventilatorleistung für das gesamte Rack bei den untersuchten Varianten.	117
Abbildung 82: Anwendungsszenario „Data Analytics und Machine Learning mit Tensorflow“	119
Abbildung 83: Testumgebung bei BTC (112 Cores, 2 TB RAM, 25 TB SSD/Flash, mehr als 1.000 virtuelle CPUs)	120
Abbildung 84: Container Ökosystem.....	121
Abbildung 85: Aufbau des Proof of Concept für die RedHat Openshift Lösung	122
Abbildung 86: Status eines Test-Clusters	123
Abbildung 87: System im Normalzustand (2 Nodes aktiv).....	126
Abbildung 88: System unter Last (5 Nodes aktiv)	126
Abbildung 89: Neuer Ansatz eines vollständig modularen IT-Managementsystems bei KDO	128
Abbildung 90: Beispielhafte Darstellung der Strategien „VMs in die Nähe der Kühlanlagen verschieben“ (links) und „Abschaltung von nicht-priorisierten VMs / Hosts“ (rechts).....	129
Abbildung 91: Schematische Darstellung Rechenzentrum KDO mit Koordinatensystem	130
Abbildung 92: Sensorerweiterung.....	131
Abbildung 93: Serverrack mit Unterbodenbelüftung in der KDO	132
Abbildung 94: Abdichtungsversuche mit (v. l. n. r) Brett, Brett mit Schaumstoffummantelung, Brett mit Schaumstoffummantelung und zusätzlich erschwert.....	132
Abbildung 95: Exemplarische Messauswertung.....	133
Abbildung 96: Schematische Darstellung der priorisierten Abschaltung.....	135
Abbildung 97: Schematische Darstellung der Verschiebung in Richtung intakter Kühlung.....	135
Abbildung 98: Recovery-Verfahren	136
Abbildung 99: schematische Darstellung IPMI-Anbindung.....	137

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Abkürzungsverzeichnis	13
Tabelle 2: Chemische Elemente	13
Tabelle 3: Übersicht AP 1	14
Tabelle 4: Liste der Kritischen Rohstoffe für die EU 2017 mit Anwendungsbereichen und Einsatz in Rechenzentren (European Commission 2017a, 2017c, 2017b)	15
Tabelle 5: Kategorisierungsmöglichkeiten von Rechenzentren	16
Tabelle 6: Größenkategorie von Rechenzentren nach Serveranzahl (Hintemann et al. 2010; Hobohm et al. 2014).....	17
Tabelle 7: Rohstoffliche Zusammensetzung von Hauptplatinen, Steckkarten, Speichermodule, HDD-Platinen, CPUs und Netzteilplatinen, Daten des IUE, ergänzt durch Daten des Borderstep-Instituts (B) und eigene Annahmen (EA) (Hintemann et al. 2010; Hobohm et al. 2014)	18
Tabelle 8: Zerlegte-Fractionen vom Serverschrott	28
Tabelle 9: Metallgehalte der Bauteile der erhaltenen Servern.....	32
Tabelle 10: CO2 Einsparpotential für ausgewählte Elementen.	37
Tabelle 11: Übersicht AP 2	39
Tabelle 12: LCA Indikatoren für Ressourcenverbrauch.....	43
Tabelle 13: Übersicht AP 3	57
Tabelle 14: Übersicht über energieorientierte Kennzahlen für Rechenzentren	59
Tabelle 15: Serverkonfiguration für Evaluierung	60
Tabelle 16: Verbesserungsvorschläge in Anwenderinterviews und Umsetzung.	77
Tabelle 17: ESteig - Datenerfassung.....	81
Tabelle 18: ESteig - Kennzahlenauswahl	82
Tabelle 19: ESteig - Vergabekriterien des Zertifikats „Energieeffizienter Rechenzentrumsbetrieb (DE-UZ 161)“.....	84
Tabelle 20: Übersicht AP 4	94
Tabelle 21: Übersicht AP 5	104
Tabelle 22: Prüfstandsdaten.....	108
Tabelle 23: Serverhardware.	108

I. Kurzdarstellung

1. Aufgabenstellung

Das übergeordnete Ziel des Vorhabens ist die **ganzheitliche Steigerung der Energie- und Rohstoffeffizienz** von Rechenzentren in Deutschland unter Berücksichtigung vor- und nachgelagerter Wertschöpfungsstufen. Wir nehmen damit deutlichen Bezug zum ersten Ziel der Energieforschungspolitik im 6. Energieforschungsprogramm und leisten einen Beitrag zur Erfüllung der zahlreichen energiewirtschaftlichen und klimapolitischen Vorgaben der Bundesregierung. Zur Operationalisierung des übergeordneten Ziels wurden gemäß den oben dargestellten Zusammenhängen zwei Hauptziele für das Vorhaben formuliert:

1. **Schaffung einer Bewertungsgrundlage für die ganzheitliche Energie- und Rohstoffeffizienz von Rechenzentren.**
2. **Erforschung und Entwicklung neuer Effizienztechnologien in Rechenzentren, die zu erheblichen Energieeinsparungen führt.**

Das Vorhaben grenzt sich von bisherigen Ansätzen und Bemühungen zur Steigerung der Energieeffizienz von Rechenzentren durch drei Besonderheiten ab:

1. Zum ersten werden bei der Suche, Bewertung und Umsetzung von Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz von Rechenzentren neben den direkten Energieverbräuchen vor Ort (Stromverbräuche durch Server, Klimatisierung, etc.) auch die indirekten Energieverbräuche mit betrachtet. Das Vorhaben bezieht damit erstmalig systematisch die in den IKT-Geräten (Server, etc.) und der Rechenzentrumsinfrastruktur (Klimaanlagen, etc.) gebundene „graue Energie“ der Herstellungs-, Transport-, Lagerungs- und Entsorgungsphase in die Optimierung mit ein. Dies ist das erste Mal überhaupt in der Geschichte von Rechenzentren, dass dies umgesetzt wird.
2. Zum zweiten werden bei der ganzheitlichen Analyse und Optimierung der Energieeffizienz von Rechenzentren auch erstmalig Aspekte der Rohstoffeffizienz berücksichtigt, da diese in einem engen Wechselspiel mit der Energieeffizienz stehen. Zudem wird die materialbezogene Optimierung entlang des Produktlebenszyklus der IKT-Geräte (von der Rohstoffgewinnung bis zum Recycling) stärker mehr zur Voraussetzung für die Erschließung systemweiter Energie- und Rohstoffeffizienzpotenziale.
3. Zum dritten werden neue Effizienztechnologien direkt von den Anwendern entwickelt und nicht – wie sonst üblich – in den Labors von Forschungseinrichtungen und Herstellern.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Voraussetzung für das Vorhaben war ein ganzheitlicher Ansatz, der über den Betrieb eines Rechenzentrums hinaus ging. Es wurden daher folgende Arbeitsziele definiert, die innerhalb der Laufzeit bearbeitet wurden:

Arbeitsziel 1: Erhebung des Energiebedarfs, des Ressourcenstocks und der Rohstoffeffizienz in Rechenzentren

Arbeitsziel 2: Analyse von Wechselwirkungen und gegenseitigen Abhängigkeiten von Rohstoff- und Energieeffizienz

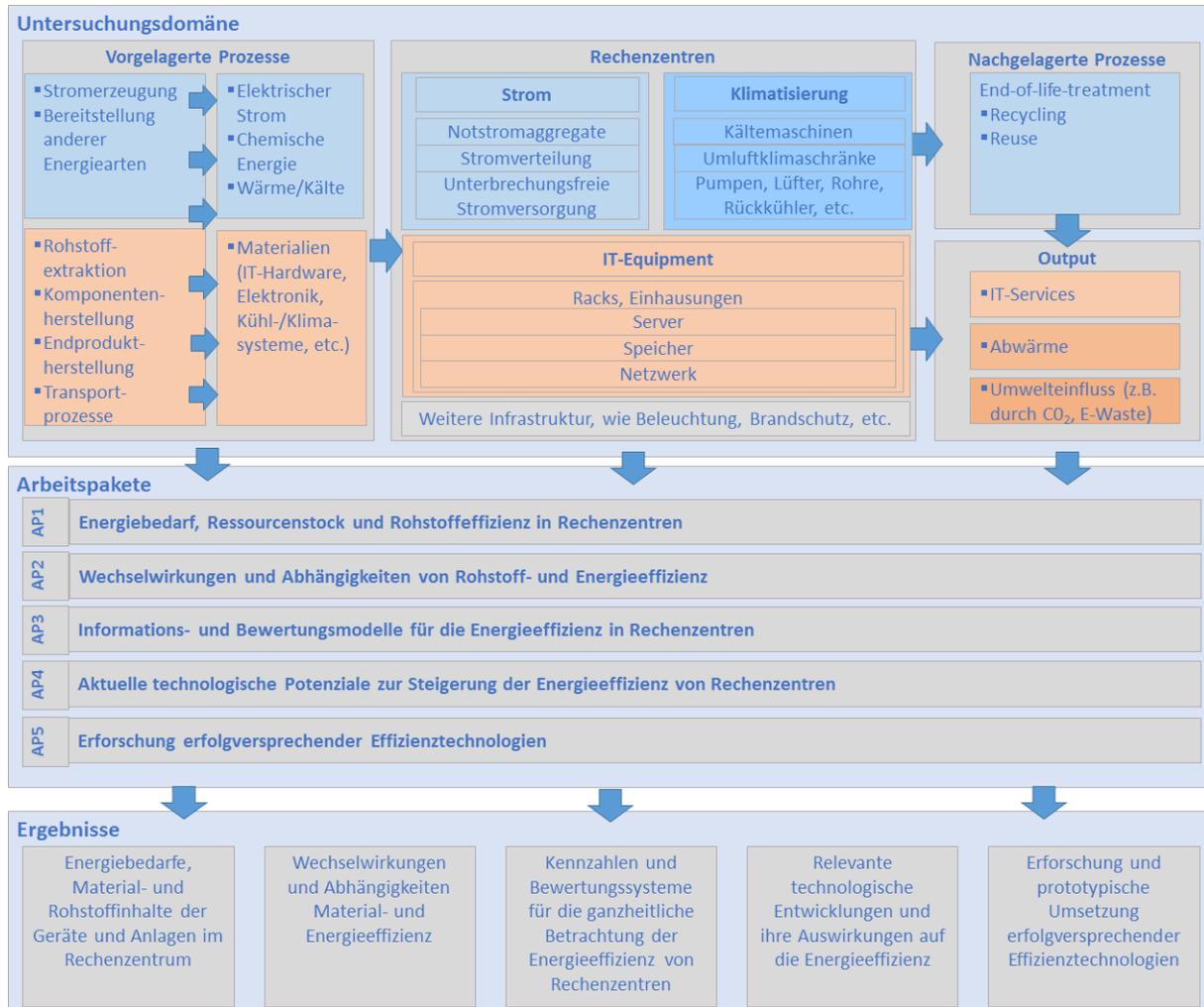
Arbeitsziel 3: Entwicklung eines Systems für eine ganzheitliche Bewertung der Energie- und Rohstoffeffizienz von Rechenzentren

Arbeitsziel 4: Analyse und Bewertung relevanter aktueller technologischer Entwicklungen hinsichtlich der Energieeffizienz von Rechenzentren.

Arbeitsziel 5: Entwicklung, Erprobung und prototypische Umsetzung erfolgversprechender Effizienztechnologien

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde in fünf Arbeitspakete über 36 Monate aufgeteilt, die sich an den unter 2. genannten Arbeitszielen orientieren:



4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Wie eine Reihe von Studien ermittelt haben, sind die ca. 50.000 Rechenzentren mit mehr als 10 TWh für knapp 2% des Strombedarfs in Deutschland verantwortlich¹². Die steigenden Energiebedarfe von Rechenzentren wurden in zahlreichen Studien nicht nur für Deutschland³, sondern auch für Europa⁴, sowie weltweit⁵ dokumentiert. Ein Grund hierfür ist insbesondere der stark steigende Bedarf, große Datenmengen zu speichern und zu verarbeiten. Wurde für das Jahr 2005 der Anteil des Energiebedarfs der Speichersysteme am Gesamtbedarf noch mit ca. 5% kalkuliert⁶, so wird für das Jahr 2011 bereits ein Anteil von 17% angenommen. Bei den im Konsortium beteiligten Rechenzentrumsbetreibern liegt der Energiebedarf der Speichersysteme aktuell bereits in der Größenordnung des Serverstromverbrauches und damit bei ca. 30% des Gesamtstrombedarfs.

Der steigende Energiebedarf der Rechenzentren stellt eine Herausforderung bei Erreichung der Klimaschutzziele sowie der Realisierung der Energiewende dar. Verstärkt wird diese Herausforderung noch durch zwei Aspekte. Zum einen ist insbesondere im Bereich der IKT-Produkte mit ihren sehr kurzen Lebenszyklen nicht nur der Energiebedarf in der Nutzungsphase relevant. Auch die sogenannte graue Energie – also die Energie, die für Herstellung, Transport, Lagerung und Entsorgung der Komponenten benötigt wird – kann ganz erhebliche Anteile am Gesamtenergiebedarf ausmachen⁷. Dieser Aspekt gewinnt zunehmend an Bedeutung, da die Materialintensität der Rechenzentren steigt. Verbunden mit einem deutlichen Trend zu größeren Rechenzentren ist ein erheblicher Zuwachs von IT-Infrastrukturen wie Server, Speicher und Netzwerkkomponenten zu verzeichnen. Allein die Zahl der Server hat zwischen 2010 und 2014 um 28% zugenommen⁸. Zum zweiten bieten insbesondere Rechenzentren vielfältige Möglichkeiten, in die Energienetze der Zukunft integriert zu werden, wie z.B. Abwärmenutzung, Bereitstellung von Regelenergie durch Notstromaggregate, Demand Side Management, etc. [18]. Diese Möglichkeiten werden jedoch bis heute praktisch nicht genutzt.

Viele Rechenzentren haben bisher kaum angefangen, Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz zu **implementieren**. Dass diese Potenziale nicht realisiert werden, hat vor allem zwei Ursachen:

¹ TU Berlin IZE, „Konzeptstudie zur Energie- und Ressourceneffizienz im Betrieb von Rechenzentren. Studie zur Erfassung und Bewertung von innovativen Konzepten im Bereich der Anlagen-, Gebäude und Systemtechnik bei Rechenzentren“, TU Berlin - Innovationszentrum Energie (IZE), Berlin, 2008.

² L. Stobbe, N. Nissen, M. Proske, A. Middendorf, B. Schlomann, M. Friedewald, P. Georgieff, und T. Leimbach, „Abschätzung des Energiebedarfs der weiteren Entwicklung der Informationsgesellschaft“, Fraunhofer IZM, Berlin, Karlsruhe, Abschlussbericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie D 4 – 02 08 15 – 43/08, 2009

³ R. Hintemann, „The Future of Data Center Energy Demand – The Impact of the Changing Structure of Data Centers“, Borderstep, Berlin, 2014

⁴ S. Prakash, Y. Baron, L. Ran, M. Proske, und A. Schlösser, „Study on the practical application of the new framework methodology for measuring the environmental impact of ICT - cost/benefit analysis“, European Commission, Brussels, Studie, 2014.

⁵ G. Cook, T. Dowdall, D. Pomerantz, und Y. Wang, „Clicking clean: how companies are creating the green internet“, Greenpeace Inc., Washington, DC, 2014.

⁶ J. G. Koomey, „Worldwide electricity used in data centers“, Environ. Res. Lett., Bd. 3, Nr. 3, S. 034008, 2008.

⁷ K. Fichter und R. Hintemann, „Beyond Energy. The Quantities of Materials Present in the Equipment of Data Centers“, *J. Ind. Ecol.*, Bd. 18, Nr. 6, S. 846–858, 2014.

⁸ R. Hintemann, „Rechenzentren als Standortfaktor“, Computerwoche, 29-Jan-2015. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.computerwoche.de/a/rechenzentren-als-standortfaktor,3092946>. [Zugegriffen: 10-Feb-2015]

- Zum ersten fehlt es an Kriterien, Vergleichsmaßstäben und Hilfestellungen für die Identifizierung von Energieeffizienzpotenzialen in Rechenzentren. Aktuell existieren nur wenige praktikable Kennzahlen, die allerdings immer nur Teilaspekte abdecken und sich kaum für einen Vergleich verschiedener Rechenzentren eignen. Die am häufigsten verwendete Kennzahl der „Power Usage Effectivness (PUE)“ hat beispielsweise den Nachteil, dass sie sich in der Regel verschlechtert, wenn die Effizienz der IT-Komponenten eines Rechenzentrums verbessert wird. D.h. obwohl sich der Energiebedarf insgesamt verringert, verschlechtert sich der PUE-Wert. Ein objektiver Maßstab zur ganzheitlichen Bewertung der Energieeffizienz eines Rechenzentrums inklusive der grauen Energie fehlt gänzlich.
- Zum zweiten werden vielfältige mögliche Potenziale zur Steigerung der Energieeffizienz nicht realisiert, weil die Entwicklung und der Einsatz neuer Technologien in Rechenzentren nicht ausreichend erfolgen. Grund hierfür sind vor allem die Befürchtungen der Rechenzentrumsbetreiber, dass diese neuen technologischen Ansätze nicht zuverlässig genug sind und damit ein Ausfall des Rechenzentrums riskiert wird.

Das im Folgenden dargestellte Vorhaben TEMPRO setzt genau an diesen Punkten an.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Projektstruktur/Arbeitsteilung/Zusammenarbeit:

Nr.	Institution	Typ	Arbeitsschwerpunkte
1	UOL-CCU (Koordinator)	FuE	AP 2
2	UOL-VLBA	FuE	AP 3
3	UOL-PIN	FuE	beteiligt AP 3, AP 4, AP5
4	TUHH	FuE	AP1 , beteiligt AP2
5	Borderstep	FuE	AP4 , beteiligt AP1, AP3, Koordination AP 5
6	BTC	Unternehmen	AP 5.2
7	KDO	Unternehmen	AP 5.3
8	b.r.m	Unternehmen/KMU	AP 3.2
9	dc-ce	Unternehmen/KMU	AP 5.1
10	Mairec	Unternehmen	beteiligt AP 1, AP 2
11	Assoziierter Partner CEWE	Unternehmen	beteiligt AP 2, AP 4, AP 5

II. Ausführliche Darstellung

Tabelle 1: Abkürzungsverzeichnis

ADP	Erschöpfung Abiotischer Ressourcen
CFD	Computational Fluid Dynamics
COP	Coefficient Of Performance
DB	Datenbank
EOL	End-of-Life
Erbet	Erstbewertungstool
ESteig	Energieeffizienzsteigerung
GWP	Erderwärmungspotenzial
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KExA	Kumulierter Exergieaufwand
LCA	Lebenszyklusanalyse
POC	Proof of Concept
RZ	Rechenzentren
SQL	Structured Query Language
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
WEEE	Elektro- und Elektronik-Altgeräte

Tabelle 2: Chemische Elemente

Li	Lithium	Zr	Zirkon	Tb	Terbium
Be	Beryllium	Nb	Niob	Dy	Dysprosium
Mg	Magnesium	Mo	Molybdän	Ho	Holmium
Al	Aluminium	Tc	Technetium	Er	Erbium
Ca	Calcium	Ru	Ruthenium	Tm	Thulium
Sc	Scandium	Rh	Rhodium	Yb	Ytterbium
Ti	Titan	Pd	Palladium	Lu	Lutetium
V	Vanadium	Ag	Silber (Argentum)	Hf	Hafnium
Cr	Chrom	Cd	Cadmium	Ta	Tantal
Mn	Mangan	In	Indium	W	Wolfram
Fe	Eisen	Sn	Zinn (Stannum)	Re	Rhenium
Co	Cobalt	Sb	Antimon (Stibium)	Os	Osmium
Ni	Nickel	Te	Tellur	Ir	Iridium
Cu	Kupfer	La	Lanthan	Pt	Platin
Zn	Zink	Ce	Cer	Au	Gold
Ga	Gallium	Pr	Praseodym	Hg	Quecksilber
Ge	Germanium	Nd	Neodym	Tl	Thallium
As	Arsen	Pm	Promethium	Pb	Blei
Se	Selen	Sm	Samarium	Bi	Bismut
Sr	Strontium	Eu	Europium	Th	Thorium
Y	Yttrium	Gd	Gadolinium	U	Uran

1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

AP1. Energiebedarf, Ressourcenstock und Rohstoff-, bzw. Energieeffizienz in Rechenzentren

Tabelle 3: Übersicht AP 1

Übersicht AP 1			
	Start: 1. Monat		Dauer: 21 Monate
Titel	Energiebedarf, Ressourcenstock und Rohstoff-, bzw. Energieeffizienz in Rechenzentren		
Zielsetzung	Erhebung des Energiebedarfs, des Ressourcenstocks und der Rohstoffeffizienz in Rechenzentren		
Federführender Partner	AP 1 gesamt: TUHH		
	AP 1.1: TUHH	AP 1.2: Borderstep	AP 1.3: TUHH
Unterarbeitspakete	<ul style="list-style-type: none"> ▪ AP 1.1: Entwicklung einer Typologie der ressourcenrelevanten Gerätecluster zur Erhebung des Energie- und Ressourcenbedarfs (TUHH, Borderstep) ▪ AP 1.2: Ermittlung des Energiebedarfs der Gerätecluster und Abgleich mit den Daten der Projektpartner (Borderstep) ▪ AP 1.3: Ermittlung des Ressourcenstocks durch Sortier- und Aufbereitungsversuche der Gerätecluster (TUHH, Mairec) 		
Ergebnisse	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Typologie des Gerätebestandes in Rechenzentren ▪ Bericht zu Energiebedarfen, Materialien und Rohstoffinhalten (Zielmetalle) der Gerätecluster in Rechenzentren (Meilenstein 2) 		

AP1.1: Entwicklung einer Typologie der ressourcenrelevanten Gerätecluster zur Erhebung des Energie- und Ressourcenbedarfs

Definition von rohstoffrelevanten Geräten

Da die Verfügbarkeit der Dienste von Rechenzentren auch in der Zukunft gesichert sein muss, ist es unabdingbar die Ressourceneffizienz in Rechenzentren auch auf Materialebene zu betrachten.

Definition von Rohstoffrelevanz

Die Basis zur Bestimmung der rohstoffrelevanten Geräte bilden die in den Komponenten eingesetzten Metalle. Die Metalle werden auf Basis des Berichts der Ad-hoc Working Group der Europäischen Kommission bewertet. Die Liste der kritischen Rohstoffe wird alle drei Jahre aktualisiert, da die Kritikalität von den Handelsströmen und den handelspolitischen Entwicklungen abhängt. Entgegen der Kritikalität von Rohstoffen wirkt die Diversifizierung der Versorgung und der Ausbau des Recyclings aller Rohstoffe (European Commission 2017a). Leider sind demnach nicht alle Rohstoffe gleich gut durch Recyclingverfahren versorgt und die Kritikalität kann sich schneller verändern als der Ausbau von Technologien.

Liste kritischer Rohstoffe

Die nach der Definition der Europäischen Kommission kritischen Rohstoffe und der entsprechende Einsatz im Rechenzentrum werden in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Liste der Kritischen Rohstoffe für die EU 2017 mit Anwendungsbereichen und Einsatz in Rechenzentren (European Commission 2017a, 2017c, 2017b)

Kritischer Rohstoff	Anwendungsbereich	Einsatz im Rechenzentrum (ja=x; indirekt=(x))
Antimon	Legierungen, Härtung mit Blei, Zinn, Halbleiterdotierung von Silicium, Medizin	x
Baryt	Fotografische Papiere, Kontrastmittel, Tiefbohrtechnik	
Beryllium	High-End-Lautsprecher, Kalotten-Membran, Kunststoffspritzdüsen, Verbrennungsmotoren, Bor-Silikat-Gläser, Motorsport	
Bismut	Peltier-Elemente, DVD-RAM, Solarindustrie	
Borat	Holzschutzmittel, Waschmittel	
Kobalt	Batterien als Lithium-Kobalt-Dioxid, Elektromobilität	
Kokskohle	Reduktionsmittel in Hochöfen	(x)
Flussspat	Flussmittel Aluminiumgewinnung, Glasindustrie, optische Linsen	(x)
Gallium	Halbleitertechnik, PCBs, Dioden (LED), Solarzellen, Batterien, Magnete	x
Germanium	Lichtwellenleiter, Halbleitertechnik, Solarzellen	x
Hafnium	Hochtemperaturlegierungen	
Helium	Kühlmittel	(x)
Indium	Nanotechnologie, Dioden (LED), Solarzellen	(x)
Magnesium	Leichtbau, Düngemittel	
Natürlicher Grafit	Kohlebürste elektrische Motoren, Li-Ionen-Zellen, negative Elektrode	(x)
Naturkautschuk	Bindemittel, Gummi	
Niob	Elkos wegen hoher Permittivität	
Phosphorit Phosphor	Düngemittel, Weichmacher, Flammschutzmittel	(x)
Scandium	Erhöhung der Ummagnetisierungsgeschwindigkeit in magnetischen Datenspeichern	(x)
Siliciummetall	Grundmaterial in Halbleitertechnik, Lichtwellenleiter	x
Tantal	Elkos, kleine Kondensatoren mit hoher Kapazität	x
Wolfram	Borosilikatgläser (hitzebeständig), Hochtemperaturlegierungen	
Vanadium	Stahlindustrie, in Legierung zur Festigkeit, Zähigkeit und Verschleißfestigkeit	(x)
Metalle der Platingruppe	Katalysator, Goldersatz, Leiterplattenbeschichtung, Elektroden, Relais, Wasserstoffspeicher	x
Schwere seltene Erden	Leuchtmittel	x
Leichte seltene Erden	Magnete, Festplatten	x

Eine Zusammenfassung der Fakten über kritische Rohstoffe in Rechenzentren ist in dem Periodensystem auf der Projekt-Website zu finden: <https://tempro.uni-oldenburg.de/elemente>

Identifizierung von Geräten für Analyse

Im Folgenden werden die Geräte zur weiteren Analyse identifiziert. So soll im ersten die Rechenzentrumsinfrastruktur erläutert werden. Für die weiteren Cluster werden Kategorisierungsmöglichkeiten sowie die entsprechenden rohstoffrelevanten Bauteile beschrieben.

a) Rechenzentrumsinfrastruktur

Die Grundstruktur eines Rechenzentrums, unabhängig davon in welchem Maß die Anforderungen der Datenverarbeitung, Datenspeicherung und Datenübertragung verfolgt werden, können grundsätzlich aus dem Hauptbestandteil des IT-Equipments, der Einrichtungen der dazu benötigten Stromversorgung sowie der Klimatisierung zusammengefasst werden. Zusätzlich sind bedingt und zur Gewährleistung der Sicherheit auch weitere Strukturen wie Einhausungen, Brandschutz und sicherheitstechnische Ausrüstung relevant.

b) Kategorisierungsmöglichkeiten / Unterscheidungsmerkmale von Rechenzentren

Rechenzentren gehen in unterschiedlichem Maße den Anforderungen der Datenverarbeitung, Datenspeicherung und Datenübertragung nach. Je nach Anforderung unterscheiden sich Ausführungen der Rechenzentren hinsichtlich der folgenden Kategorien von VDE DIN EN 50600-4-3; VDE 0801-600-4-3(DIN EN 2016)

Tabelle 5: Kategorisierungsmöglichkeiten von Rechenzentren

Zweck:	Unternehmens-Rechenzentrum Kollokations-Rechenzentrum Hosting-Rechenzentrum
Sicherheitsniveau:	Tier 1-4
Physische Größe:	Fläche des Rechenzentrums, Anzahl der Racks, Anzahl der Server
Unterbringung:	Mobile, zeitweilige, dauerhafte Konstruktion

Das Sicherheitsniveau wird nach den Verfügbarkeitsklassen des Uptime-Instituts in den Tier-Klassen I-IV kategorisiert.

Zur Vergleichbarkeit der massenspezifischen rohstofflichen Zusammensetzung eines Rechenzentrums sollen zur Kategorisierung eines Rechenzentrums Faktoren der physischen Größe angewendet werden. Die technische Betrachtung der physischen Größe ist über, die Zahl der Racks, Zahl der Server, Zahl der Prozessoren, des Stromverbrauchs, der Größe, Rechenleistung, Speicherleistung oder der Art der Anwendung zu bestimmen (Hintemann et al. 2010).

Zur Bewertung der Rohstoffvielfalt ist die Größe des Rechenzentrums nach der Anzahl von Servern zu definiert. In der nachfolgenden Tabelle 6 werden kleine mittlere und große Rechenzentren nach der Anzahl der Server definiert.

Tabelle 6: Größenkategorie von Rechenzentren nach Serveranzahl (Hintemann et al. 2010; Hobohm et al. 2014)

Kürzel	Beschreibung	Anzahl RZ in Deutschland	Anzahl Server aus RZ	Anzahl Server/RZ	Zentralwert Anzahl Server/RZ	Anschlussleistung IT /RZ in kW
KRZ	Kleines Rechenzentrum	1 750	260 000	101-500	300	50
MRZ	mittelgroßes Rechenzentrum	370	220 000	501-5000	2 750	240
GRZ	großes Rechenzentrum	50	300 000	>5 000	5000	2 500

Zur Berechnung des Materialaufwandes für ein Rechenzentrum einer der hier definierten Größenklassen wird der Zentralwert der Serveranzahl eines Rechenzentrums herangezogen.

c) Rohstoffe in Rechenzentren - Rohstoffrelevante Bauteile

Die höchste Rohstoffrelevanz des Rechenzentrumsinventars liegt in den Geräten, die einen erhöhten Anteil kritischer Rohstoffe aufweisen. Der Anteil und die Vielfalt kritischer Rohstoffe sind vor allem im IT-Equipment besonders hoch, dem funktionell bedeutendsten Bestandteil des Rechenzentrumsinventars. Dies ist vor allem auf den Anteil der verbauten elektronischen Schaltungen in Form von Leiterkarten zurückzuführen, der in Servern einen Anteil von etwa 15 % ausmacht. Der Rohstoffeinsatz aus Computersteuerung und LCD-Bildschirmanzeigen in Geräten der Energieversorgung, Klimatisierung und weiterer Infrastruktur ist vernachlässigbar klein.

d) IT-Equipment: Server und Netzwerktechnik

Hier lässt sich in Server und Netzwerktechnik unterscheiden. Die Netzwerktechnik dient der Verschaltung der Gesamtheit der Server. Hierfür werden Kabel (Lichtwellenleiter und Kupferkabel) und Switches eingesetzt. Die Server selbst enthalten ebenfalls Netzwerktechnik und unterscheiden sich in ihrer Konfiguration der Anwendung nach. Es lässt sich weiter zwischen High-Performance-Servern, Storage-Servern und Netzwerk-Servern differenzieren. Bladecenter werden ebenfalls in der Servergruppe zusammengefasst und können durch ihre Variabilität verschiedenster Anwendungen dienen. Zusätzlich zeichnen sich durch ihren besonders kompakten Zusammenschluss als „kleines Rechenzentrum“ innerhalb eines Rechenzentrums aus.

e) Platinen

Den größten Teil der Leiterkarten im IT-Equipment machen, mit einem Anteil von etwa 80 %, die Hauptplatinen (Mainboards) aus. Zudem werden in Servern Leiterkarten in Form von Adapterplatinen mit verschiedenen Anwendungen eingesetzt, die der Hauptplatinen zugeschaltete werden. Auf den Hauptplatinen der Server sind in der Regel Speichermodule und CPU(-Chips) angebracht. Server enthalten abhängig von ihrer Konfiguration weitere Geräte, die als Bauteile der Server betrachtet werden. Diese Geräte, Laufwerke, wie Festplatten, CD-ROM-Laufwerke und Netzteile enthalten ebenfalls Platinen. Zudem sind auch die Geräte der Netzwerktechnik, wie Switches mit Hauptplatinen ausgestattet. Die Zusammensetzung aller Platinen wird ausgehend von der Zusammensetzung von Hauptplatinen, wie sie in Stand-PCs (zumeist in Nutzung als Clients, seltener als Server) verbaut sind, festgelegt. Hierzu wird der Ankaufspreis für verschiedenen Platinen-Typen der Elektronikschrott-

Recycler herangezogen und eigenen Abschätzungen getroffen. In Tabelle 7 wird die daraus resultierende rohstoffliche Zusammensetzung der verschiedenen Platinen aufgeführt.

Tabelle 7: Rohstoffliche Zusammensetzung von Hauptplatinen, Steckkarten, Speichermodulen, HDD-Platinen, CPUs und Netzteilplatinen, Daten des IUE, ergänzt durch Daten des Borderstep-Instituts (B) und eigene Annahmen (EA) (Hintemann et al. 2010; Hobohm et al. 2014)

		Massenanteil pro kg Platine					
Rohstoff	Einheit	Hauptplatine (TUHH)	Steckkarte	Speichermodul	HDD-Platine	CPU	Netzteil-Platine
Au	mg	49,38	⁽¹⁾ 60,96	⁽¹⁾ 198,38	⁽¹⁾ 132,31	⁽¹⁾ 99,89	⁽¹⁾ 3,62
Ag	mg	232,35	232,35	^(EA) 348,53	248,87	^(EA) 290,44	^(EA) 23,24
Pd	mg	40,72	40,72	^(EA) 61,08	43,62	^(EA) 50,90	^(EA) 4,07
Y	mg	11,01	11,01	^(EA) 0,00	11,79	^(EA) 0,00	4,67
Nd	mg	^(EA) 0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe	g	^(B) 73,03	73,03	^(EA) 7,30	^(EA) 36,52	^(EA) 7,30	^(EA) 175,28
Cu	g	^(B) 205,73	205,72	^(EA) 308,59	220,35	^(EA) 308,59	^(EA) 411,45
Al	g	^(B) 51,43	51,43	39,32	^(EA) 25,72	^(EA) 308,59	^(EA) 128,58
KST	g	^(B) 195,44	195,44	^(EA) 293,16	209,33	111,91	82,88
Si g	g	^(B) 436,14	436,13	333,43	467,15	249,74	184,95
Co	mg	24,77	24,77	18,94	26,53	14,18	10,50
Ga	mg	4,21	4,21	3,22	4,51	2,41	1,79
In	mg	0,24	0,24	0,18	0,26	0,14	0,10
Sn	g	1,44	1,44	1,10	1,54	0,82	0,61
Be	mg	0,24	0,24	0,18	0,26	0,14	0,10
Ni	g	^(B) 13,37	13,37	10,22	14,32	7,66	5,67
Zn	g	^(B) 6,17	6,17	4,72	6,61	3,53	2,62
Pb	g	^(B) 15,43	15,43	^(EA) 0,00	16,53	^(EA) 0,00	6,54
Ta	mg	135,00	135,00	103,21	144,60	77,30	57,25
Sonstige	g	1,32	1,33	1,43	1,32	1,32	1,31
Preisabweichung zu Hauptplatinen			23 %	302 %	168 %	102 %	-93 %
(B): Borderstep Institut (Hintemann et al. 2010)) (EA): Eigene Annahme, im Text erläutert (TUHH): Technische Universität Hamburg-Harburg, Repro (Hobohm et al. 2014)(1): Wert orientiert sich an der preislichen Abweichung zu Hauptplatinen (Gotzler 2017; Biglari Recycling; ESG Edelmetall-Service GmbH & Co. KG 2017; Eschrott-Service UG 2017; Comet-Trade 2017)							

f) Speichermedien

Speichermedien werden in magnetische Speicher, Halbleiter-Speicher und optische Speicher unterteilt, Zu den magnetischen Speichern und optischen Speichern gehören Laufwerke wie Festplatten und CD-ROM-Laufwerke, Diese Bauteile werden mit einem Elektromotor angetrieben, Die hierzu eingesetzten Magnete, vor allem in Festplatten enthalten Leichte Seltene Erden wie Neodym,

Alle Speichermedien enthalten Leiterkarten, in Halbleiterspeichern (wie SSD) ist die Leiterkarte mit den Speicherchips die Hauptkomponente,

g) Gerätecluster

Vom Anwendungsbezug zum Rohstoffbezug: Mit dem Gerätecluster wird die anwendungsbezogene Zusammenstellung des Rechenzentrums-Equipments rohstofflich aufgeschlüsselt und so der Rohstoffbezug hergestellt. Zur Differenzierung der individuellen Rechenzentren wird nach dem Hauptkriterium der Serveranzahl unterschieden. Es wird demnach zwischen kleinen, mittelgroßen und großen Rechenzentren unterschieden.

- **Ziel des rohstoffrelevanten Geräteclusters:**

Mit der Anwendung des rohstoffrelevanten Geräteclusters kann der Rohstoffgehalt der definierten Größenkategorien der Rechenzentren oder eines individuell zusammengestellten Rechenzentrums-Inventar in Bezug auf die rohstoffliche Zusammensetzung bewertet werden. Ziel ist es, über das Rohstoffpotenzial eines Rechenzentrums den Graue-Energie-Verbrauch indizieren zu können. Daher wird in dieser Arbeit der Rohstoffgehalt zum einen mit dem Einsparpotenzial der CO₂-Emissionen verknüpft. Zum anderen werden die Substitutionsmöglichkeiten der Rohstoffe verknüpft. Das Schema ist zudem über das IT-System und den definierten Zielstoffkatalog hinaus erweiterbar. Somit kann der Fokus auch auf die Stromversorgung, Klimatisierung oder weitere Infrastruktur des Rechenzentrums übertragen werden oder auf weitere Rohstoffe.

- **Schema des ressourcenrelevanten Geräteclusters:**

In der nachfolgenden Abbildung 1 ist das Schema des Geräteclusters dargestellt. Es zeigt die Abgrenzung der Clusterebenen und die darunterfallenden Clustergruppen bis hin zu ihrer Aufschlüsselung nach den Rohstoffen bzw. den definierten Zielstoffen. Die Ebenen führen vom System Rechenzentrum über die anwendungsbezogene erste Ebene der Systemgruppen, die Ebenen der einzelnen Geräte und deren Bauteile, bis hin zur letzten Ebene, der Rohstoffe.

- Die **Systemgröße** definiert vier Größenkategorien des Systems Rechenzentrum, kleine Rechenzentren mit durchschnittlich 150 Servern, mittelgroße Rechenzentren mit 600 Servern und große Rechenzentren mit 6 000 Servern sowie die individuellen Inventar-Konstellationen.
- In der Ebene **Systemkategorie** wird das System Rechenzentrum in die anwendungsbezogenen Kategorien, der Gerätecluster IT-Geräten, Stromversorgung, Klimatisierung und weitere Infrastruktur unterteilt.
- In der Ebene **Systemgruppen** sind den Systemkategorie-Clustern die zugehörigen Geräte bzw. Inventar-Cluster zugeordnet. Das Cluster IT-Geräte gliedert sich in die High-Performance-Cluster, Storage-Cluster, Netzwerk-Cluster und Netzwerktechnik. Dem Cluster Stromversorgung wird die USV mit den zugehörigen Aggregaten zugeordnet. Dem Cluster Klimatisierung wird das Inventar der Klimaanlage zugeordnet. Zum Cluster weitere Infrastruktur gehören Brandschutz und Sicherheitstechnik und Kleinverbraucher, wie die Beleuchtung.
- Auf die Systemgruppen folgen die **Systemgeräte**. Hier findet die Eingrenzung des IT-Systems statt. Dem IT-System werden aus der Systemkategorie IT-Geräte die Systemgeräte Server, Blade-Center, Externe Speicher, Datenkabel, Switch sowie Patches und Kabelführungen zugeordnet. Aus dem Stromversorgungs-Cluster werden dem IT-System PDU und Stromkabel

zugeordnet. Aus den Clustern der Klimatisierung und weiterer Infrastruktur werden dem IT-System Racks (mit und ohne Flüssigkeitskühlung) zugeordnet.

- In der Ebene **Bauteilgruppen** werden die Systemgeräte des IT-Systems in Platinen, Formteile, Kühlkörper, Cu-Kabel, Lichtwellenleiterkabel, (Halbleiter-, magnetische und optische) Speicher, Netzteile, Lüfter und Batterien unterteilt. Vor der rohstofflichen Aufschlüsselung muss das Material detaillierter getrennt werden.
- In der Ebene Bauteile sind die **Bauteile** des IT-Systems aufgeführt, die einen direkten Rückschluss auf die rohstoffliche Zusammensetzung bieten, wie z.B. verschiedene Platinen-Typen, Magnete und Lichtwellenleiter.
- Am Ende der Aufschlüsselung wird in der **Rohstoff**-Ebene die Verbindung der Bauteile zum Rohstoffgehalt hergestellt. In der Clusterebene Rohstoffe sind die auftretenden Zielstoffe wie im definierten Zielstoffkatalog (Kapitel 3.2) gegliedert nach den Basisstoffen und den kritischen Rohstoffen und Edelmetallen. Die Clusterebene Rohstoffe ist mit den Rohstofffakten verknüpft, in der die technischen Funktionen der Rohstoffe, deren Substitutionsmöglichkeiten und das CO₂-Emissions-Einsparpotenzial aus der Differenz der Primär- und Sekundärrohstoffgewinnung aufgeführt sind.

Das Cluster dient als Auswertungsgrundlage des Rohstoffpotenzials. Aus dem Untersuchungsmaterial geht das Gewicht der einzelnen Bauteilgruppen, Bauteile und Komponenten hervor. Aus der Datenanalyse geht der Rohstoffgehalt hervor und die damit einhergehenden Informationen über die Rohstofffakten dieser Teile. Nach dem Muster der Gerätecluster werden die Daten in der Datenbank gesammelt und zur Auswertung individueller Rechenzentrums-Zusammenstellungen eingesetzt.

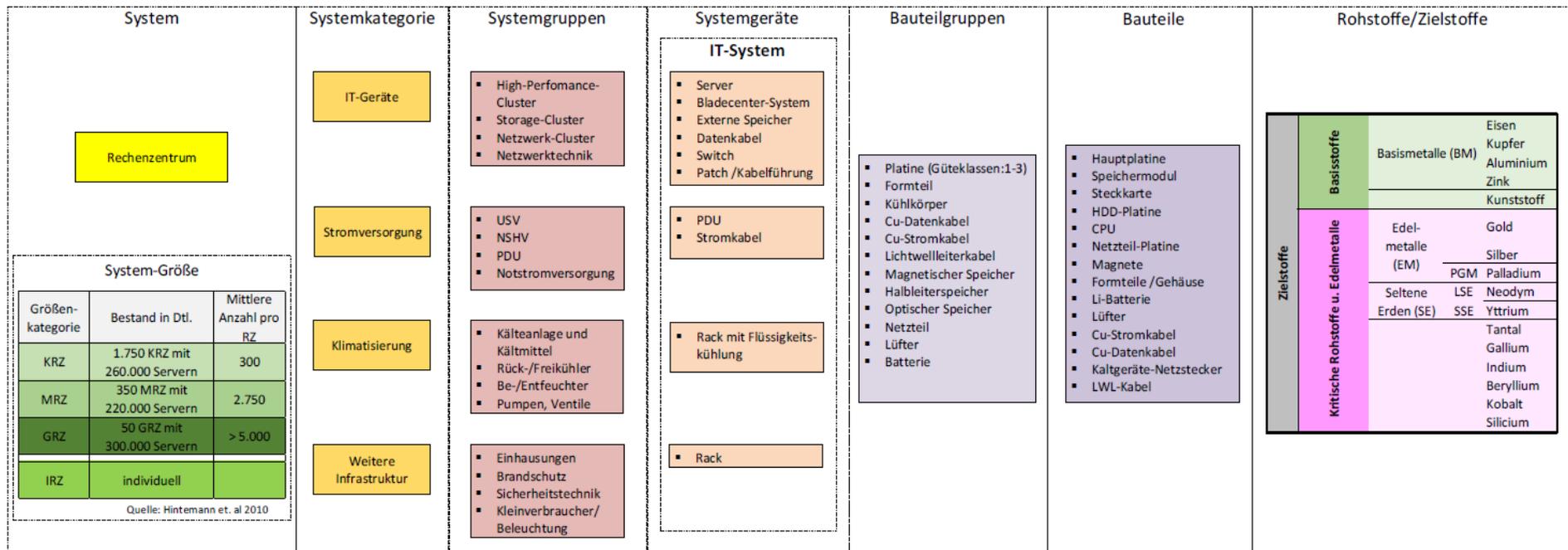


Abbildung 1: Schema des ressourcenrelevanten Geräteclusters mit Fokus auf das definierte IT-System.

AP1.2: Ermittlung des Energiebedarfs der Gerätecluster und Abgleich mit den Daten der Projektpartner

1.2.1 Überblick

Die Bestimmung erfolgte mit Hilfe eines am Borderstep Institut entwickelten Modells der Rechenzentrumslandschaft. Auch wenn AP 1.2 bereits Ende 2017 formal abgeschlossen war, wurden die Berechnungsergebnisse zum Energiebedarf der Rechenzentren während der Laufzeit von TEMPRO kontinuierlich aktualisiert und publiziert (Hintemann 2016, 2017b, 2018a, 2019a; Hintemann und Hinterholzer). Der folgende Bericht fasst die Ergebnisse der Publikationen zusammen.

Die Berechnungen der Entwicklung des Energiebedarfs der Rechenzentren erfolgten mit Hilfe eines umfangreichen Strukturmodells der Rechenzentrumslandschaft in Deutschland, das am Borderstep Institut entwickelt wurde und kontinuierlich aktualisiert wird. Aufbau und Struktur des Modells sind umfangreich publiziert (Fichter und Hintemann 2014; Hintemann 2017b; Hintemann et al. 2010; Hintemann und Hinterholzer 2019; Stobbe et al. 2015). Auch im Rahmen von TEMPRO sind Ergänzungen und Modifikationen am Modell vorgenommen worden. In dem Modell sind die Rechenzentren in Deutschland gemäß der in AP 1.1. dargestellten Typologie der Gerätecluster in unterschiedlichen Größenklassen in ihrer Ausstattung mit verschiedenen Servertypen, Speichersystemen und Netzwerkinfrastrukturen beschrieben. Dabei werden auch die Altersstruktur der Server und die Energiebedarfe der verschiedenen Servertypen in unterschiedlichen Betriebszuständen berücksichtigt. Außerdem sind die Rechenzentrumsinfrastrukturen wie Klimatisierung, Stromversorgung, USV, etc. für unterschiedliche Größen- und Redundanzklassen modelliert. Das Modell berücksichtigt nur die Elemente eines Rechenzentrums, die aktiv Strom benötigen; Kabel, Racks, etc. werden nicht erfasst⁹.

Für die Berechnungen wurden insbesondere folgende Quellen genutzt:

- Studie „Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland“ - Studie von Fraunhofer IZM und Borderstep im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (Stobbe et al., 2015).
- Aktuelle Ergebnisse von Untersuchungen zur Entwicklung des Rechenzentrumsmarktes
- (CBRE 2017, 2018, 2020; Cisco 2015, 2016; Gartner 2019; Hintemann et al. 2014; Hintemann 2017a, 2017b; Hintemann und Clausen 2018a, 2018b), Hintemann et al. 2014; Howard-Healy 2018)
- Daten des Marktforschungsinstituts Techconsult zur Marktentwicklung bei Server, Storage und Netzwerkkomponenten (eanalyzer) (Techconsult 2014, 2015, 2016)
- Daten der Marktforschungsinstitute IDC und EITO zur Marktentwicklung bei Servern in Deutschland und Europa (EITO 2014; IDC 2018)

⁹ Die bei Marktforschungsinstituten verfügbaren Daten zu den einzelnen Gerätekategorien im Bereich der Server weichen etwas von der in AP 1.1 aufgestellten Systematik ab. Da das Berechnungsmodell auf Basis solcher Daten den Energiebedarf für ganz Deutschland ermittelt, wurde in AP 1.2 mit leicht abweichenden Geräteclustern für Server gearbeitet: Volume-Server, Midrange-Server, Mainframe-Server.

- Wissenschaftliche Literatur und Herstellerinformationen zur Entwicklung des Energieverbrauchs von Servern, Speicher- und Netzwerkprodukten und bei weiteren Effizienztechnologien für Rechenzentren

In Abbildung 2 ist mit dem Modell erhobene der Energiebedarf der Server und Rechenzentren in Deutschland in den Jahren 2010 bis 2018 dargestellt. Der Energiebedarf der Rechenzentren in Deutschland ist kontinuierlich angestiegen. Vor allem in den Jahren 2017 und 2018 erhöhte sich der Bedarf an elektrischer Energie durch Server und Rechenzentren deutlich. Für dieses Wachstum ist vor allem der starke Ausbau von Cloud-Computing-Kapazitäten in Deutschland verantwortlich. Insbesondere im Großraum Frankfurt, aber auch an anderen Standorten in Deutschland, wurden erhebliche neue Rechenzentrumskapazitäten aufgebaut. Auch für die Zukunft ist damit zu rechnen, dass sich diese Entwicklung fortsetzt. Trends wie Edge Computing und Künstliche Intelligenz werden voraussichtlich zu einem deutlichen Ausbau der Rechenzentrumsinfrastrukturen in Deutschland, Europa und auch weltweit führen. Wenn es nicht gelingt, die vorhandenen Effizienzpotenziale zu realisieren, wird der Energiebedarf der Rechenzentren weiter deutlich ansteigen.

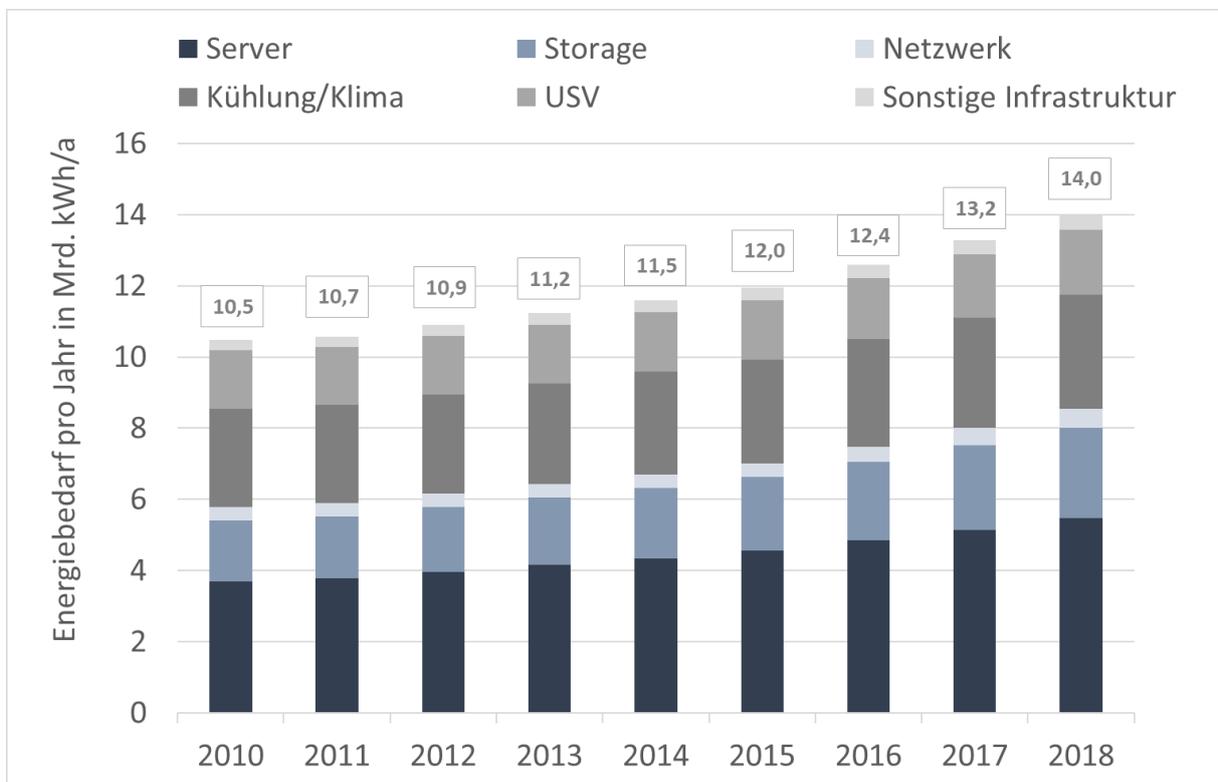


Abbildung 2: Energiebedarf der Server und Rechenzentren in Deutschland in den Jahren 2010 bis 2018. Quelle: Hintemann (2019a)

Zwar gab es in den vergangenen Jahren sehr deutliche Verbesserungen bei der Energieeffizienz der Rechenzentren, der stark steigende Bedarf an zentraler Rechenleistung hat aber dazu geführt, dass der Energiebedarf in den Rechenzentren in Deutschland weiterhin angestiegen ist. Insbesondere die IT-Komponenten (Server, Storage und Netzwerk) benötigen mit 8,5 Mrd. kWh im Jahr 2018 deutlich mehr

elektrische Energie als im Jahr 2010 (5,8 Mrd. kWh). Der durchschnittliche PUE-Wert¹⁰ der Rechenzentren in Deutschland sank zwischen 2010 und 2018 von 1,98 auf 1,70¹¹. Damit steigerte sich die Effizienz der Rechenzentrumsinfrastruktur im Durchschnitt um 16%.

Setzen sich die Trends der Vergangenheit fort, ist damit zu rechnen, dass der Energiebedarf von Rechenzentren in Deutschland weiter ansteigt und sich bis zum Jahr 2030 um 50% im Vergleich zum Jahr 2018 erhöht. Diese Entwicklung muss aber nicht zwangsläufig so eintreten. Im Rahmen von AP 4 wurden etwa 60 neue energie- und ressourcensparende Technologien analysiert und bewertet. Besonders erfolversprechende Technologien wurden von den Projektpartnern in AP 5 bereits prototypisch umgesetzt.

Werden die in AP 4 als in den nächsten Jahren voraussichtlich verfügbar identifizierten Technologien eingesetzt, so kann auch eine Reduktion des Energiebedarfs der Rechenzentren gelingen. In einem solchen Szenario könnte der Energiebedarf der Rechenzentren in Deutschland trotz des starken Ausbaus der Rechenzentrumsinfrastrukturen bis zum Jahr 2030 gemäß den Ergebnissen der Modellierung sogar um 25% gesenkt werden. Allein die in AP 5 entwickelten Technologien bieten bei breiter Anwendung das Potenzial, den Energiebedarf aller Rechenzentren um 10% zu senken.

1.2.2 Wesentliche Treiber des Energiebedarfs von Rechenzentren: Cloud und Edge Computing, Künstliche Intelligenz

Die zunehmende Digitalisierung, und damit einhergehende neue Anwendungen, wie z.B. im Bereich der Künstlichen Intelligenz (KI), aber auch die deutliche Zunahme der Kapazitäten für Cloud und Edge Computing werden zu einem steigenden Bedarf an Rechenzentrumsinfrastrukturen führen.

Das Wachstum im Rechenzentrumsmarkt wird vor allem durch die stark zunehmende Nutzung von Cloud Services getrieben. Insbesondere internationale Cloud-Computing-Anbieter bauen ihre Rechenzentrumskapazitäten aktuell in Deutschland sehr stark aus (Kalenda 2014; Kroker 2018; Kuplent 2014; golem.de 2016). Aufgrund von Größenvorteilen, besonders effizienter Rechenzentrumsinfrastruktur und einer typischerweise hohen Serverauslastung sind Cloud-Computing-Rechenzentren oft deutlich effizienter als traditionelle Rechenzentren (Bizo 2019; Shehabi et al. 2018). Bisher werden Cloud Rechenzentren in Deutschland zusätzlich zu den bestehenden traditionellen Rechenzentren aufgebaut. Der Abbau traditioneller on-premises-Rechenzentren¹² ist kaum festzustellen. Dies führt dazu, dass trotz der höheren Effizienz von Cloud-Computing-Lösungen der Energiebedarf der Rechenzentren in Summe weiter ansteigt (Abbildung 2).

¹⁰ Der Wert der Power Usage Effectiveness (PUE-Wert) gibt das Verhältnis des Jahresenergiebedarfs des gesamten Rechenzentrums zum Jahresenergiebedarf der IT des Rechenzentrums an.

¹¹ Bei diesen Werten sind die Stand-Alone-Server, die im Normalfall ohne eigene Klimatisierung betrieben werden, nicht in die Berechnung einbezogen. Unter Berücksichtigung der Stand-Alone-Server hat sich der durchschnittliche PUE-Wert in Deutschland von 1,82 im Jahr 2010 auf 1,63 im Jahr 2018 verbessert.

¹² On Premises: in den eigenen Räumlichkeiten, vor Ort oder lokal

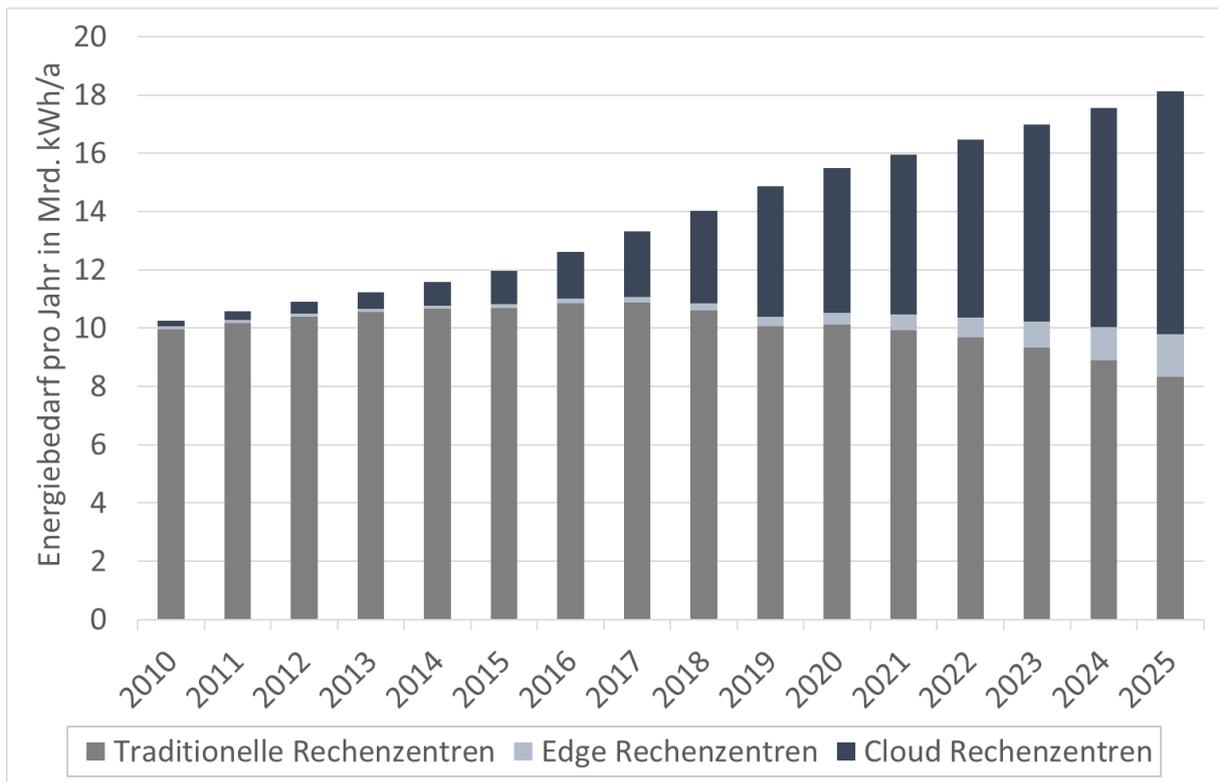


Abbildung 3: Entwicklung des Energiebedarfs der Rechenzentren in Deutschland mit Anteil Cloud-Rechenzentren in den Jahren 2010 bis 2018 und Prognose bis 2025)

Regional profitiert insbesondere der Großraum Frankfurt vom Wachstum im Bereich Cloud Computing. Aufgrund der guten Netzwerkanbindung durch den DE-CIX und der räumlichen Nähe zu den dort bereits vorhandenen Cloud-Kapazitäten ist Frankfurt oft erste Wahl bei Neubauten von Rechenzentren. Dies bestätigen auch die Analysten des Immobiliendienstleisters CBRE, die aktuell den Raum Frankfurt als am stärksten wachsenden Markt in Europa sehen. In Frankfurt sollen in den nächsten zwei Jahren die meisten zusätzlichen Rechenzentrumskapazitäten in Europa aufgebaut werden (CBRE 2020).

Künftig werden auch Edge-Rechenzentren einen zunehmenden Anteil am Energiebedarf haben. Als Edge-Computing wird die Datenverarbeitung nahe am Ort der Entstehung der Daten bezeichnet. Grund hierfür ist oft, dass die Datenmenge zu groß ist, um sie unverarbeitet in ein entferntes Rechenzentrum zu übertragen oder dass die Latenzzeit der Datenübertragung für die konkrete Anwendung zu lang ist. Insbesondere für Autonomes Fahren, Industrie 4.0 und Smart-City-Anwendungen wird ein hoher Bedarf an Edge Rechenzentren vorhergesagt. Mit der Einführung des 5G-Mobilfunkstandards wird sich die Entwicklung voraussichtlich stark beschleunigen. Vielfach werden als Edge-Rechenzentren sogenannte Mikro-Rechenzentren verstanden, also kleine Rechenzentren in der Größenordnung eines Racks, die insbesondere über eine eigene Unterbrechungsfreie Stromversorgung, eine Klimatisierung und eigene Management-Tools verfügen und ferngewartet werden können. Der Markt für solche Mikro-Rechenzentren wird sich nach Analysten-Meinungen sehr dynamisch entwickeln. Es werden Wachstumsraten von über 20% jährlich prognostiziert und ein weltweites Marktvolumen von ca. 15 Mrd. US-\$ im Jahr 2025 (HTF 2018; SBWire 2018). Auf Basis dieser

Prognosen wurde die Entwicklung des Energiebedarfs von Edge-Rechenzentren in Deutschland modelliert.

Im Jahr 2025 werden die Edge-Rechenzentren in Deutschland voraussichtlich 1,5 Mrd. kWh an elektrischer Energie benötigen. Mit dem weiteren Ausbau von 5G-Mobilfunknetzen und Edge-Computing-Anwendungen in Bereichen wie Industrie 4.0-Anwendungen, Autonomes Fahren und Smart City ist damit zu rechnen, dass der Energiebedarf von Edge Rechenzentren bis zum Jahr 2030 auf etwa 4,5 Mrd. kWh/a ansteigt. Das wären über 20% des Energiebedarfs der Rechenzentren im Jahr 2030. In einem Szenario mit verstärktem Ausbau von Edge Computing wäre nach Berechnungen im AP 1.2 sogar ein Anteil von 30% am Energiebedarf der Rechenzentren möglich.

Auch neue Anwendungen insbesondere im Bereich der Künstlichen Intelligenz können zu einem zunehmenden Energiebedarf der Rechenzentren führen. KI durchdringt immer mehr den Lebensraum des Menschen (Reinsel et al. 2018; Schneider und Ziyal 2019; Walsh 2018). KI-Lösungen finden sich überall, vom Wohnzimmer mit Spracherkennungslösungen über Cloud-Lösungen für Deep-Learning-Anwendungen bis hin zum Einsatz in kritischen Infrastrukturen (z. B. in effizienten und nachhaltigen Energienetzmanagement-Systemen). Diese Entwicklung hat vielfältige Umweltwirkungen. Zum einen bietet KI vielfältige Chancen unsere Lebens- und Arbeitswelt nachhaltiger zu gestalten. Es existieren vielversprechende Anwendungsfelder insbesondere zum besseren Systemverständnis von Erde, Klima und Umwelt, sowie in den Bereichen Landwirtschaft, Energie und Mobilität (Jetzke et al. 2019). Mit den wachsenden Erfolgen und dem Erschließen immer neuer Anwendungsgebiete steigt aber auch der Ressourcenbedarf von KI-Lösungen. Vor allem Deep-Learning-Anwendungen, Simulationen und Prognosen haben teilweise enorme Anforderungen an Rechenleistungen und benötigen große Mengen an Energie und Ressourcen. Forscher am MIT haben errechnet, dass das Training einer einzelnen KI-Anwendung zur Spracherkennung fünfmal so viel CO₂ erzeugt wie ein Auto während seiner gesamten Lebensdauer (Hao 2019; Strubell et al. 2019) (Hao, 2019; Strubell, Ganesh & McCallum, 2019).

1.2.3 Internationale Entwicklung des Energiebedarfs der Rechenzentren

Analysiert man die international verfügbaren Studien und Publikationen zum Energiebedarf der Rechenzentren, so ergibt sich kein einheitliches Bild. Einige Forscher gehen weltweit von einem enorm ansteigenden Energiebedarf aus. Dieser könnte sich von 200 Mrd. kWh im Jahr 2010 auf 2.000 bis 3.000 Mrd. kWh bis zum Jahr 2030 erhöhen (Andrae 2019; Andrae und Edler 2015; Belkhir und Elmeligi 2018; The Shift Project 2019). In anderen Studien wurde dagegen ein nahezu konstanter Energiebedarf der Rechenzentren in den vergangenen Jahren berechnet (IEA 2017; Masanet et al. 2020; Shehabi et al. 2018). Für das Jahr 2020 reichen die Berechnungen bspw. von 200 Mrd. kWh bis zu 900 Mrd. kWh.

Die große Bandbreite der Berechnungsergebnisse zeigt insbesondere, dass auf dem Gebiet des Energiebedarfs von Rechenzentren noch ein großer Forschungs- und Informationsbedarf besteht. Aus Sicht der Autoren sind weder die pessimistischen Berechnungen mit sehr hohen Energiebedarfen noch die optimistischen Berechnungen mit einem seit Jahren fast konstanten Energiebedarf plausibel. Die pessimistischen Berechnungen lassen sich nicht mit den bekannten Zahlen zu Hardwareverkäufen und -ausstattungen in Rechenzentren belegen. Gegen einen fast konstanten Energiebedarf der Rechenzentren sprechen insbesondere folgende Sachverhalte:

- In einer Vielzahl unabhängiger Studien (CBECI 2019; Digiconomist 2019; Kamiya 2019; Rauchs et al. 2018) wurde berechnet, dass allein für Bitcoin Mining im Jahr 2019 etwa 60 bis 70 Mrd. kWh elektrische Energie benötigt wurde. Werden hierzu noch weitere Kryptowährungen gezählt, so kann angenommen werden, dass aktuell für das Mining von Krypto-Währungen 70 bis 90 Mrd. kWh/a elektrische Energie benötigt wird.
- Weltweit werden - insbesondere von Hyperscale Cloud Anbietern - sehr viele große und mittelgroße neue Rechenzentren gebaut. Seit Jahren werden nach Angaben von Analysten Rekorde für den Neubau von Rechenzentren aufgestellt. Allein an den vier Rechenzentrumsstandorten London, Frankfurt, Paris und Amsterdam haben sich die Rechenzentrumskapazitäten etwa vervierfacht (CBRE 2017, 2020).
- Bisher wurden in Deutschland und Europa kaum Kapazitäten an On-Premises-Rechenzentren abgebaut. Aktuell wird sogar mit vermehrter Nutzung von Hybrid-Cloud-Lösungen ein Trend ausgemacht, dass Daten aus der Cloud zurück in das eigene Rechenzentrum migriert werden (Alffen 2019; VansonBourne 2019).
- Seit 2010 hat sich die Zahl der Server weltweit um etwa 50% erhöht. Die Zahl der weltweiten Serververkäufe ist insbesondere in den Jahren 2018 und 2019 sehr deutlich angestiegen (Gartner 2019; IDC 2020)
- Insbesondere im asiatischen Markt wachsen die Kapazitäten der Rechenzentren besonders stark. Ein aktueller Report gibt allein für China einen Energiebedarf der Rechenzentren von 161 Mrd. kWh im Jahr 2018 an (Greenpeace und North China Electric Power University 2019).
- Auch der europäische Rechenzentrumsmarkt wächst sehr deutlich. Verschiedene wissenschaftliche Untersuchungen gehen davon aus, dass der Energiebedarf der Rechenzentren in Europa deutlich angestiegen ist (Deloitte und Fraunhofer IZM 2016; Hintemann 2019b; Prakash et al. 2014). Die Studien deuten darauf hin, dass im Jahr 2020 der Energiebedarf der Rechenzentren in Europa um etwa 30% über dem Energiebedarf im Jahr 2010 liegt.

Um im Rahmen von TEMPRO auch eine Abschätzung der internationalen Entwicklung des Energiebedarfs der Rechenzentren vornehmen zu können, wurde das Borderstep Berechnungsmodell so modifiziert, dass weniger detaillierte Berechnungen zum Energiebedarf der Rechenzentren in Westeuropa und weltweit durchgeführt werden konnten. Um diese Berechnungen durchzuführen, wurden die Serverbestände weltweit auf Basis von vorhandenen Studien (Cisco 2015, 2016; Hintemann und Clausen 2016; Shehabi et al. 2016; Shehabi et al. 2018) ermittelt. Weltweit gab es im Jahr 2017 ca. 45 Mio. Server. Mit Hilfe des Modells konnte die Entwicklung des weltweiten Energiebedarfs der Rechenzentren abgeschätzt werden. Gemäß diesen Berechnungen hat sich der Energiebedarf der Rechenzentren zwischen 2010 und 2018 um über 70% auf ca. 400 Mrd. kWh/a erhöht. Zum Vergleich: Der Energiebedarf der Rechenzentren in Deutschland hat sich im gleichen Zeitraum um 37 % erhöht.

AP1.3: Ermittlung des Ressourcenstocks der Gerätecluster

In diesem Teil des Arbeitspakets AP1 wurde die Ermittlung des Ressourcenstocks durch Sortieranalyse der verschiedenen Komponenten von Rechenzentren durchgeführt.

Die Untersuchung konzentriert sich auf die Bestimmung der Materialzusammensetzung kritischer Metalle, wie Seltene Erdmetalle (Yttrium, Neodym, Dysprosium), Tantal, Niob, Titan, Wolfram, Indium, Gallium, Antimon und Barium. Diese Untersuchung basiert auf den Demontageversuchen von Rechenzentrumsgeräten, die Mairec Edelmetallgesellschaft GmbH von TEMPRO Partnern erhalten und anschließend analysiert hat. Weitere Probenahmen und Analysen des Geräteclusters werden zusätzlich von der TUHH durchgeführt.

Also wurden 28 unterschiedliche Arten von Servern aus Rechenzentren von Mairec erhalten (Abbildung 4). Dann wurden die Aufbereitungs- und Demontageversuchen dieser Server vom Mitarbeiter durchgeführt. An dieser Stelle muss die Bedeutung dieser Untersuchung betont werden: Noch NIE gab es in Deutschland eine Monocharge aus Rechenzentrumsservern. Bislang wurden diese Server mit haushaltsüblichen Computern gemischt. Diese Probenahme waren damit historisch einmalig.

Tabelle 8 stellt die von Mairec erhaltenen Daten dar und zeigt die Demontagefraktionen und ihr Gewicht in Prozent und Kilogramm.

Tabelle 8: Zerlegte-Fraktionen vom Serverschrott

Material der Zerlege-Fraktionen	Prozentanteil (%)	Nettogewicht (kg)
Serverhauptplatine	4,65	72,0
Serversteckplatinen	1,20	18,6
Festplatten-/Laufwerkplatinen	0,73	11,3
RAM und CPUs	0,51	7,9
Rückwände	1,35	21,0
Netzteilplatinen	6,99	108,4
Aluschrott	5,74	89,0
Lüfter	3,87	60,0
Magnete aus Festplatten	1,33	20,6
Fe-Mischschrott	69,78	1081,6
Steckerkabel	1,03	15,9
Cu Kühlkörper	0,92	14,2
Abfall	1,90	29,4
Summe (nach Demontage)	100,00	1549,9



Abbildung 4: Server von Rechenzentrum (links) und verschiedene kombinierte Komponenten (rechts).

Der Schwerpunkt dieser Ermittlung liegt jedoch auf dem Gehalt der oben genannten Wertmetalle in PCB-Mainboards (siehe Abbildung 2), weil sie rohstoffrelevante Bauteile sind und direkt mit dem Rohstoffgehalt verknüpft sind. Die Geräte wurden in Kategorien nach Anwendung kategorisiert und sortiert (siehe Abbildung 2):

- Serverhauptplatinen (AD-4867)
- Serversteckplatinen (AD-4868)
- Festplatten-/Laufwerkplatinen (AD-4870)
- RAM und CPUs (AD-4871)
- Rückwände (AD-4872)
- Netzteilplatinen (AD-4873)



Abbildung 5: Serverhauptplatinen (Motherboards)



Abbildung 6: Serversteckplatinen



Abbildung 7: Festplatten-/Laufwerkplatinen



Abbildung 8: RAM und CPUs



Abbildung 9: Rückwände



Abbildung 10: Netzteilplatinen

Vor Beginn der Analyse wurden zuerst die Vorbehandlungsschritte in der Werkstatt und dann in den Labors von Mairec durchgeführt. Die Proben wurden zu langen Streifen geschnitten, um den folgenden Schritt der Zerkleinerung zu verarbeiten (Abbildung 11). Dann wurden die verschiedenen Schritte der

Zerkleinerung zuerst bis 4 mm, dann 2 mm und dann 0,2 mm durchgeführt, um eine homogenisierte Fraktion zu erhalten (Abbildung 12).



Abbildung 11: 'Minderwertige' Leiterplatten vor (links) und nach (rechts) dem Schneiden.



Abbildung 12: Zerkleinerungsfraktion auf 4 mm (links) und 2 mm (rechts).

Nach der Zerkleinerung der Proben wurden sie verpackt und zur weiteren Laboranalyse an die TUHH geschickt, wo die Bestimmung des Rohstoffgehalts in den erhaltenen und gemahlene Komponenten von Rechenzentren durchgeführt wurde. Die gemahlene Proben wurden anschließend mit Säure aufgeschlossen, damit sie im ICP-OES zerstäubt, atomisiert und analysiert werden können. Um den Metallgehalt zu identifizieren, wurde der Mikrowellenaufschluss mit Säure (Königswasser) durchgeführt. Das Verfahren des Mikrowellensäureaufschlusses folgte dem in der DIN EN 16174 beschriebenen Analyseverfahren.

Durch die Nutzung der Mikrowelle wurde der Säureaufschluss in geschlossenen PTFE-Behältern in mehreren Schritten bei Temperaturen bis 175°C erhitzt. Nach einer Abkühlphase war ggf. ein Filtrationsschritt nötig, um vorhandene Partikel (vorwiegend Kunststoff) aus dem Aufschluss abzufiltrieren. Dann wurden die Aliquoten der Filtrate entnommen und anschließend mit dem ICP-OES analysiert. In Tabelle 5 wird die daraus resultierende rohstoffliche Zusammensetzung der analysierten Serverkomponenten aufgeführt.

Tabelle 9: Metallgehalte der Bauteile der erhaltenen Server

Rohstoff	Rohstoffgehalt					
	Hauptplatinen	Serversteckplatinen	Festplatinen	RAM/CPU Kst	Rückwände	Netzteilplatinen
Edelmetalle						
Au [g/t]	124,0	308,0	633,0	855,0	184,0	25,0
Ag [g/t]	759,0	894,0	1802,0	1240,0	380,0	451,0
Pd [g/t]	36,0	25,0	29,0	10	26,0	4,0
Basisstoffe						
Al [kg/t]	28,2	30,4	37,2	16,0	27,6	157,0
Cu [kg/t]	340,0	300,0	280,0	490,0	230,0	260,0
Fe [kg/t]	42,1	33,8	25,9	133,0	8,5	166,5
Seltene Erden						
Dy [g/t]	25,3	23,6	126,1	22,9	2,6	46,2
Nd [g/t]	10,2	65,1	112,3	72,3	59,7	25,8
Y [g/t]	33,9	40,3	53,8	21,3	8,2	13,5
Kritische Rohstoffe						
Ba [kg/t]	7,9	8,5	21,2	7,1	3,2	2,6
Ga [g/t]	255,8	224,1	294,5	256,1	185,1	261,7
In [g/t]	263,7	314,4	276,1	4258,0	261,6	1414,5
Nb [g/t]	165,1	124,0	144,3	128,3	76,1	47,9
Sb [g/t]	2845,4	2683,0	128,2	162,7	270,5	1061,3
Ta [g/t]	118,5	186,8	258,1	236,2	87,4	245,8
Ti [g/t]	1425,4	1621,1	1816,7	1652,9	913,7	592,9
W [g/t]	647,5	416,2	123,6	50,7	173,8	364,6

Die Analyse des Rohstoffgehalts der unterschiedlichen Komponenten wurde durch eine Zusammenarbeit zwischen Mairec, TUHH und der Universität Oldenburg durchgeführt, Das Verfahren zur Bestimmung von Metallgehalt in benannten Bauteilen wird das gleiche sein wie vorstehend beschrieben (mittels ICP-OES), Die Ergebnisse zum Gehalt von Cu und Edelmetallen wurden durch Mairec erstellt, Sonstige Rohstoffgehalte wurden durch die TUHH analysiert. Die Ergebnisse wurden den Datenbanken hinzugefügt, um sie mit weiteren Modellen in der LCA zu verknüpfen,

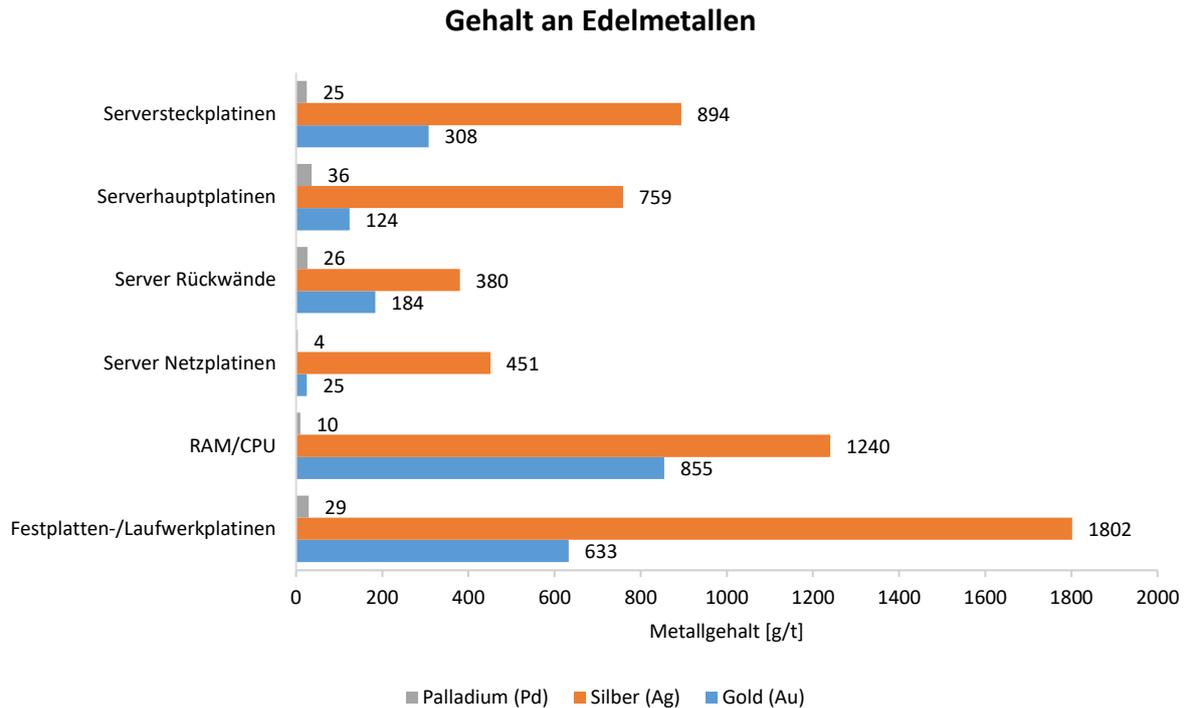


Abbildung 13: Anteil Edelmetalle in Serverkomponenten

Unter den analysierten Komponenten von Servern haben RAM/CPU und Festplatten-/Laufwerkplatinen die höchsten Mengen an Silber und Gold. CPUs besitzen einen recht großen Anteil der Au-Kontakte, was aus den Ergebnissen hervorgeht. Der Gehalt an Au beträgt 855 g/t.

Die Festplatten-Laufwerkplatinen haben den höchsten Silbergehalt (1802 g/t) und hohen Anteil an Gold (633 g/t) auch. Diese Menge und das Verhältnis der Metalle sind viel größer als vorhergesagt (Tabelle 9).

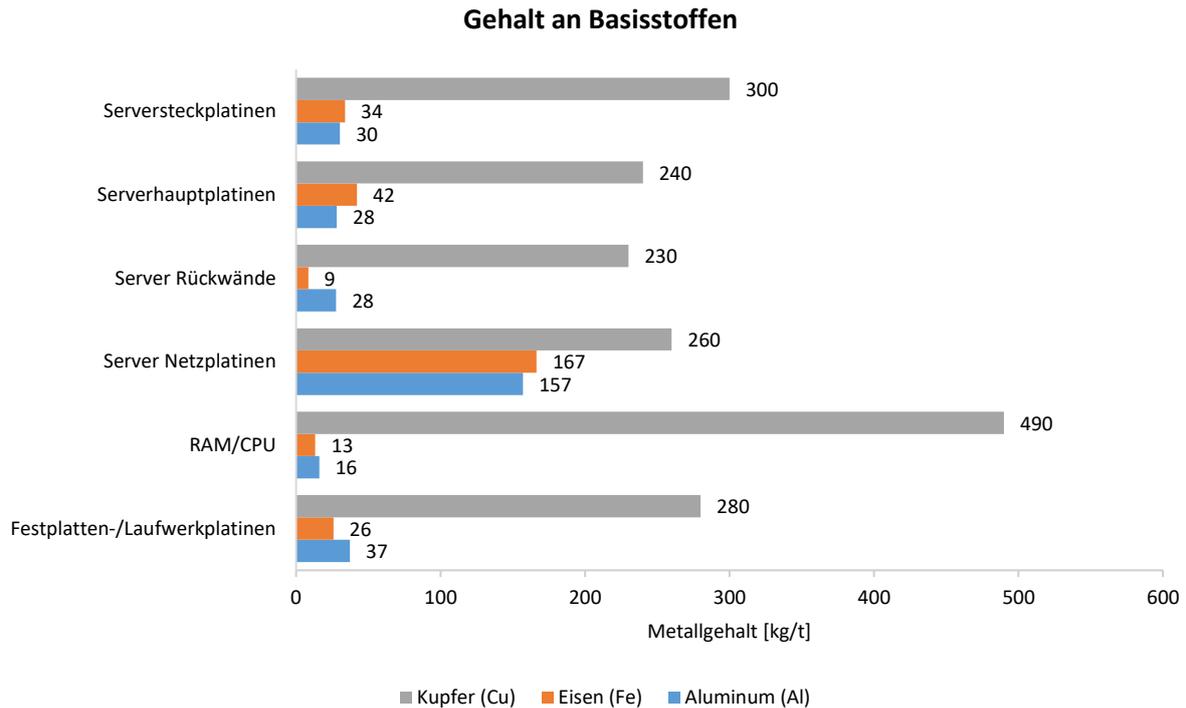


Abbildung 14: Anteil Basisstoffe in Serverkomponenten

In den Voruntersuchungen und früheren Demontageanalysen wurde ein relativ hoher Anteil an NE-Metallen und Eisen angenommen. Die Laboranalyse hat das bewiesen. Der Gehalt an Basisstoffen in Netzteilplatinen im Vergleich zu anderen Komponenten von Servern ist am höchsten. Der Kupfergehalt in allen Server Bauteilen ist jedoch hoch.

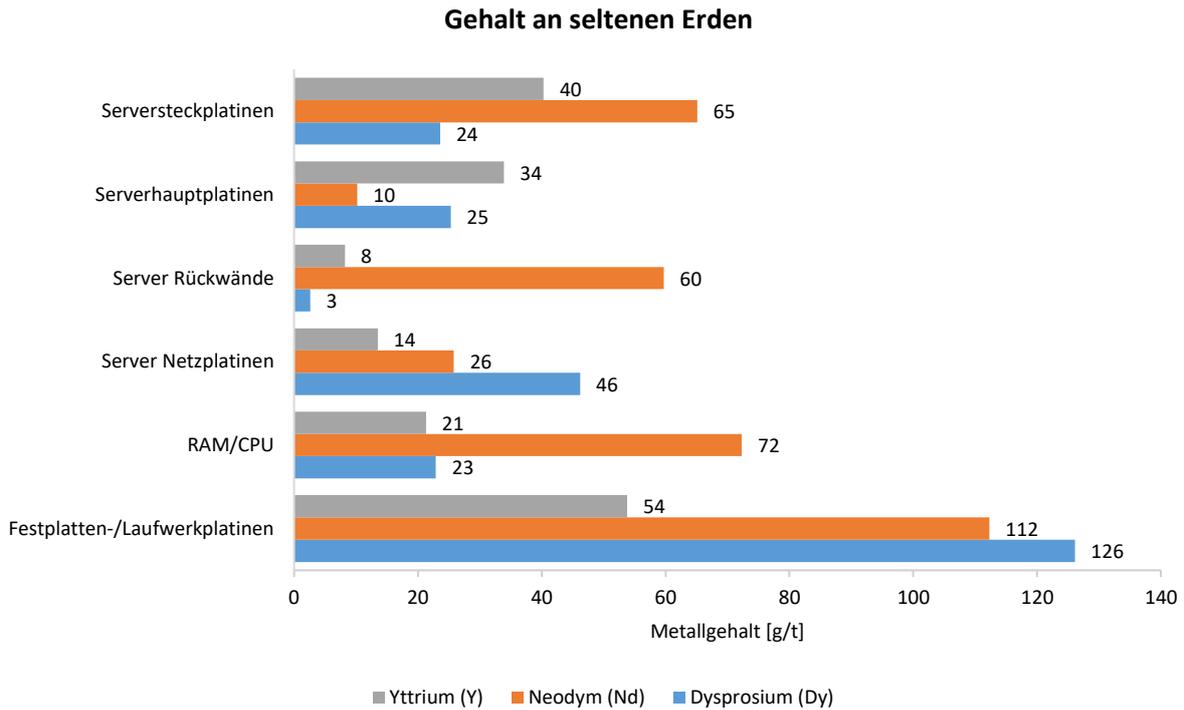
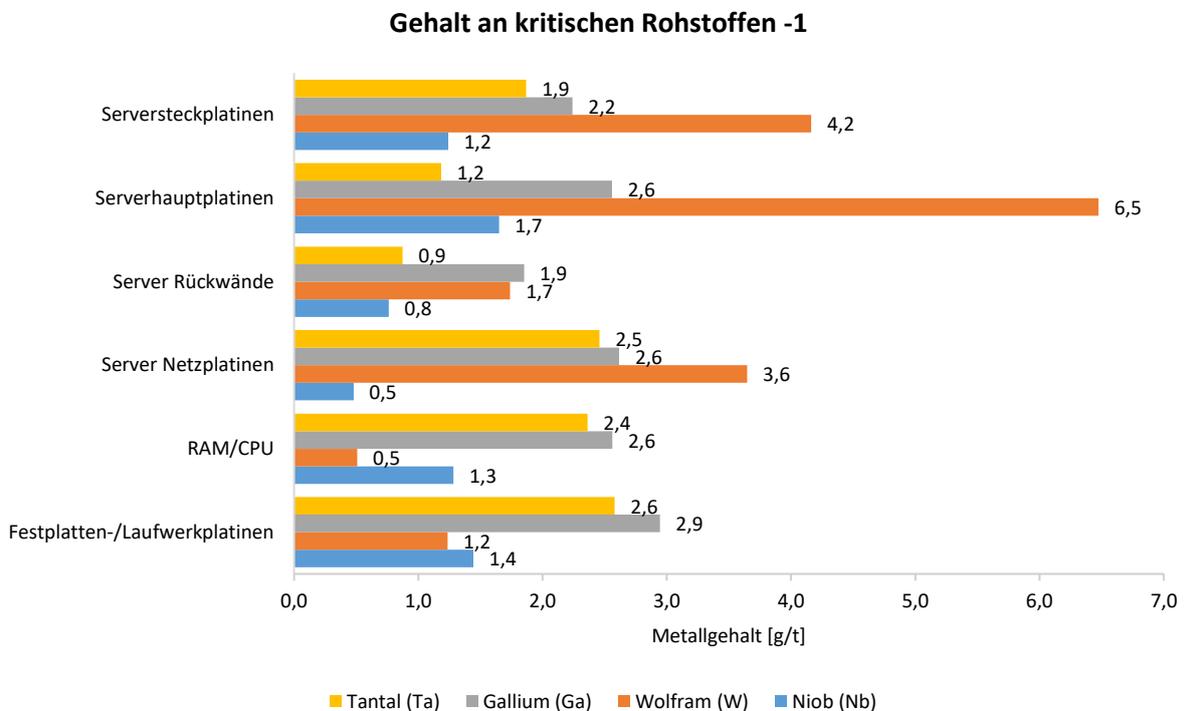
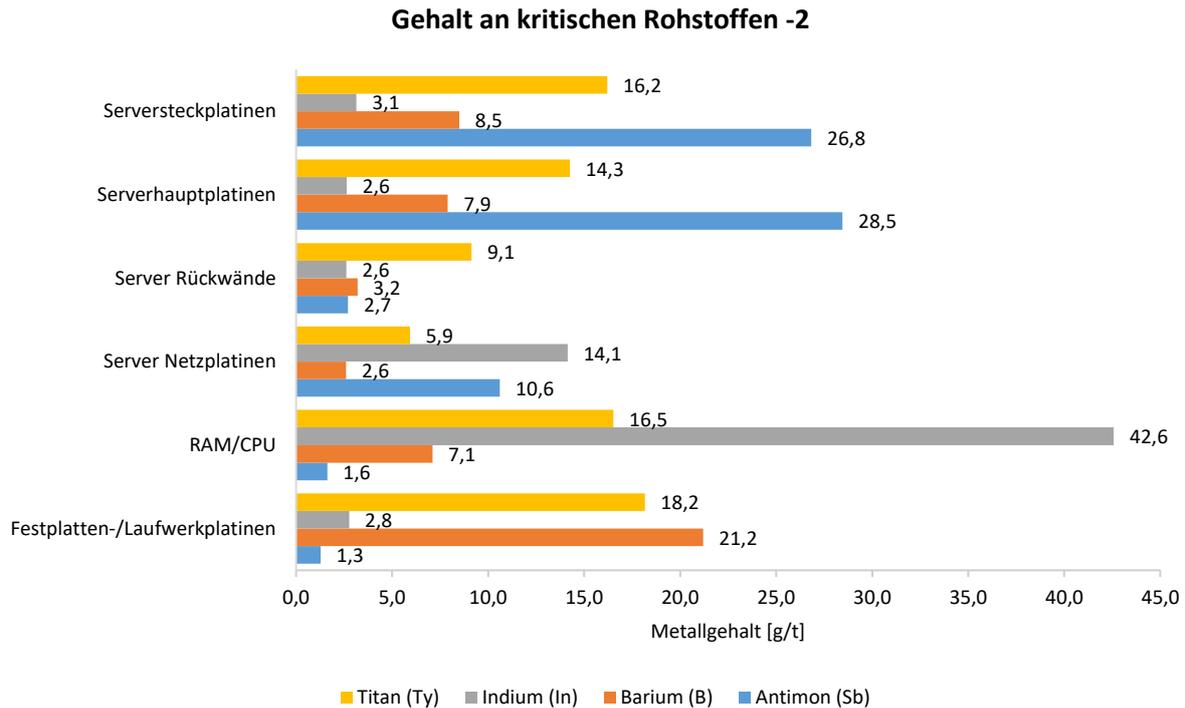


Abbildung 15: Anteil seltener Erden in Serverkomponenten

Wie erwartet wurde, ist der höchste Gehalt an Seltenerdelementen wie Neodym und Dysprosium in Festplatten-/Laufwerkplatinen enthalten und entspricht 112,3 g/t bzw. 126,1 g/t.





Der Gehalt an Antimon erreichte fast 3000 g/t in den Serverhauptplatinen und Serversteckplatinen. Dies kann auf die höhere Subfraktion des Kunststoffes in diesen Teilen zurückzuführen sein und das dominierte den Antimongehalt. Die Konzentration von Antimon in den Quellen von Elektronikschrott liegt im Bereich von 1238 bis 4600 g/t [1]. Für den RAM/CPU Komponenten ist der Indiumgehalt im Vergleich zu anderen Komponenten am höchsten. Da das meiste Indium in verschiedenen Displays zu finden ist, könnte eine so hohe Konzentration für RAM und CPUs auf einen experimentellen Fehler zurückzuführen sein.

Insgesamt lieferte die durchgeführte Analyse eine umfassende Bewertung über den Gehalt an Basisstoffe und kritischen Metallen in verschiedenen Serverkomponenten und zeigte, dass diese Geräte erhebliche Mengen an recycelbaren Metallen enthalten. Das Rohstoffpotenzial kritischer Rohstoffe und Edelmetalle in der Betrachtung des potenziellen Sekundärrohstoffgehalts liegt massenbetrachtet deutlich unter dem Rohstoffgehalt der Basisstoffe. Dennoch ist das Rohstoffpotenzial als CO₂-Einsparpotenzial von kritischen Rohstoffen und Edelmetallen höher als von den Basisstoffen. Die Abschätzungen des Rohstoffpotenzials zeigen deutlich, dass eine Nutzung des Rohstoffpotenzials durch das Recycling, insbesondere kritischer Rohstoffe, lohnend wäre.

Tabelle 10: CO2 Einsparpotential für ausgewählte Elementen.

Metall	CO ₂ [kg/kg _{Metall}]			Einsparung [%]
	Primärabbau	Recycling	Einsparung	
Gold	16 991 ²	5 097,3	11 893,7	70 ⁶
Silber	150 ⁴	30	120 ⁴	80
Palladium	7 221 ⁷	788 ⁷	6 433	89
Gallium	186,1 ³	42,4	143,7	77*
Indium	142 ²	42,6	99,4	70 ⁶
Neodym	150 ⁵	30 ⁵	120 ⁵	80 ⁵
Yttrium	150 ⁵	30 ⁵	120 ⁵	80 ⁵
Tantal	150 ⁵	30 ⁵	120 ⁵	80 ⁵

2 Hagelücken und Meskers (2009)

3 Giegrich et al. (2012)

4 Bräuninger (2015)

5 Abschätzung auf Grundlage von Sander et al. (2012)

6 Tytgat (2009)

* Auf Grund fehlender Daten zum Recycling von Gallium, arithmetischer Mittelwert der anderen Faktoren verwendet

7 Lucas und Wilts (2011)

Die Ergebnisse lassen sich mit den vorhergehenden Daten aus dem Rohstoffgehalt von Literaturquellen vergleichen, um die Änderungen in die Werte zu visualisieren. Abbildung 16 und Abbildung 17 zeigen den Unterschied für die gemessenen Werte. Einige Metalle fehlten in den Quellen, und wurden erstmalig durch das Projekt untersucht.

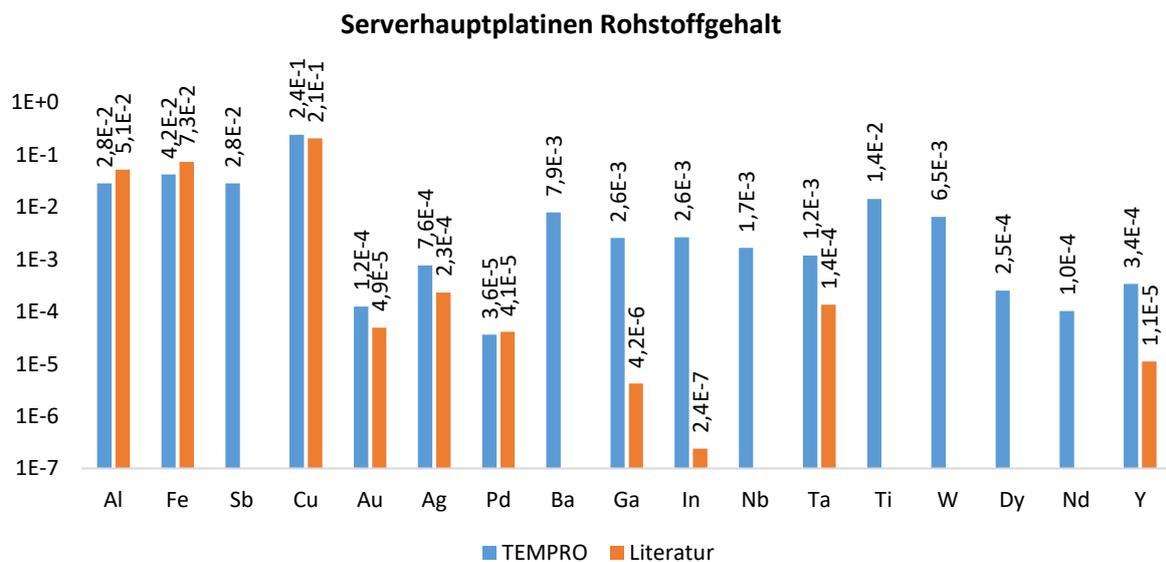


Abbildung 16. Unterschied von Daten der Ergebnisse aus TEMPRO mit den vorhandenen Daten aus Literatur für Serverhauptplatinen.

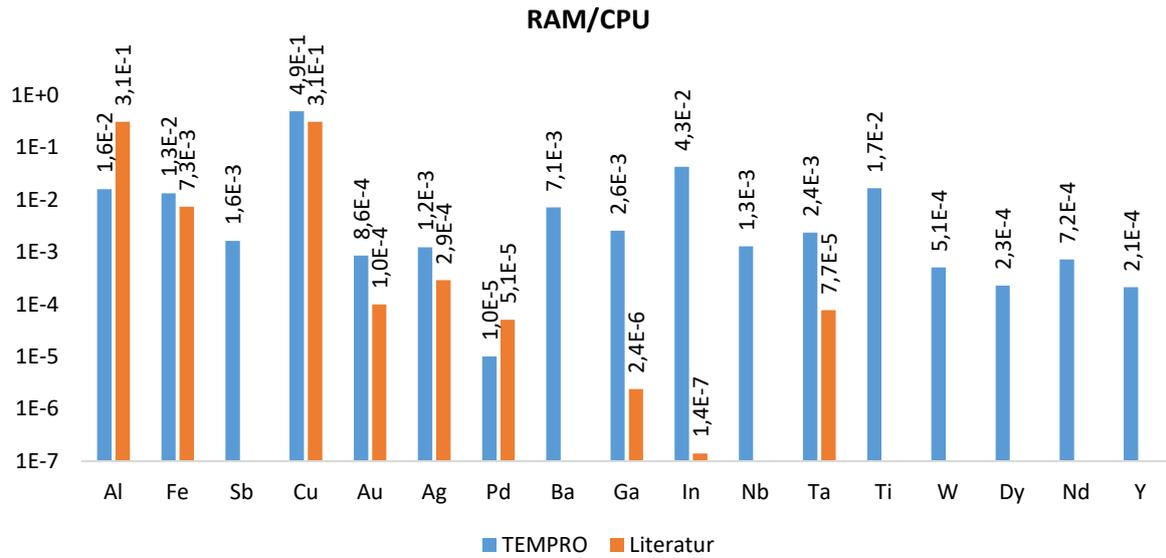


Abbildung 17. Unterschied von Daten zwischen den Ergebnissen von TEMPRO und den vorhandenen Daten aus Literatur für RAM/CPU.

Der Anteil von Basismetallen wie Al und Fe ist niedriger als in der Literatur angegeben. Im Gegenteil sind die Werte der Edelmetalle wie Au, Ag, und kritischen Rohstoffen höher. Werte für Seltene Erden und sonstigen kritischen Rohstoffen wie Ti und W wurden erstmal für Rechenzentren hier berichtet.

Tabelle 11: Übersicht AP 2

Übersicht AP 2	
	Start: 1. Monat Dauer: 36 Monate
Titel	Wechselwirkungen und gegenseitigen Abhängigkeiten von Rohstoff- und Energieeffizienz
Zielsetzung	Analyse von Wechselwirkungen und gegenseitigen Abhängigkeiten von Rohstoff- und Energieeffizienz
Federführender Partner	UOL-CCU
Unterarbeitspakete	<ul style="list-style-type: none"> ▪ AP 2.1: Evaluierung geeigneter Modellierungssprachen und Tools für die Lebenszyklusbetrachtung (UOL-CCU, TUHH) ▪ AP 2.2: Analyse, Bewertung und Auswahl geeigneter Geräte und Anlagen für die cradle-to-grave-Betrachtung (UOL-CCU, TUHH) ▪ AP 2.3: Cradle-to-grave-Analyse der ausgewählten Geräte und Anlagen (UOL-CCU, TUHH) ▪ AP 2.4: Analyse von Konzepten zur kaskadierenden Nutzung von IKT-Geräten in Rechenzentren zur Erreichung maximaler Energieeffizienz (UOL-CCU, TUHH, Mairec)
Ergebnisse	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kriterienkatalog für Materialbedarfe in Produktlebenszyklen der IKT-Geräte und Anlagen in Rechenzentren ▪ Dokumentation der Auswahlkriterien der konkreten IKT-Geräte und Anlagen ▪ Ausgewählte dokumentierte cradle-to-grave Lebenszyklusanalysen von IKT-Geräten und Anlagen (Meilenstein 5)

AP2.1: Evaluierung geeigneter Modellierungssprachen und Tools für die Lebenszyklusbetrachtung

Für die Bewertung des Ressourcenverbrauchs von Komponenten von professionellen Rechenzentren werden entsprechende Software-Tools erforderlich, um Modelle zu entwickeln, die die Lebensdauer der Komponenten darstellen. Diese Werkzeuge werden in Verbindung mit den Ergebnissen der Forschung über Materialgehalt verwendet, um den Ressourcenverbrauch und die verschiedenen Szenarien für die End-Of-Life zu evaluieren.

2.1.1. Software

Es gibt verschiedene Modellierungssoftware-Tools, die verwendet werden können, um LCA-Modelle zu entwickeln und um Umweltauswirkungen zu berechnen. Diese Software verwendet umfangreiche Datenbanken, die Informationen über die Produktprozesse, ihre individuellen input/output Flüsse, und die damit verbundenen Auswirkungen enthalten. In einigen Fällen werden die Datenbanken in die Software integriert.

Ormazabal et al. (2014) präsentieren eine umfassende Liste der verfügbaren Software für LCA Modellierung. Eines der Kriterien für die Auswahl von einer Software ist, dass diese Open Source ist. Dies ermöglicht eine Automatisierung der Modelbauprozesse und der Berechnung und Speicherung der Ergebnisse.

In diesem Kontext wurde openLCA, entwickelt von GreenDelta GmbH, als Modellierungswerkzeug ausgewählt. Es stellt eine benutzerfreundliche Oberfläche und die Möglichkeit, alle Stufen der LCA zu berechnen. Ein weiterer Vorteil dieses Werkzeugs ist, dass es die Möglichkeit bietet, die Arbeit mit verschiedenen anderen Datenbanken zu verknüpfen, wie GaBi, ecoinvent, ProBas, u.a.

Ein wesentlicher Vorteil der openLCA Software ist sein Open-Source-Code (<https://github.com/GreenDelta/olca-app>). Es ermöglicht die Handhabung der Modelle eine Verbindung mit verschiedenen Datenbanken zu erstellen, und die Berechnung der Ergebnisse zu automatisieren.

2.1.2. LCI – LCIA Datenbanken

Von den aktuellen in der scientific community verwendeten Datenbanken sind die am bekanntesten GaBi und ecoinvent-Datenbanken. Die ecoinvent Datenbank ist kompatibel mit der openLCA Software. In TEMPRO wurde die Version 3.4 für die Modellierung der Prozesse benutzt. Es enthält aktualisierte Informationen über Energiemixe und industrielle Produktionsprozesse für IKT und Elektronik-Komponenten, wenn auch nicht auf Komponenten für Rechenzentren konzentriert. Darüber hinaus bietet sie eine Sammlung von Methoden zur Bewertung der Umweltauswirkungen.

2.1.3. Programmiersprachen

openLCA wurde in Java entwickelt, und präsentiert auch Möglichkeiten durch Python kontrolliert zu werden. Java wird dann zur Entwicklung von Anwendungen für die Automatisierung der Modellerstellung und Interaktion mit Datenbanken benutzt. Die Ergebnisse aus der Materialzusammensetzung und aus der Teilezusammensetzung der Geräte von Rechenzentren werden zunächst in relationalen Datenbanken gespeichert. Aus diesem Grund wurde entschieden, die zur Verfügung gestellten Informationen aus AP1 in eine in dem IT-Bereich verwendete Datenbankenprogrammiersprache zu übertragen. Die ausgewählte Sprache war SQL, die für „Structured Query Language“ steht.

Anwendungen in Java wurden in TEMPRO entwickelt, um die SQL und die ecoinvent Datenbanken zu verbinden, um Modelle von verschiedenen Teilen, Systemen, und Rechenzentren zu bauen. Dies ermöglicht auch Berechnungen, um den Ressourcenverbrauch und die Umweltauswirkungen von Rechenzentren und deren Komponenten zu bewerten. Die Ergebnisse werden dann in SQL-Datenbanken zur weiteren Analyse gespeichert. Für Datenanalysen ist es möglich Python 3.7 zu integrieren, da es geeignet für eine Analyse von großen Datenbanken ist.

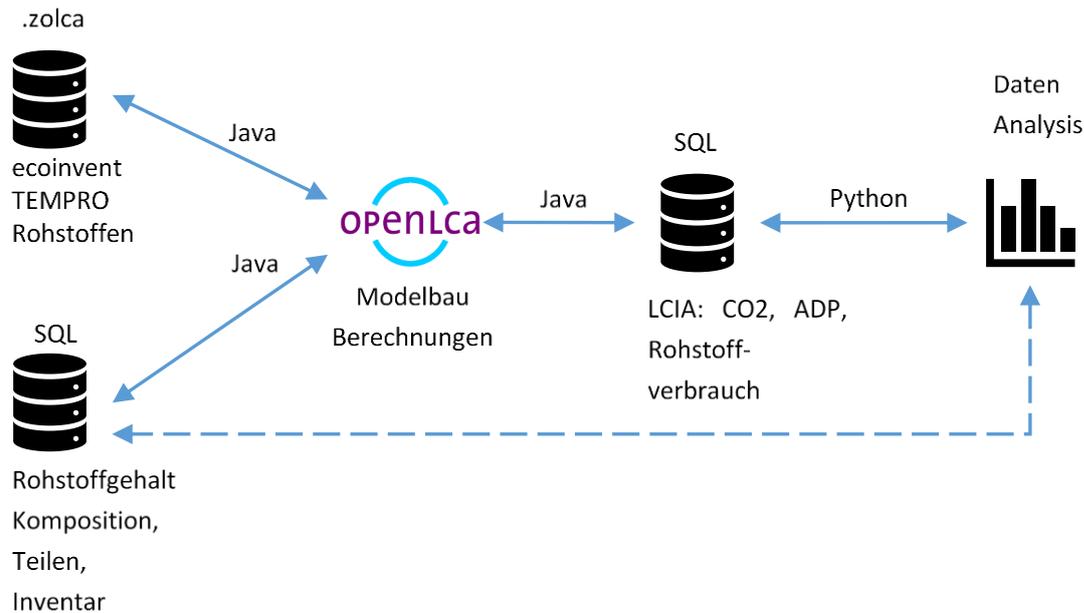


Abbildung 18. Diagramm des Datenfluss für die Lebenszyklusanalyse für RZ und Komponenten.

AP2.2: Analyse, Bewertung und Auswahl geeigneter Geräte und Anlagen für die cradle-to-grave-Betrachtung

Im Rahmen der Aktivitäten des Arbeitspakets 2 (AP2) wurden Lebenszyklusanalysen (LCA) von den Informations- und Kommunikationstechnologiekomponenten (IKT) von Professionellen Rechenzentren (PRZ) durchgeführt. Indikatoren wie der kumulierte Primärenergieaufwand (KEA), der kumulierte Rohstoffaufwand (KRA), und CO₂-Emissionen wurden ausgewertet, was zu Indikatoren für Energie- und Materialintensität für die analysierten Geräte führt.

Im Kontext dieses APs soll analysiert werden, wie sich die Energie- und Materialbedarfe in Komponenten von professionellen Rechenzentren auf die verschiedenen Phasen des Lebenszyklus aufteilen und welche Wechselwirkungen zwischen Rohstoff- und Energieeffizienz bestehen. Verschiedene Komponenten eines PRZs werden analysiert, um den gesamten Energiebedarf (einschließlich aus verschiedenen Phasen außerhalb der Betriebsphase) hochzurechnen. Indikatoren wie KRA und KEA werden berechnet, zusammen mit anderen Indikatoren von Umweltauswirkungen, wie CO₂.

a. Klassifizierung der Komponenten eines PRZs

Die Strukturen verschiedener PRZ unterscheiden sich deutlich, denn kann eine gemeinsame Klassifizierung nach der Größe (m²), nach installierter Leistung der IKT (kW), oder nach installierter Gesamtleistung (einschließlich aller Anlagen, kW) vorgenommen werden. Diese Informationen geben keinen Rückschluss auf Anzahl und Art der in der Einrichtung enthaltenen Geräte oder zu den verschiedenen Aspekten der PRZ-Konfiguration, z. B. Redundanz, Kühltechnologien und -typ, Sicherheit oder Stromquelle. Zusätzliche Informationen, die für die Abschätzung von KEA und KRA relevant sind, wie z. B. individueller Energieverbrauch, Betriebslebensdauer, oder Energieumwandlungseffizienz der Energieversorgung, sind normalerweise nicht verfügbar. Für eine Analyse der Indikatoren eines PRZ wird eine individuelle Analyse der verschiedenen Komponenten

entwickelt, um Indikatoren zu erhalten, die für eine erste Abschätzung einer Einrichtung aggregiert und extrapoliert werden können.

Die verschiedenen Elemente können je nach ihrer Anwendung und Rolle in einem PRZ kategorisiert werden: IKT, Elektrische Energieversorgung, Kühlung und Infrastruktur (Siehe Abbildung 19)

Um den Materialverbrauch zu bestimmen, wurde der gesamte Materialgehalt und sein Recyclingpotenzial anhand der früheren Ergebnisse des TEMPRO Vorhabens bewertet (Szczepaniak 2018; Peñaherrera et al. 2018). Verschiedene Szenarien für Recyclingquoten und Rückgewinnungsprozesse wurden erstellt, um das Einsparpotenzial zu analysieren, das die Rückgewinnung von Edelmetallen bei der Schonung von Ressourcen und der Reduzierung von Umweltbelastungen haben kann.

Die entwickelten Indikatoren erfordern Anwendungen in größerem Maßstab und eine Verbesserung der Datenerfassungsmethoden. Sie können angewendet werden, um den Ressourcenverbrauch und die Ressourcenverfügbarkeit von PRZ in Deutschland zu bewerten.

Die verschiedenen Komponenten eines RZ sind als „High Grade EEE“ kategorisiert, da der Inhalt von hochwertigen Materialien stark konzentriert ist (Bigum et al. 2012). Die Analyse von AP1 zeigt eine wichtige Konzentration von Präzisionsmetallen und kritischen Metallen (KM) an. Szczepaniak (2018) führte eine detaillierte Analyse der materiellen und elementaren Zusammensetzung der Einheit durch. Innerhalb der untersuchten Materialien werden unedle Metalle (Fe, Cu, Al, Zn) und Kunststoff (für Formteile) als Basismaterialien zugeordnet. Als Edelmetalle gelten Au und Ag. Gemäß Definition der Europäischen Union werden folgende kritischen Rohstoffe (KR) berücksichtigt (European Commission 2017a): Platingruppenmetalle (Pd, Pt), leichte Seltenerdelemente (Nd), schwere Seltenerdelemente (Y) und zusätzlich Ta, W, Ga, In, Sn, Be, und Co. Es wird erwartet, dass diese Materialien in Rechenzentren verwendet werden. Pb und Li werden aufgrund ihres Einsatzes in Batterien als strategische Wertmetalle eingestuft.

Für die Evaluierung des Ressourcenverbrauchs, wurden LCA durchgeführt, um den gesamten Ressourcenverbrauch einer Komponente zu ermitteln. Eine Ökobilanz erlaubt auch die Betrachtung von EOL Szenarien, die unterschiedliche Recyclingfaktoren berücksichtigen. Solche Szenarien wurden durch den Indikator Ressourcenverbrauch pro kg verglichen. Es gibt in der LCA verschiedene Indikatoren zum Materialressourcenverbrauch, die die Problematik von „Rohstofferschöpfung“ adressieren (Schneider et al. 2015). Die Verfügbarkeit von Ressourcen ist eine relevante Variable bei der Entscheidungsfindung auf Produktebene. LCA hat sich als wertvolles Instrument zur Bewertung des Ressourcenverbrauchs erwiesen; und es existieren verschiedene Modelle für die Bewertung der Ressourcenverfügbarkeit in Ökobilanzen.

Um den Ressourcenverbrauch abzuschätzen, müssen nun geeignete Indikatoren ausgewählt werden, die die Auswirkungen der Ressourcennutzung auf die Verfügbarkeit von Ressourcenvorräten aufzeigen. Tabelle 12 zeigt eine Liste verschiedener Indikatoren, die als Ergebnisse der LCA berechnet werden.

Tabelle 12.: LCA Indikatoren für Ressourcenverbrauch.

Methode	Indikator	Abkurz.	Einheit
CML 2001	resources -depletion of abiotic resources	ARD	kg Sb-eq
Cumulative Exergy Demand	minerals-nonrenewable material resources	KExA	MJ-Eq
eco-indicator	resource -mineral extraction	ME	points
ecological scarcity 2013	mineral resources - total	MR	UBP
EDIP 2003	nonrenewable resource depletion	EDIP	kg
ILCD 1.0.8	resources - mineral, fossils and renewable	Res	kg-Sb-eq
IMPACT 2002 Endpoint	resources mineral extraction	RME	points
Recipe Midpoint	metal depletion	MD	points
CED	energy	KEA	KJ-Eq

Von diesen Methoden wurden für AP 2 CML 2001 und EDIP 2003 verwendet. Der Indikator „abiotic resources depletion“ (ARD) basiert auf der Beziehung der Extraktionsrate zu verfügbaren Ressourcenbeständen in der Geosphäre, normiert auf einen einzelnen Indikator für die verschiedenen Materialien (Schneider et al. 2015). Die EDIP-Methode bewertet die Ressourcenerschöpfung in Kilogramm und setzt die extrahierte Menge in Relation zu den als wirtschaftlichen Reserve gegebenen Einzahlungen der jeweiligen Ressource (Hauschild und José Potting 2004). Im Gegensatz zur CML-Methode spiegelt der EDIP-Ansatz nicht die aktuelle Bedeutung einer Ressource wider, da die Extraktionsraten unberücksichtigt bleiben (Klinglmair et al. 2014).

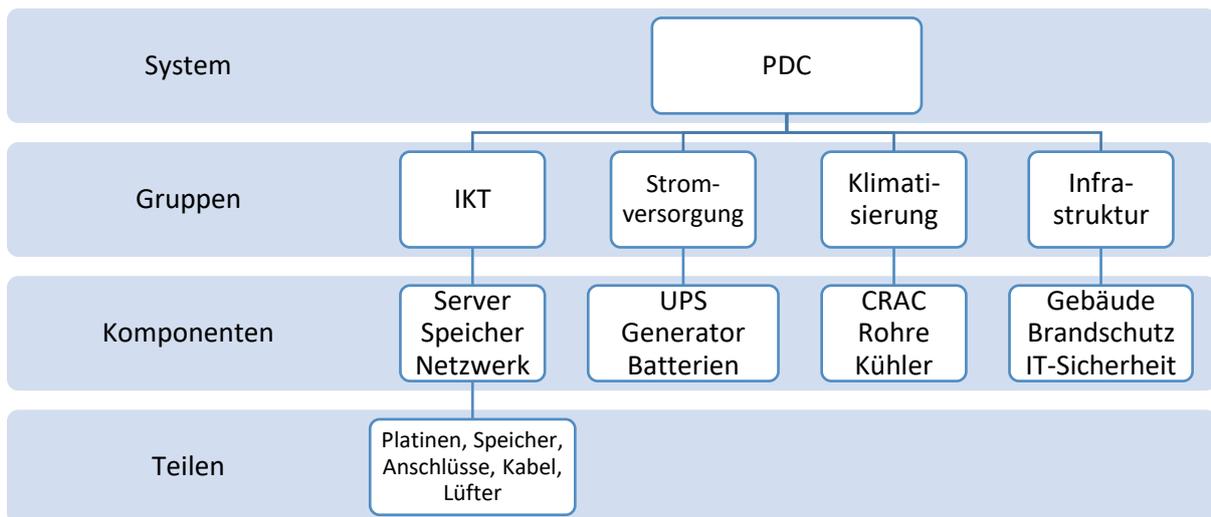


Abbildung 19: Komponenten eines PRZ. Quelle: Szczepaniak und Hobohm (2017)

Die Analyse fokussiert sich auf die IKT-Technologien aufgrund der kurzen Lebensdauer der Geräte und ihres hohen betrieblichen Energieverbrauchs.

AP2.3: Cradle-to-grave-Analyse der ausgewählten Geräte und Anlagen

Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Material-, Teile- und Komponentenanforderungen für die Herstellung von Rechenzentrumskomponenten wurde eine Analyse durchgeführt, um die unterschiedlichen Energie- und Ressourcenbedarfe auf verschiedene Ebenen zu berechnen. Ziel ist es, eine Bewertung der verschiedenen Komponenten eines Rechenzentrums von der Material- bis zur Anlagenebene zu erhalten, und das Potenzial der Materialrückgewinnung dieser Komponenten in einem gesamten Rechenzentrum zu ermitteln und festzustellen, wo sich diese Materialien befinden.

Die Ergebnisse werden in relationalen Datenbanken gespeichert, um eine Erweiterung und Aktualisierung der Komposition und der Geräte zu ermöglichen.

Diese Disaggregation der Komponenten ermöglicht die Cradle-to-Grave-Analyse verschiedener Geräte auf der Grundlage ihrer Zusammensetzung und die Identifizierung des Materialverbrauchs sowie der erzielbaren Materialausgaben von Recyclingprozessen durch Modellierung verschiedener Wiederherstellungsprozessen.

2.3.1. Rohstoffebene

Auf Rohstoffebene werden bei der Analyse die Rohstoffe unter Berücksichtigung der Critical Material List (Liste der kritischen Rohstoffe) der EU berücksichtigt (European Commission 2017b). Diese Liste wird herangezogen, um Modelle der zu analysierenden Rohstoffe zu entwickeln.

Die verschiedenen Werkstoffe werden nach ihrer Klassifizierung eingeordnet: Grundmetalle, Edelmetalle, Metalle der Platingruppe (PGM), leichte Seltenerdmetalle (LREEE), schwere Seltenerdmetalle (HREEE), sowie sonstige Metalle. Dies ermöglicht es, sie nach ihrer Anwendung zu gruppieren und die Materialien nach ihrer Quelle zu ordnen. Die Informationen sind mit den Kritikalitätswerten verknüpft, sodass auch Informationen zur wirtschaftlichen Bedeutung und zum Versorgungsrisiko verfügbar sind.

Informationen zum Inventar für die Herstellung von Materialien in seiner kommerziellen Form variieren je nach Quelle und Qualität. Informationen zum Produktlebenszyklus einiger weit verbreiteter Materialien wie Aluminium, Kupfer und Eisen sind bereits in der ecoinvent 3.4-Datenbank enthalten (Wernet et al. 2016). Auf dieser Grundlage werden Modelle aus diesen Materialien entwickelt, wobei die Produktionsmischungen aus unterschiedlichen Materialquellen berücksichtigt werden, um die Umweltauswirkungen den Materialquellen zuzuordnen.

Informationen zu Materialien wie Zirkon, Blei oder den Seltenerdelementen fehlen in der ecoinvent 3.4 Datenbank oder wurden als Nebenprodukte aus Bergbautätigkeiten zusammengestellt, die gemischte Ergebnisse lieferten. Für diese Materialien werden Informationen zu LCI aus spezifischen Studien zusammengetragen, um Modelle für die verschiedenen Prozesse zu erstellen, die für den Abbau und die Verarbeitung des Materials erforderlich sind. In Fällen, in denen bei Bergbau- und Raffinerietätigkeiten mehrere Materialien anfallen, bietet die wirtschaftliche Aufteilung der Umweltauswirkungen und des Ressourcenverbrauchs eine Methode zur Zuordnung der Gesamtauswirkungen dieser Materialien (Nuss und Eckelman 2014). Die Faktoren für die wirtschaftliche Allokation werden aus Informationen über den wirtschaftlichen Wert der Produktionsgüter abgeleitet und mit dem Massenanteil jedes Produkts kombiniert.

Die Informationen zu diesen Prozessmodellen werden in einer zolca-Datenbank (Compressed Database für openLCA) zusammen mit Informationen zu wirtschaftlichen und physikalischen Zuordnungsfaktoren in einer SQL-Datenbank gespeichert. Die Ergebnisse wurden mit der openLCA 1.8-Berechnungseingine berechnet und in der SQL-Datenbank gespeichert. Abbildung 20 zeigt ein Beispiel der Ergebnisse für die Treibhausemissionen (GWP-kg_{CO2-eq}) der untersuchten Materialien.

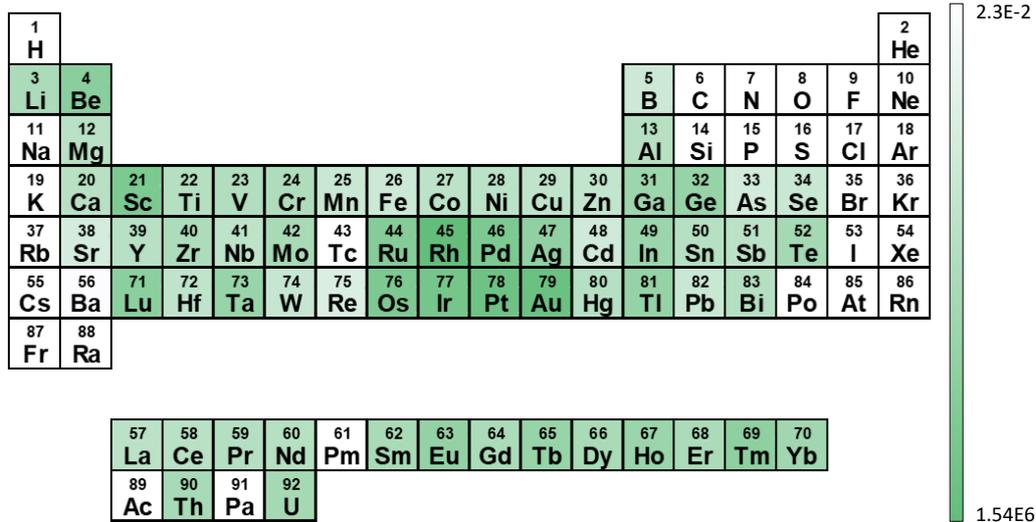


Abbildung 20: Treibhausemissionen (GWP-kg_{CO2-eq}) der untersuchten Materialien pro Kilogramm. Logarithmische farbige Skalierung.

2.3.2. Stückebene

Die Stückkategorie umfasst Komponenten, die zur Montage verschiedener Teile genutzt werden können, z.B. Kondensatoren, Dioden, Integrated Circuits, Magnete, usw.

Lebenszyklusinventare für diese Stücke wurden aus der ecoinvent 3.4 Datenbank und aus der ProBas+ Datenbank gesammelt (UBA 2019), und aus LCI-Informationen für Prozesse abgeleitet, die in diesen Datenbanken nicht vorhanden sind, z. B. Magnete. Das LCI umfasst verschiedene Stufen zur Herstellung und Produktion solcher Komponenten. Die Modelle wurden mit einer der Komponente entsprechenden Bezugseinheit wie z. B. Kilogramm ausgestattet.

Informationen zu diesen Stücken ermöglichen die Identifizierung von den Stücken, für deren Herstellung die meisten Ressourcen benötigt werden, sowie welche Stückkategorien die größten Auswirkungen haben. Die LCIA-Ergebnisse für verschiedene Kategorien zeigen, dass Integrated Circuits, Kondensatoren und Leiterplatten den höchsten Energieverbrauch pro Bezugseinheit aufweisen. Abbildung 21 zeigt die verschiedenen Stückkategorien und den kumulierten Energieaufwand (KEA- MJ_{eq}).

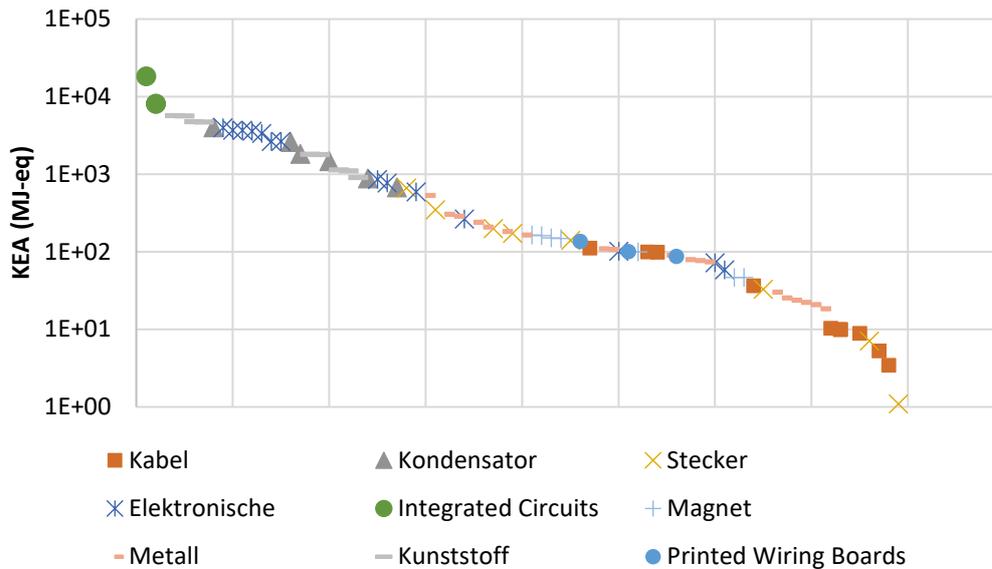


Abbildung 21: Kumulierter Energieaufwand (MJ_{eq}) der Stücke pro Referenz Einheit nach Kategorien. Logarithmische Skalierung.

2.3.3. Teilebene

Die Kategorie Teile enthält Elemente zusammengesetzter Formteile, wie z. B. Mainboards, Gehäuse, Batterien, Festplatten. Die Informationen zur Zusammensetzung dieser Teile werden durch die Ergebnisse der Demontage erhalten, die die Projektpartner von TEMPRO, aus der ecoinvent 3.4-Datenbank oder aus Literaturwerten erhalten haben. Die Werte werden zum Vergleich der Teile auf die Bezugseinheit (Kilogramm, Meter, Anzahl der Teile) normiert.

Die Lifecycle Impact Assessment ermöglicht es, den Beitragsbaum für jedes Teil zu identifizieren und auf die Komponente zu verweisen, die innerhalb des Produktsystems die meisten Ergebnisse erzielt. Abbildung 22 zeigt den abiotischen Ressourcenverbrauch ($kg_{sb-Äq}$) pro Kilogramm für unterschiedliche Teilekategorien.

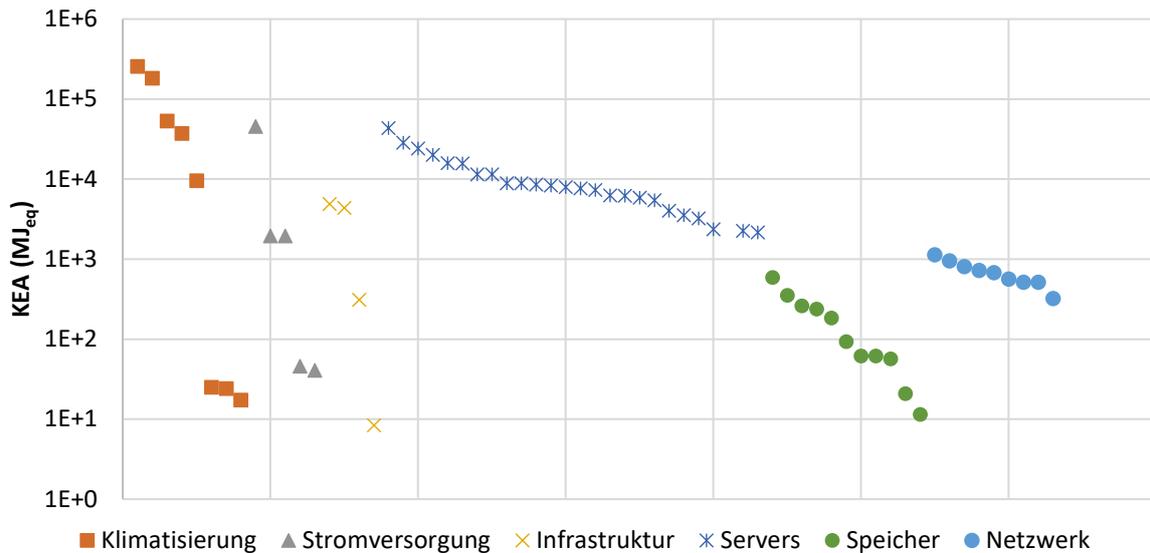


Abbildung 23: Kumulierter Energieaufwand für die Geräte (MJ_{eq}). Logarithmische Skalierung.

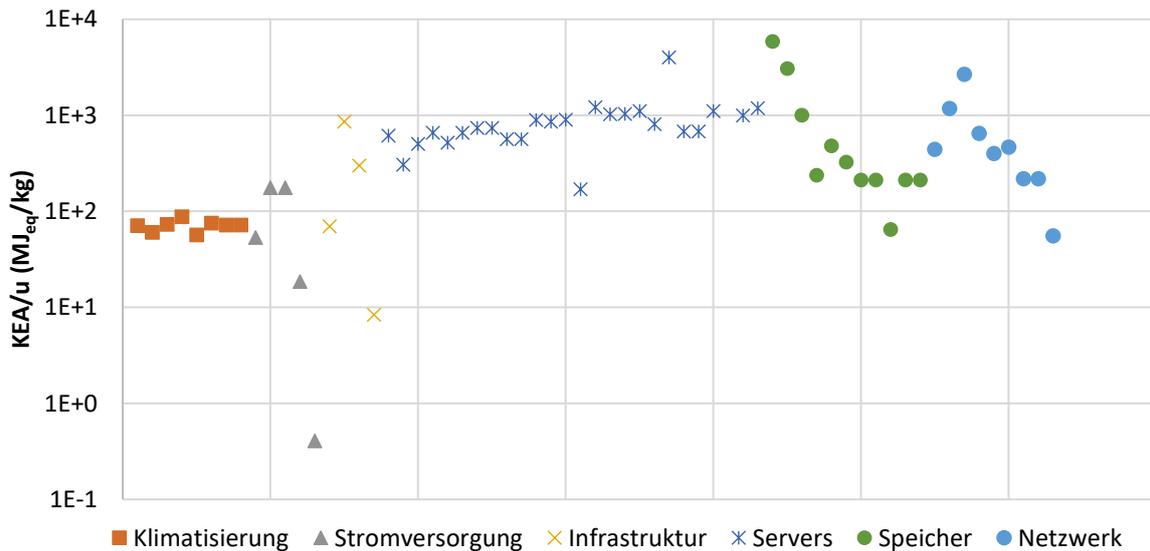


Abbildung 24: Normierter kumulierter Energieaufwand der Geräte (MJ_{eq}/kg). Logarithmische Skalierung.

2.3.5. Systemebene

Die verschiedenen Komponenten eines Rechenzentrums werden entsprechend ihrer Systeme innerhalb der Einrichtung zusammengefasst: IT; Stromversorgung, Klimatisierung und Infrastruktur.

Da die Zusammensetzung der einzelnen Rechenzentren unterschiedlich ist, werden Informationen zu den verschiedenen Geräten und Teilen der verschiedenen Systeme durch Sammeln von Inventarinformationen aus den Rechenzentren der Projektpartner im TEMPRO-Projekt abgerufen. Die Informationen zum Inventar eines bestimmten Rechenzentrums werden in der SQL-Datenbank gespeichert. Auf diese Weise können die Informationen geändert und erweitert werden, wenn das Inventar aktualisiert wird. Es ermöglicht auch einen Vergleich zwischen dem Gesamtmaterialgehalt

verschiedener Systeme und der für die Herstellung und Produktion der Komponenten erforderlichen Energie. Abbildung 25 zeigt die Ergebnisse zum Gesamtbeitrag der Gerätekategorien für das IT-System.

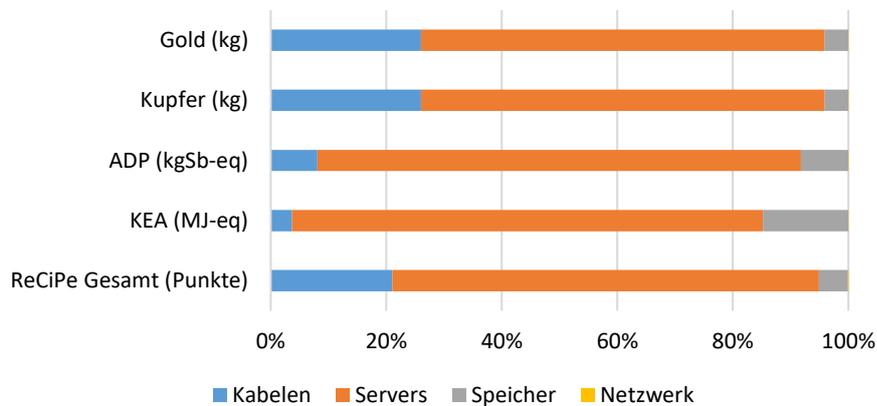


Abbildung 25: LCIA Ergebnisse für ausgewählte Kategorien für die IT-System.

2.3.6. Rechenzentrums Ebene

Auf dieser Ebene werden die Informationen der Systeme zusammengefasst und die Gesamtwirkungsergebnisse für die gesamte Anlage sowie der Gesamtmaterialgehalt (nach Material) und die Gesamtmenge der wiederverwertbaren Teile nach Kategorien bereitgestellt. Diese Informationen werden für die weitere Analyse zur Bewertung der insgesamt verwertbaren Materialien verwendet. Abbildung 26 zeigt die gesamten Ergebnisse für die Fallstudie.

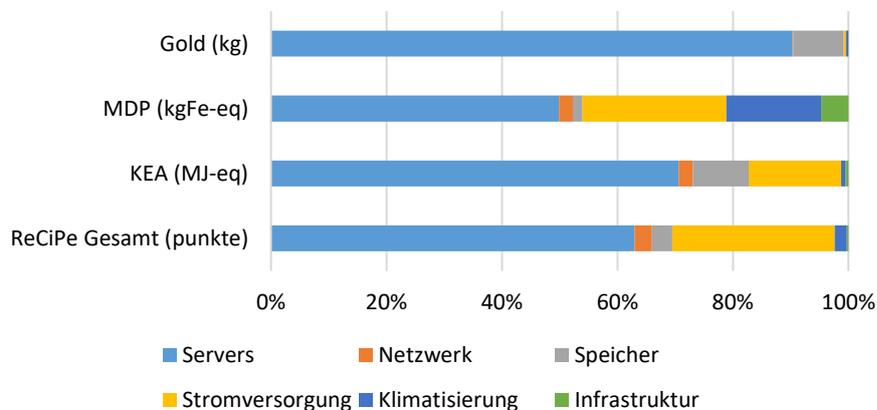


Abbildung 26: Gesamte Ergebnisse für die Fallstudie. (MDP = Metal Depletion Potential)

Die Normalisierung der Ergebnisse auf Masseneinheiten ermöglicht es, die Konzentration wertvoller Materialien im Rechenzentrum abzuschätzen. Für den Fall von Gold befindet sich die Hauptmehrheit in den Servereinheiten, wobei die Menge im analysierten Rechenzentrum auf 624 g geschätzt wird. Abbildung 27 zeigt die Goldkonzentration in den verschiedenen Systemen und Subsystemen des modellierten Rechenzentrums.

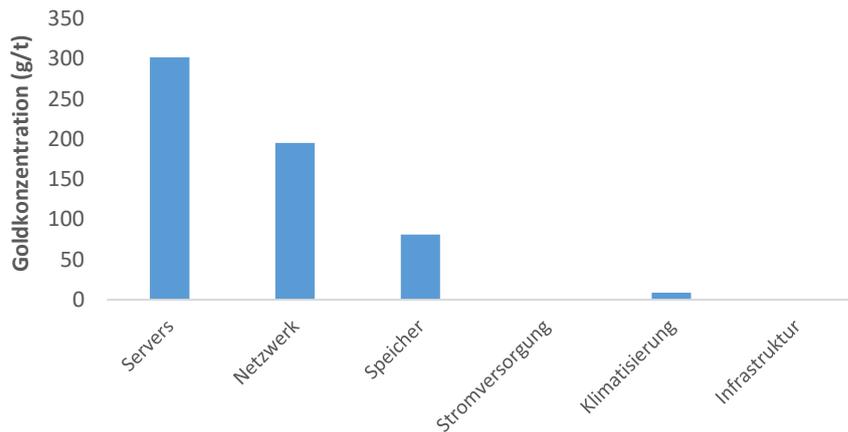


Abbildung 27: Goldkonzentration in den verschiedenen Systemen und Subsystemen des modellierten Rechenzentrums.

AP2.4: Analyse von Konzepten zur kaskadierenden Nutzung von IKT-Geräten in Rechenzentren zur Erreichung maximaler Energieeffizienz

2.4.1. LCA Modell für Materialverbrauch mit Betrachtung von Recycling

Im Falle von Metallen und Mineralien wurde das Recycling in den aktuellen Modellen nicht berücksichtigt. Recycling kann als Ergänzung des verfügbaren anthropogenen Bestands einer Ressource angesehen werden, wodurch die Extraktionsraten aus der natürlichen Umwelt verringert werden. Aus Sicht der Ressourcenverfügbarkeit aus natürlichen Lagerstätten ist dies ein grundlegender Aspekt der Ressourceneffizienz.

Für die Modellierung von Recycling-Szenarien können unterschiedliche Ansätze der Recyclingkette während des Produktlebenszyklus angewendet werden. Dies hängt davon ab, ob das recycelte Material verwendet wird, um den Verbrauch an raffiniertem Material für die gleiche Anwendung zu ersetzen, oder ob die recycelten Produkte in verschiedenen Anwendungen verwendet werden. Für einen ersten und vereinfachenden Ansatz wird angenommen, dass die recycelten Produkte verwendet werden, um den Verbrauch von Rohmaterial zu reduzieren, und somit vor der Produktion in die Lieferkette wieder eingeführt werden. Abbildung 28 zeigt diesen gemeinsamen Prozess.

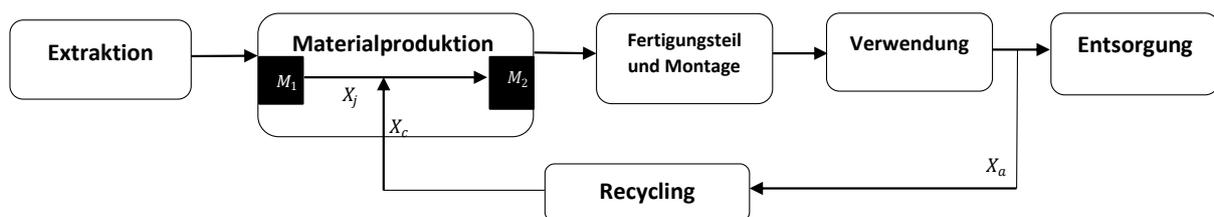


Abbildung 28. Recycling-Prozess eines EOL-Produkts (European Commission 2010).

Um diese Indikatoren für Materialeffizienz zu anwenden, wurde ein LCA Modell entwickelt, um die verschiedenen Recyclingszenarien zu modellieren. Im Fall von Rechenzentrums-Komponenten sind die Kritischen Metalle (KM) in Platinen konzentriert. Diese Komponenten verbrauchen auch den größten Teil des KEA der Produktionsphase. Um die Recyclingkette zu modellieren, müssen die Teilprozesse bekannt sein. Bigum et al. (2012) erstellten einen Prozess für das Recycling von High Grade WEEE, in dem Abfall von PRZ kategorisiert werden kann. Es wurde angenommen, dass die edelmetallreiche

Fraktion, die unter anderem Kupfer, Gold, Nickel, Palladium und Silber enthält, in einer integrierten metallurgischen Behandlungsanlage verarbeitet wird.

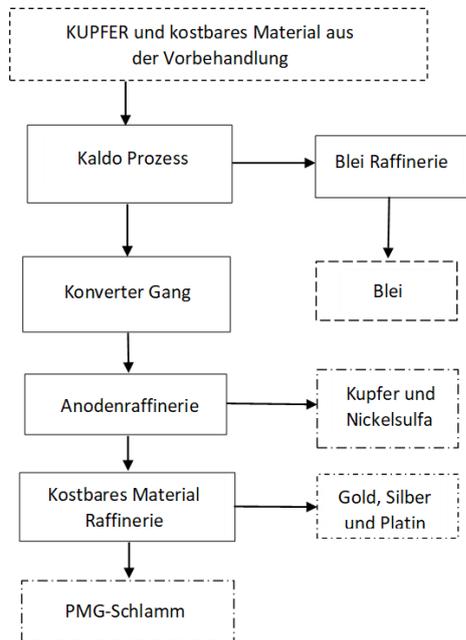


Abbildung 29. Schematische Darstellung der modellierten metallurgischen Anlage für das Recycling von WEEE (Bigum et al. 2012).

Das Modell wurde in openLCA auf Grundlage der ecoinvent 3.4 Datenbank erstellt (Abbildung 30). Die Daten zum Materialverbrauch wurden von den Ergebnissen aus AP1 genommen. Daten zu Recyclingeffizienz der Prozesse und zum Energieverbrauch wurden aus Bigum et al. (2012) sowie der Gabi Datenbank entnommen.

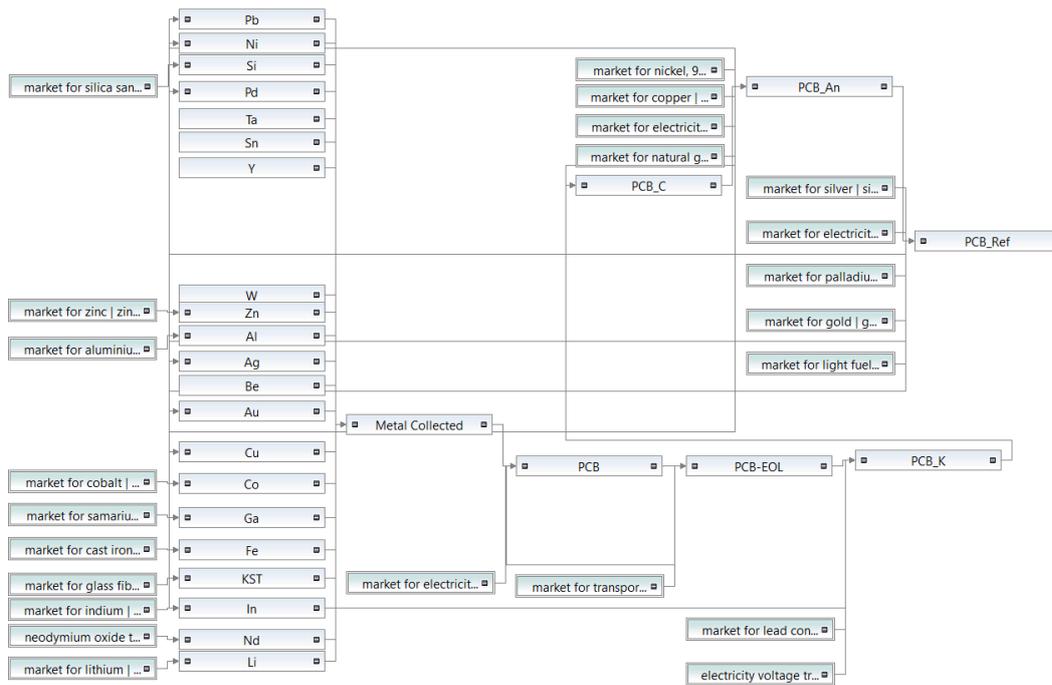


Abbildung 30. LCA Model für EOL.

Indikatoren für den Ressourcenverbrauch wurden in verschiedenen Szenarien berechnet. Die verschiedenen Indikatoren wurden normiert, um nichtdimensionale Einsparungen zu zeigen. Ebenso wurde der KEA berechnet, um die Beziehung zwischen Energie und Materialbedarf zu zeigen. Die Analyse des KEA beschränkte sich auf die Phasen der Materialgewinnung und EOL. Das EOL hat die Wiederverwendung der Platinen nicht in Betracht gezogen und die Nutzungsphase nicht berücksichtigt. Recycling-Sammelraten von 0 bis zu einem Ideal von 1 wurden angewendet, um das maximale Potential zu berücksichtigen. Abbildung 31 zeigt die ARD und KEA in verschiedenen Szenarien.

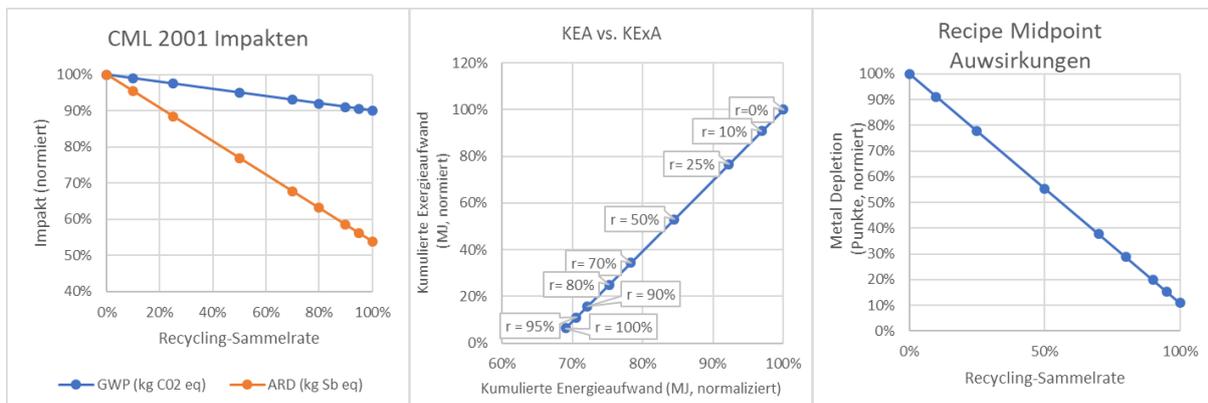


Abbildung 31. Ergebnisse der Analyse von Recycling-Szenarien.

Die Ergebnisse der Analyse des Materialverbrauchs deuten auf eine Verringerung der Auswirkungen von Rohstoffverbrauch durch Recycling hin. Die meisten Materialeinsparungen sind linear zu den simulierten Recyclingraten. Ein ideales Recycling-Szenario würde nur eine teilweise Rückgewinnung von Materialien aufgrund von Verlusten während der Produktionsstufen und aufgrund von Rückgewinnungsraten während der EOL-Prozesse ermöglichen. Nicht alle Materialien wurden für das

Recycling berücksichtigt; dies begrenzt die Ergebnisse des Modells. Die maximal mögliche Reduzierung auf ARD beträgt 46%.

Welche Auswirkungen das Recycling auf die verschiedenen Indikatoren hat, hängt davon ab, welche der Indikatoren betrachtet werden. Recycling hat einen höheren Einfluss auf die Reduzierung der ARD als auf die Einsparung von CO₂-Emissionen, da Energie- und Transportaufwand für den Recyclingprozess benötigt wird und nur bestimmte Materialien als Recyclingprodukte betrachtet werden.

Das Modell für das Recycling berücksichtigt die Rückgewinnung von Au, Ag, PGM, Cu und Pb. Die Reduzierung des Verbrauchs dieser Materialien wird als Hauptziel der Rückgewinnung von Metallen aus WEEE hoher Qualität angesehen (Bigum et al. 2012). Die richtige Rückgewinnung dieser Metalle reduziert die Auswirkungen der Metallverarmung erheblich (Abbildung 32).

Eine ähnliche Schlussfolgerung kann bei der Analyse der Beziehung zwischen KEA und KExA erhalten werden. Höhere Recyclingquoten senkten die KExA auf Werte unter 10%, die KEA wird jedoch nur auf rund 70% reduziert. Diese Beziehung zeigt, obwohl sie ein lineares Verhalten aufweist, dass ein Minimum an Primärenergie immer im Lebenszyklus berücksichtigt werden muss.

Die spezifische Reduzierung des Verbrauchs jeden Materials hängt davon ab, welche in Betracht gezogen wird (Abbildung 32). Im Vergleich zu Cu, Au, Pd, Ta, Ag, deren Primärverbrauch auf 80 bis 90% gesenkt werden konnte, erreichen einige Materialien wie Co, La und basische Metalle wie Fe, Al und Pb lediglich geringere Ressourceneinsparungen.

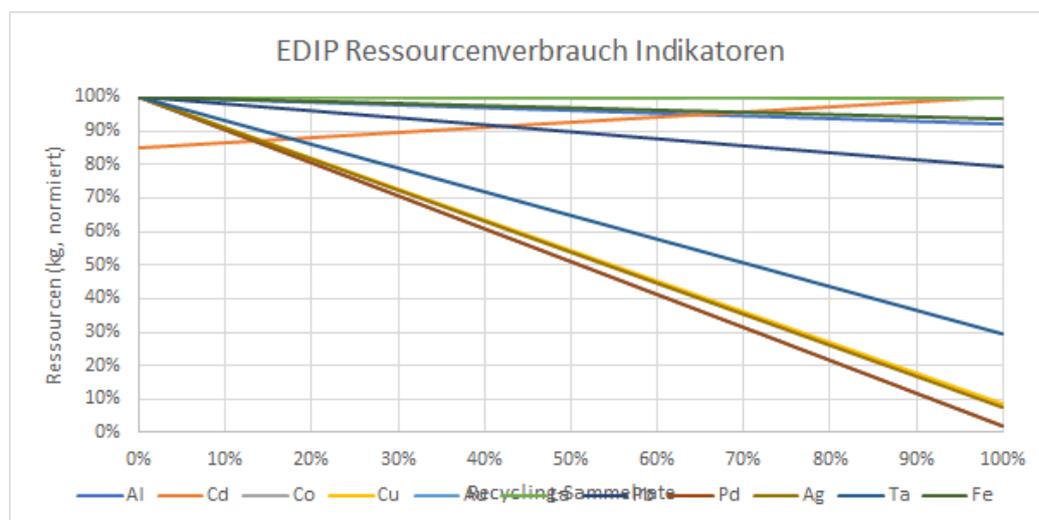


Abbildung 32. Ressourcenverbrauch für verschiedene Recyclingraten

KEE und KLE als Indikatoren für die ganzheitliche Energieeffizienz von IT-Geräten in Rechenzentren verwenden eine vollständige Ökobilanz dieser Geräte zur Bewertung des KEA. Durch Abgleich dieser Ressourcenindikatoren mit der nützlichen Energie und der nützlichen Arbeit ermöglichen diese Metriken den Vergleich verschiedener Betriebsbedingungen, Energieversorgungsinfrastrukturen und verschiedener Geräte, die für die gleiche Anwendung verwendet werden.

Diese Metriken stehen in Beziehung zu anderen etablierten Metriken wie PUE oder DCiE. KEE und KLE ermöglichen eine ganzheitliche Betrachtung der Energieleistung während der verschiedenen

Lebensphasen und unter verschiedenen Betriebsbedingungen. Mit der Einbeziehung von EOL in die Analyse der Metrik können geeignete Strategien für die Wiederverwendung, den Austausch oder das Recycling von Geräten entwickelt werden. Diese Strategien sollten auch eine Optimierung der Ressourcen in Betracht ziehen.

Die verschiedenen Indikatoren für die Materialreduzierung zeigen die potenziellen Vorteile des Recyclings von hochwertigen WEEE aus PRZ. Aufgrund der hohen Sammlung während des EOL und die hohen Ausgaben der Recovery-Prozesse, können die Auswirkungen auf die Erschöpfung der Ressourcen stark reduziert werden: bis zu 90%.

Die Rückgewinnungsrate von Edelmetallen und PGM kann hohe Quoten erreichen, allerdings hängen diese Werte alle von der Sammelquote ab. Die Auswirkungen, die Recycling auf die Verringerung der äquivalenten Emissionen und die Verringerung des Primärenergieverbrauchs durch Materialbeschaffung haben kann, sind eher moderat.

Da diese Phase einen KEA-Anteil von etwa 10% des gesamten KEA während des Lebenszyklus des Geräts (einschließlich der Betriebsphase) aufweist, wird der Gesamteinfluss, den das Recycling auf die Reduzierung von CED und Emissionen haben kann, weiter reduziert.

Während die Korrelation von KEA mit anderen Indikatoren analysiert wurde, ist der Einfluss verschiedener Betriebsstrategien auf die Indikatoren noch unklar (Umweltbundesamt 2018). Die Anwendung der vorgeschlagenen Metriken in Kombination mit anderen Indikatoren kann auf eine Interdependenz zwischen Leistungs-, Energie- und Materialverbrauch hinweisen.

Die Abhängigkeit der Energieeffizienz und anderer Umweltindikatoren und kritischer Materialverarmung muss untersucht werden. Die Messung der Ressourceneffizienz in einem Rechenzentrum hat die Möglichkeit, zum Standard zu werden.

Im Rahmen der LCA erfordert die Modellierung des Recyclings weiterhin eine weitere Verfeinerung der Datenerhebung und in Szenarien sowohl in der Bestands- als auch in der Folgenabschätzung (Klinglmair et al. 2014). Eine Unsicherheitsanalyse zur Beurteilung der Auswirkungen der Datenqualität ist weiterhin erforderlich.

Zur Optimierung der Unsicherheit der Ergebnisse und zur Durchführung von Hochrechnungen ist eine höhere Qualität der Daten erforderlich.

2.4.2. Wiederherstellbare Materialien

Diese Komponenten werden mit Informationen zur Zusammensetzung der Geräte modelliert, die für die Wiederherstellung geeignet sind. Die Stücke werden dann für die Rückgewinnung von wertvollen Materialien, wie Edelmetallen, Kupfer, Zink, Aluminium usw. verarbeitet. Die modellierten verwerteten Prozesse basieren auf echten gemeinsamen Prozessen, um Materialien zu erhalten, die die Rohstoffe vollständig ersetzen. Informationen zu den LCI-Ein- und Ausgängen der zurückgewonnenen Prozesse werden basierend auf der Zusammensetzung des modellierten Teils für das Recycling und der verschiedenen für die Rückgewinnung erforderlichen Schritte erhalten. Abbildung 33 zeigt die Auswirkungen einer Leiterplatte (1 Kilogramm) und die möglichen Einsparungen, die durch Rückgewinnung von Materialien möglich sind.

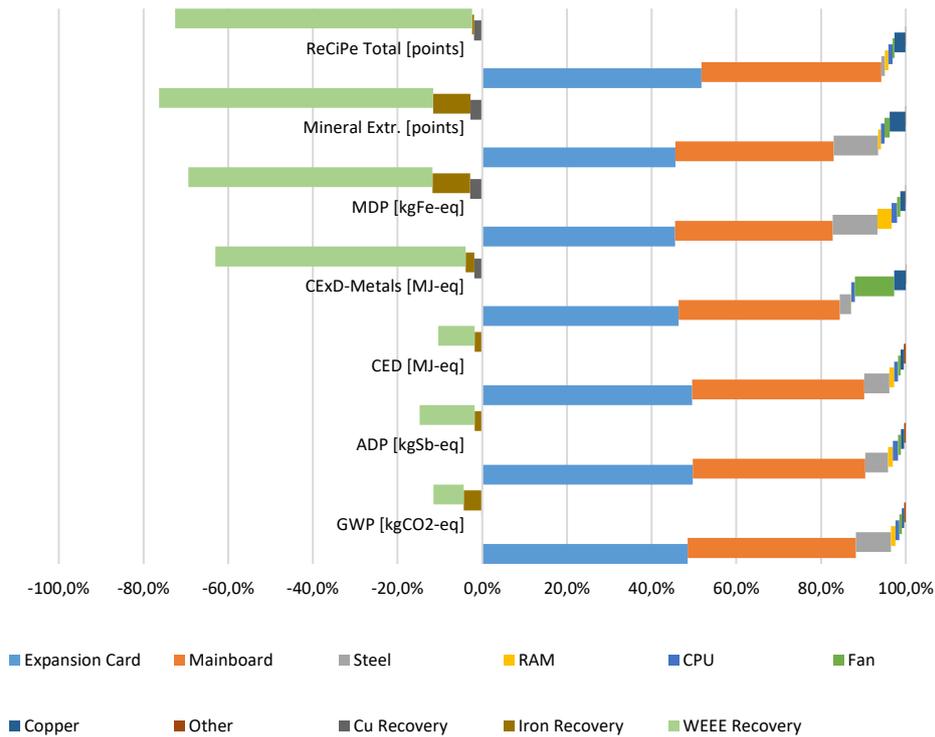


Abbildung 33: Auswirkungen einer Leiterplatte (1 Kilogramm) und die möglichen Einsparungen für ausgewählte Kategorien.

2.4.3. Speicherung und Bearbeitung der Datenbanken

Wie bereits in den vorangestellten Kapiteln erwähnt, wurde eine SQL-Datenbank erstellt, um Informationen zu den verschiedenen Ebenen und deren Austausch zu speichern. Diese Speichermethode ermöglicht das Erstellen von Abfragen, die das Durchführen von Berechnungen und das Abrufen von Informationen zu Umweltauswirkungen auf der Grundlage der Materialzusammensetzung erleichtern.

Die aktualisierte Version der Datenbank enthält Berechnungsergebnisse (LCIA) sowie Informationen zur Unsicherheit und Datenqualität der verschiedenen Börsen für die Produktsystemmodelle.

Mehrere Prozesse auf verschiedenen Ebenen müssen aktualisiert werden, unterschiedliche Arten von Zuordnungen vorgenommen oder brandneue Prozesse ausgeführt werden, die in den ecoinvent 3.4- oder ProBas+ -Datenbanken nicht enthalten waren. Diese Prozesse wurden im .zolca-Format erstellt und gespeichert und können in weitere Formate exportiert werden. Um den Zugriff auf die Informationen zu den Anforderungen und Ergebnissen der Elementarflüsse zu erleichtern, wird jedes Produktsystem außerdem als LCI gespeichert, das die gesamten Ein- / Ausgänge der einzelnen Ebenen enthält. Abbildung 34 und Abbildung 35 zeigen die Struktur und Datenfluss dieser Datenbanken.

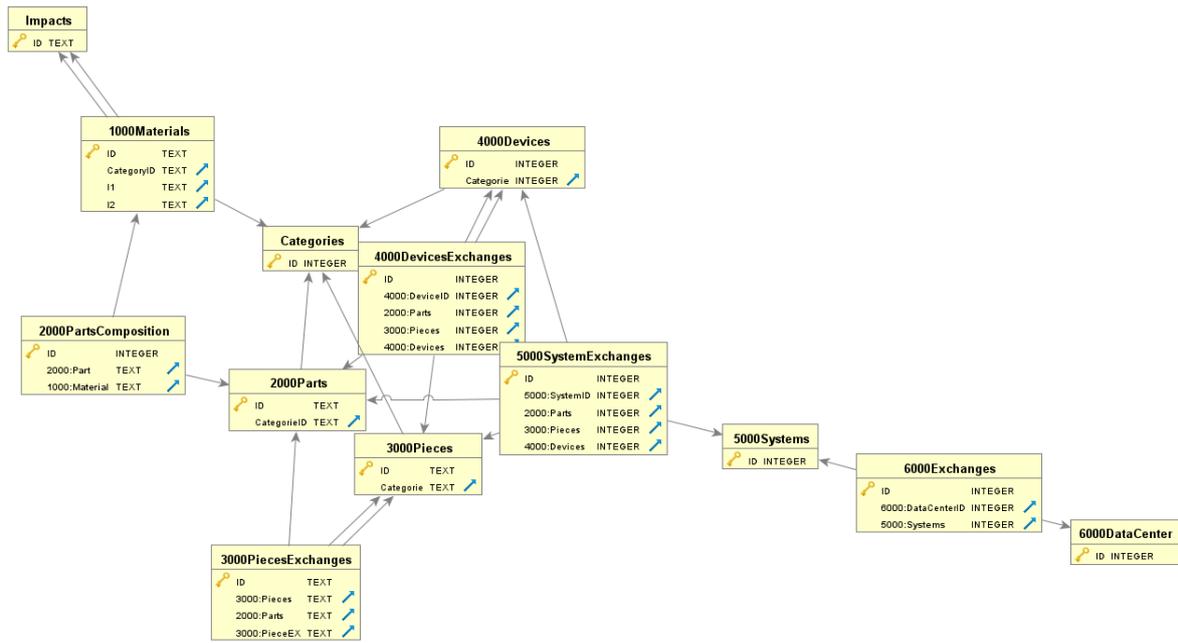


Abbildung 34: SQL Datenbank Entity Relationship Diagram (ERD).

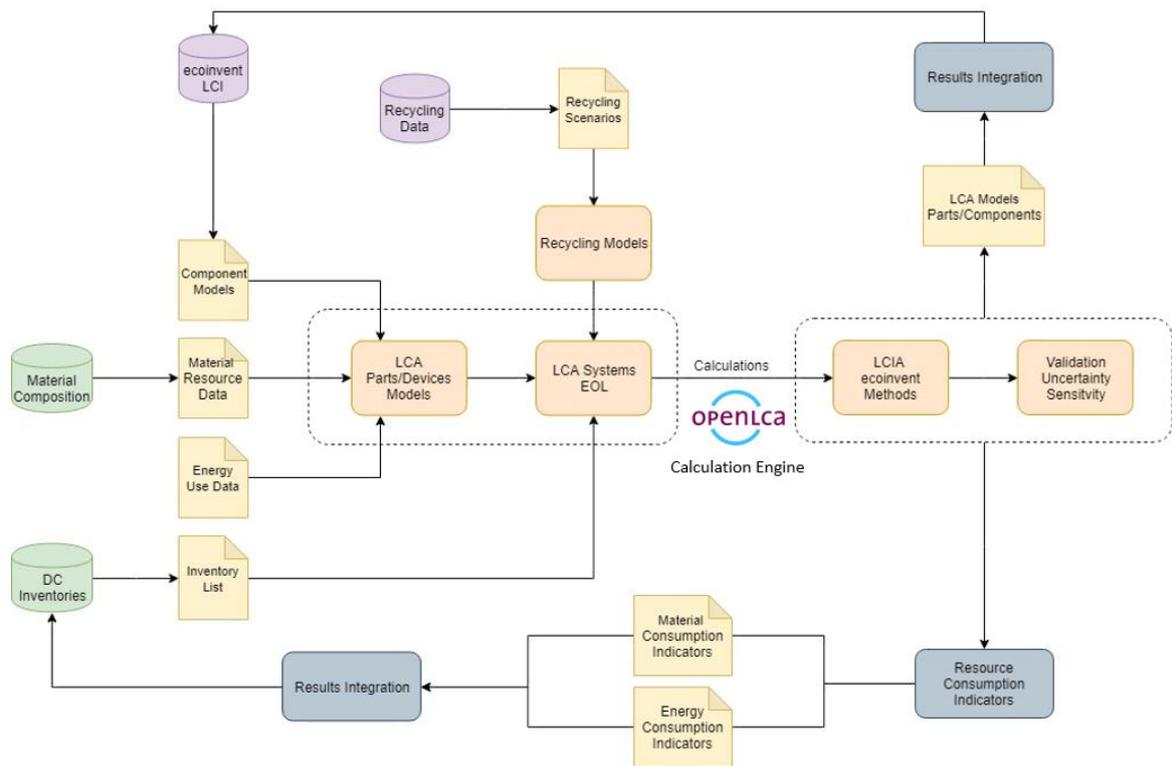


Abbildung 35: Datenbanken Verbindung und Datenfluss.

AP3. Informations- und Bewertungsmodelle für die Energieeffizienz in Rechenzentren

Tabelle 13: Übersicht AP 3

Übersicht AP 3		
	Start: 1 Monat	Dauer: 36 Monate
Titel	Informations- und Bewertungsmodelle für die Energieeffizienz in Rechenzentren	
Zielsetzung	Entwicklung eines Systems für eine ganzheitliche Bewertung der Energie- und Rohstoffeffizienz von Rechenzentren	
Federführender Partner	AP 3 gesamt: UOL-VLBA	
	AP 3.1: Borderstep	AP 3.2: b.r.m AP 3.3: UOL-VLBA
Unterarbeitspakete	<ul style="list-style-type: none"> ▪ AP 3.1: Bestandsaufnahme genutzter Kennzahlen und Indikatoren in Rechenzentren und Entwicklung von Kennzahlen zur grauen Energie und zum Ressourcenstock von Rechenzentren (Borderstep) ▪ AP 3.2: Erstellung eines prototypischen Softwaretools (Smartphone-App oder Web-App) zur Erstbewertung der Energieeffizienz von Rechenzentren inkl. Feldtest (b.r.m., UOL-PIN, Borderstep, UOL-VLBA) ▪ AP 3.3: Entwicklung eines Konzeptes und einer prototypischen Implementierung zur outputorientierten Darstellung und Steigerung der Energieeffizienz eines Rechenzentrums (UOL-VLBA, UOL-PIN) 	
Benötigte Sachmittel und Unteraufträge (geschätzt)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ AP 3.1: Anschaffung von Hard- und Software für die Evaluierung der entwickelten Kennzahlen und Indikatoren anhand von Messungen an unterschiedlicher Serverhardware in drei unterschiedlichen Konfigurationen und mindestens drei unterschiedlichen Lastprofilen (ggf. auch Unterauftrag): 18,000 € 	
Ergebnisse	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Darstellung und Bewertung von Kennzahlen zur Beurteilung der Energieeffizienz von Rechenzentren ▪ Im Feld getesteter Prototyp zur Erstbewertung der Energieeffizienz von Rechenzentren (Meilenstein 3) ▪ Anforderungsanalyse für ein Softwaretool zur outputorientierten Darstellung und Steigerung der Energieeffizienz (SOLL) ▪ Prototyp eines Softwaretools zur outputorientierten Darstellung und Steigerung der Energieeffizienz (Meilenstein 4) 	

AP3.1: Bestandsaufnahme genutzter Kennzahlen und Indikatoren in Rechenzentren und Entwicklung von Kennzahlen zur grauen Energie und zum Ressourcenstock von Rechenzentren

Im AP 3.1 wurde im ersten Halbjahr 2018 eine Bestandsaufnahme zu genutzten Kennzahlen und Indikatoren in Rechenzentren durchgeführt und Kennzahlen zur grauen Energie und zum Ressourcenstock in Rechenzentren entwickelt. Die Ergebnisse wurden in einem Arbeitspapier dokumentiert, deren Inhalte im Folgenden im Überblick dargestellt sind.

Zur Bestimmung der Energieeffizienz von Rechenzentren sind eine Vielzahl unterschiedlicher KPI entwickelt worden. (Daim et al. 2009; Ereğ et al. 2013; Liu et al. 2009; Schmidt et al. 2005; Stobbe et al. 2014; The Green Grid 2011, 2015; Wang und Khan 2013; Wilkens et al. 2012). Insbesondere im Rahmen der Smart City Cluster Colaboration ist eine umfangreiche Zusammenstellung bisher existierender Kennzahlen erfolgt (Smart City Cluster Colaboration 2014). Tabelle 14 gibt eine Übersicht über die an den häufigsten verwendeten Kennzahlen für Rechenzentren, die einen Bezug zur Energieeffizienz haben. Auch wenn viele dieser Kennzahlen den Energiebedarf der IT berücksichtigen, so gibt es doch nur wenige Kennzahlen, die den Ansatz verfolgen, die Leistung der IT in ein Verhältnis zum Energiebedarf zu setzen.¹³

Der Großteil der bisher entwickelten Kennzahlen bezieht sich auf Einzelsysteme im Rechenzentrum, wie z.B. die Kühlung (z.B. AE, AEU, CCF, COP, $pPUE_{cool}$ etc.), die Unterbrechungsfreie Stromversorgung (z.B. UPS Load Factor, $pPUE_{UPS}$), die Server (z.B. PSRS, SPECpower, U_{Server}) oder die Art der Energienutzung (z.B. ERE, ERF, GEC). Diese Kennzahlen beschreiben z.B. die Effizienz der Einzelsysteme oder ihre Auslastung. Zum Teil werden bei solchen Kennzahlen auch verschiedene Systeme in Gruppen zusammengefasst, wie z.B. bei der PUE, die ein Maß für die Effizienz der Rechenzentrumsinfrastruktur darstellt. Diese Kennzahlen sind schon vom Ansatz her nicht geeignet, eine Gesamtbewertung der Energieeffizienz von Rechenzentren zu ermöglichen.

Eine andere Gruppe von Kennzahlen hat hingegen den Zweck ein Leistungsmaß für die IT eines Rechenzentrums zu definieren. Bei diesen Kennzahlen handelt es sich um Energieeffizienzkennzahlen (z.B. CADE, DCeP). Zum anderen sind dies Kennzahlen, die zumindest vom Prinzip her geeignet sind, die Gesamteffizienz eines Rechenzentrums bewerten zu können. Zu dieser Gruppe von Kennzahlen gehören z.B. die oben genannten Kennzahlen ITEUsv und ITEEsv oder die „Useful work“, die vom Green Grid definiert wurde.

Bis Anfang 2018 war es allerdings nicht gelungen, ein Leistungsmaß für die IT so zu definieren, dass die Energieeffizienz verschiedener Rechenzentren damit vergleichbar gemacht werden kann.

¹³ Parallel zu den Arbeiten in TEMPRO AP 3.1. hat das Umweltbundesamt ein Vorhaben zu Kennzahlen für Rechenzentren abgeschlossen (KPI4DCE) und die Ergebnisse nach Abschluss von AP 3.1 veröffentlicht. Der Ansatz in diesem Vorhaben zu Effizienzmessung eines Rechenzentrums und zur Berücksichtigung von Herstellerenergie und Ressourcenbedarf sind mit Ansätzen von TEMPRO vergleichbar. Die Ergebnisse lieferten einen zusätzlichen wertvollen Input für TEMPRO, insbesondere für die Arbeitspakete 1, 2 und 3.

Tabelle 14: Übersicht über energieorientierte Kennzahlen für Rechenzentren

Nr.	Abkürzung	Bezeichnung	Einheit	Kennzahl gibt Auskunft über				Numerischer, objektiver Vergleich der ganzheitlichen Energieeffizienz verschiedener Rechenzentren
				IT	Rechenzentrums-Infrastruktur	einzelne Elemente des Rechenzentrums	Output des Rechenzentrums (IT Leistung)	
1	AE	Airflow Efficiency	m ³ / (W*s)		x	x		no
2	AEU	Air Economizer Utilization	-		x	x		no
3	BTU/h	british thermal unit per hour	-		x	x		no
4	CADE	Corporate Average Datacenter Efficiency	%	x	x	no	x	limited
5	CCF	Cooling Capacity Factor	-	x	x	x		no
6	CEB	Carbon Emissions Balance	kg _{CO2}	x				no
7	CEF	carbon emission factor	kg _{CO2eq} / kWh	x	x			no
8	CIUD	Carbon Intensity per Unit of Data	kg _{CO2} /gbs	x			x	limited
9	CoC	Code of Conduct	-					no
10	COP	Coefficient of Performance of the Ensemble	-		x	x		no
11	CPE	Compute Power Efficiency	-	x	x		x	limited
12	CSE	Data Center Cooling System Efficiency	-		x	x		no
13	CSS	Cooling System Sizing	-		x	x		no
14	CUE	Carbon Usage Effectiveness	kgCO2eq / kWh	x	x			no
15	DC RP	DC Recovery Phase (All4Green Metric)	-		x			no
16	DCcE	Data Center Compute Efficiency	%	x			x	limited
17	DCD	Data Centre Density	W/m ²	x	x			no
18	DCeP	Data Center Energy Productivity	Norm.vTask/kWh	x	x		x	limited
19	DC-FVER	Data Centre Fixed to Variable Energy Ratio	-	x				limited
20	DCIE	Datacenter Infrastructure Efficiency	-	x	x			no
21	DCMM	Data Center Maturity Model	-	x	x	x		no
22	DCP	Data Center Productivity	[usef. work]/[ress.	x			x	no
23	DCPD	Data Center Power Density	W/m ²	x	x			no
24	DCU	Data Centre Utilisation	%	x			x	limited
25	DH-UE	Deployed Hardware Utilization Efficiency	%	x			x	limited
26	DH-UR	Deployed Hardware Utilization Ratio	%	x			x	limited
27	DOLFIN Project	Data Centre Measurement, Calculation and Evaluation Methodolo	-	x	x	x	x	limited
28	DPPE	Data Centre Performance per Energy	-	x	x		x	limited
29	EER	Energy Efficient Ratio	-		x			no
30	ERE	Energy Reuse Effectiveness	-	x	x	x		no
31	ERF	energy reuse factor	-	x	x	x		no
32	GEC	Green Energy Coefficient	%	x	x	x		no
33	Global KPI	Global Key Performance Indicator of Energy Efficiency	Wh	x	x	x		no
34	GPUE	Green Power Usage Effectiveness	%	x	x			no
35	H-POM	Hardware Power Overhead Multiplier	-	x	x			no
36	HVAC_eff	HVAC Effectiveness	-		x	x		no
37	ITEE	IT Equipment Energy Efficiency	-	x			x	limited
38	ITEU	IT Equipment Utilisation	-	x			x	limited
39	ITUE	IT-power usage effectiveness	-	x			x	limited
40	KPI _{EC}	Energy Consumption Key Performance Indicator	-	x	x			no
41	KPI _{GP}	Global Synthetic KPI	-	x	x			no
42	KPI _{REN}	Renewable Energy KPI	-	x	x			no
43	KPI _{REUSE}	Energy Reuse KPI	-	x	x	x		no
44	KPI _{TE}	Task Efficiency KPI	-	x	x			no
45	PAR4	PAR4	-	x				limited
46	pPUE	partial PUE	-	x	x			no
47	pPUE _{cool}	partial PUE Cooling	-		x			no
48	pPUE _{ups}	partial PUE UPS	-		x			no
49	PSRR	Physical Server Reduction Ratio	-					no
50	PUE	Power Usage Effectiveness	-	x	x			no
51	RCI	Rack Cooling Index	%		x			no
52	RoGI	Return of Green Investment	years/months					no
53	RTI	Return Temperature Index	-		x			no
54	ScE	Server Compute Efficiency	%	x				no
55	SI-POM	Site Infrastructure Power Overhead Multiplier	-	x	x			no
56	SPECPower	Standard Performance Evaluation Corp.	-	x		x		no
57	SWaP	Space, Watts and Performance	-	x			x	limited
58	THD	Total harmonic distortion	%	x	x			no
59	TPS/Watt	Transactions per second per Watt	FLOPs/Watt	x				limited
60	TUE	total-power usage effectiveness	-	x	x			no
61	U_DC	Datacenter Utilization	%	x			x	limited
62	U_network	Network Utilization	%	x			x	limited
63	U_Server	Server Utilization	%	x			x	limited
64	U_storage	Storage Utilization	%	x			x	limited
65	UPS Load Factor	UPS Load Factor	-		x		x	no
66	Useful Work	Useful Work	-	x			x	no
67	WEU	Water Economizer Utilization	-		x			no
68	WUE	Water Usage Effectiveness	l / kWh	x				no

Auf Basis der durchgeführten Bewertung der existierenden Kennzahlen wurde ein Vorschlag für zusätzliche Kennzahlen und Indikatoren entwickelt und bzgl. der Anwendbarkeit bewertet. Dieser Vorschlag beruht auf der Verwendung von Benchmarks für die Serverleistung wie SPEC CPU, SPEC SERT, SPECint, SPECpower oder Benchmarks wie LINPACK oder CPUmark. Kombiniert man diese Benchmarks mit Messungen zur Auslastung der Server und summiert sie für alle Server auf, so kann ein Maß für die tatsächliche Arbeit der Server $W_{\text{Server-gesamt}}$ in einem bestimmten Zeitraum ermittelt werden. Ermittelt man zusätzlich den Gesamtenergiebedarf des Rechenzentrums für diesen Zeitraum, so kann eine Energieeffizienz Kennzahl wie folgt ermittelt werden:

$$EE_{RZ} = \frac{W_{\text{Server-gesamt}}}{\text{Gesamtenergiebedarf}}$$

Die so ermittelte Kennzahl EE_{RZ} ist insbesondere für Rechenzentrumsbetreiber geeignet, bei denen die Server die Hauptlast im Rechenzentrum darstellen und andere Komponenten im Rechenzentrum wie Speichersysteme oder Netzwerktechnik hinsichtlich des Energiebedarfs vernachlässigt werden können. Der Ansatz ist auch übertragbar auf die graue Energie und den Ressourcenstock in Rechenzentren. Die genaue Ermittlung der Kennzahl EE_{RZ} sowie einige Erweiterungen wurde im TEMPRO-internen Arbeitspapier „Aktuell genutzte Kennzahlen und Indikatoren zur Energieeffizienz in Rechenzentren“ detailliert dargestellt.

Im Rahmen von AP 3.1 wurden Messungen vorgenommen, um den dargestellten Ansatz zu evaluieren. Der in TEMPRO entwickelte Ansatz für die Energieeffizienz Kennzahl eines Rechenzentrums ist mit dem parallel zu TEMPRO entwickelten Ansatz für die Energieeffizienz der Serverleistung eines Rechenzentrums im Projekt KPI4DCE des Umweltbundesamtes vergleichbar. Auch der KPI4DCE-Ansatz kombiniert die Serverauslastung mit einem Benchmark für die Serverleistung. Insofern sind die durchgeführten Messungen auch geeignet, den KPI4DCE-Ansatz mit zu bewerten.

An neun verschiedenen Servern wurden unterschiedliche Benchmarks und Lastsimulationen getestet und CPU-Auslastungen und Energiebedarfe gemessen. Dabei handelte es sich jeweils um drei Serverkonfigurationen, die typisch für die Jahre 2013, 2016 und 2019 waren. Für jedes Jahr gab es eine High-end-, eine Mid-range- und eine Low-end-Variante (Tabelle 15).

Tabelle 15: Serverkonfiguration für Evaluierung

Low-end	
Low-end 2013: Intel Xeon v2 Generation:	
CPU:	Intel Xeon 6-Core E5-2620v2 2,10GHz 15MB 7.20GT/s (Ivy-Bridge EP)
Mainboard:	Supermicro Mainboard X9DRi-F
Arbeitsspeicher:	64 GB RAM
Low-end 2016: Intel Xeon v4 Generation:	
CPU:	Intel Xeon E5-2620v4 8-Core 2,1GHz 20MB 8GT/s (Broadwell)
Mainboard:	Supermicro Mainboard X10DRI
Arbeitsspeicher:	64 GB RAM
Low-end 2019: Intel Scalable Generation:	
CPU:	Intel Xeon Silver 4110 (2,10GHz, 8-Core, 11MB) (Skylake)
Mainboard:	Supermicro Mainboard X11DPi-N
Arbeitsspeicher:	64 GB RAM

Mid-range	
Mid-range 2013: Intel Xeon v2 Generation:	
CPU:	Intel Xeon 8-Core E5-2650v2 2,60GHz 20MB 8.00GT/s (Ivy-Bridge EP)
Mainboard:	Supermicro Mainboard X9DRi-F
Arbeitsspeicher:	256 GB ECC Registered DDR3 1333 RAM 4 Rank ATP
Mid-range 2016: Intel Xeon v4 Generation:	
CPU:	Intel Xeon 8-Core E5-2650v4 2,20GHz 30MB 9.60GT/s (Broadwell)
Mainboard:	Supermicro Mainboard X10DRI
Arbeitsspeicher:	256 GB ECC Registered DDR4 2666 RAM 2 Rank (ATP)
Mid-range 2019: Intel Scalable Generation:	
CPU:	Intel Xeon Gold 5118 (2,30GHz, 12-Core, 16,5MB) (Skylake)
Mainboard:	Supermicro Mainboard X11DPi-N
Arbeitsspeicher:	256 GB ECC Registered DDR4 2666 RAM 2 Rank (ATP)
High-end	
High-end 2013: Intel Xeon v2 Generation:	
CPU:	Intel Xeon 10-Core E5-2690v2 3,00GHz 25MB 8.00GT/s
Mainboard:	Supermicro Mainboard X9DRi-F
Arbeitsspeicher:	512 GB ECC Registered DDR3 1333 RAM 4 Rank ATP
High-end 2016: Intel Xeon v4 Generation:	
CPU:	Intel Xeon 10-Core E5-2690v4 2,60GHz 35MB 9.50GT/s
Mainboard:	Supermicro Mainboard X10DRI
Arbeitsspeicher:	512 GB ECC Registered DDR4 2666 RAM 2 Rank (ATP)
High-end 2019: Intel Scalable Generation:	
CPU:	Intel Xeon Gold 6140 (2,30GHz, 18-Core, 24,75MB)
Mainboard:	Supermicro Mainboard X11DPi-N
Arbeitsspeicher:	512 GB ECC Registered DDR4 2666 RAM 2 Rank (ATP)

Zur Evaluierung des oben dargestellten Ansatzes für die Energieeffizienz­kennzahl EE_{RZ} wurde eine Lastsimulation mit unterschiedlichen Anwendungen auf den Servern durchgeführt. Dabei war die Lastsimulation so ausgelegt, dass nur verhältnismäßig niedrige durchschnittliche CPU-Auslastungen erreicht wurden, wie sie in den meisten Rechenzentren üblich sind (Deloitte und Fraunhofer IZM 2016; Koomey, J. & Taylor, J. 2015; Schödwell et al. 2018). Die Lastsimulation führte zu unterschiedlichen Auslastungen und Energiebedarfen der verschiedenen Systeme. Abbildung 36 zeigt beispielhaft den Vergleich der Prozessorauslastung und von ausgewählten Serversystemen für diese Lastsimulation.

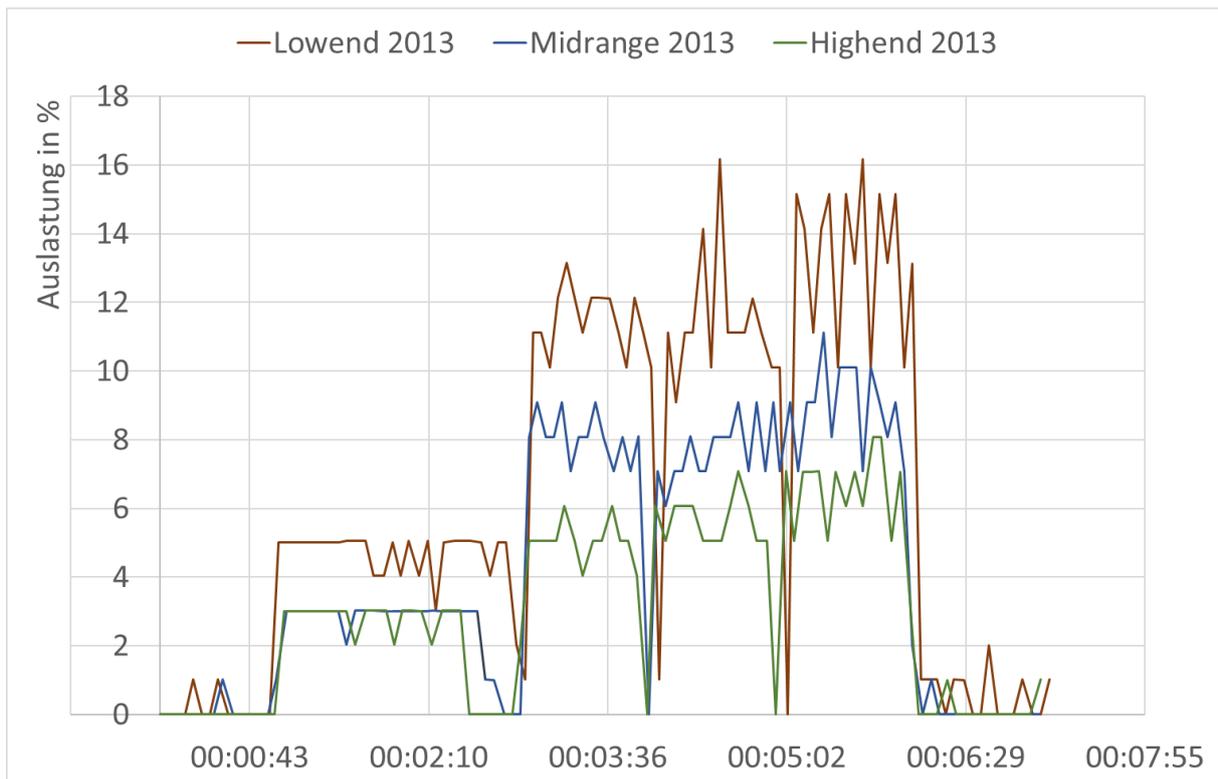


Abbildung 36: CPU-Auslastung für unterschiedliche Serversysteme bei gleicher Last.

Mit Hilfe des oben dargestellten Ansatzes kann die Arbeit der Server W_{Server} für den Testzeitraum durch Multiplikation der durchschnittlichen CPU-Auslastung mit der Testdauer und mit Benchmarks für die Serverleistung ermittelt werden. Hierzu wurden verschiedene Benchmarks auf ihre Eignung getestet. Leistungsfähigere Server sollten während der Lastsimulation eine niedrigere CPU-Auslastung haben als weniger leistungsfähige Server. Im Idealfall sollte sich für eine identische Lastsimulation auf den unterschiedlichen Servern jeweils der gleiche Wert für die Arbeit W_{Server} errechnen.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Testmessungen im Überblick dargestellt. In Abbildung 37 ist die durchschnittliche CPU-Auslastung bei der Lastsimulation für die getesteten Systeme in Abhängigkeit der maximalen Leistung der Systeme nach dem SPECpower-Benchmark dargestellt. Die Messungen bestätigen die Annahme, dass leistungsfähige Server mit leistungsstarken CPUs bei gleichen Anwendungen in der Regel niedriger ausgelastet sind als leistungsschwächere Systeme. Die Abbildung zeigt aber auch, dass bei Systemen, deren maximale Leistung sich kaum unterscheidet, z.T. deutliche Unterschiede in der Auslastung gemessen wurden. So hat das Low-end-Serversystem aus dem Jahr 2019 eine um fast 50% höhere durchschnittliche CPU-Auslastung als das Mid-range-Serversystem aus dem Jahr 2013 – bei vergleichbarer Leistungsfähigkeit gemäß SPECpower-Benchmark.

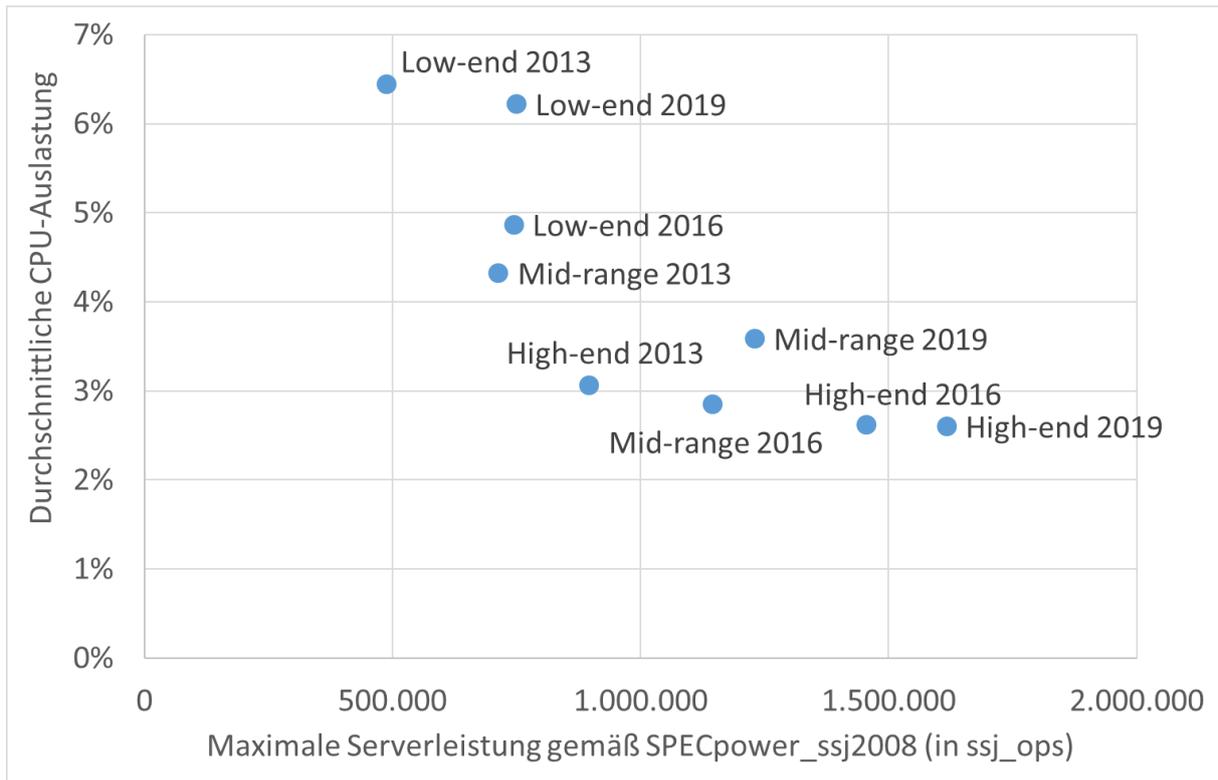


Abbildung 37: Messergebnisse zur durchschnittlichen CPU-Auslastung für unterschiedliche Serversysteme

Deutliche Unterschiede in der CPU-Auslastung führen bei vergleichbaren Serverleistungen und Testzeiträumen zu deutlich unterschiedlichen Berechnungsergebnissen für die Serverarbeit W_{Server} (Abbildung 38). Könnte die Serverarbeit mit dem vorgeschlagenen Ansatz exakt gemessen werden, müssten sich identische Ergebnisse für die verschiedenen Server ergeben. Die größten Abweichungen der Berechnungsergebnisse treten insbesondere zwischen den verschiedenen Servergenerationen auf – innerhalb einer Servergeneration (2013, 2016, 2019) liegen die Berechnungsergebnisse verhältnismäßig eng zusammen. Auffällig ist an den Ergebnissen ist auch, dass die berechnete Arbeit bei den neueren Servern in der gleichen Leistungsklasse jeweils höher liegt als bei älteren Servern.

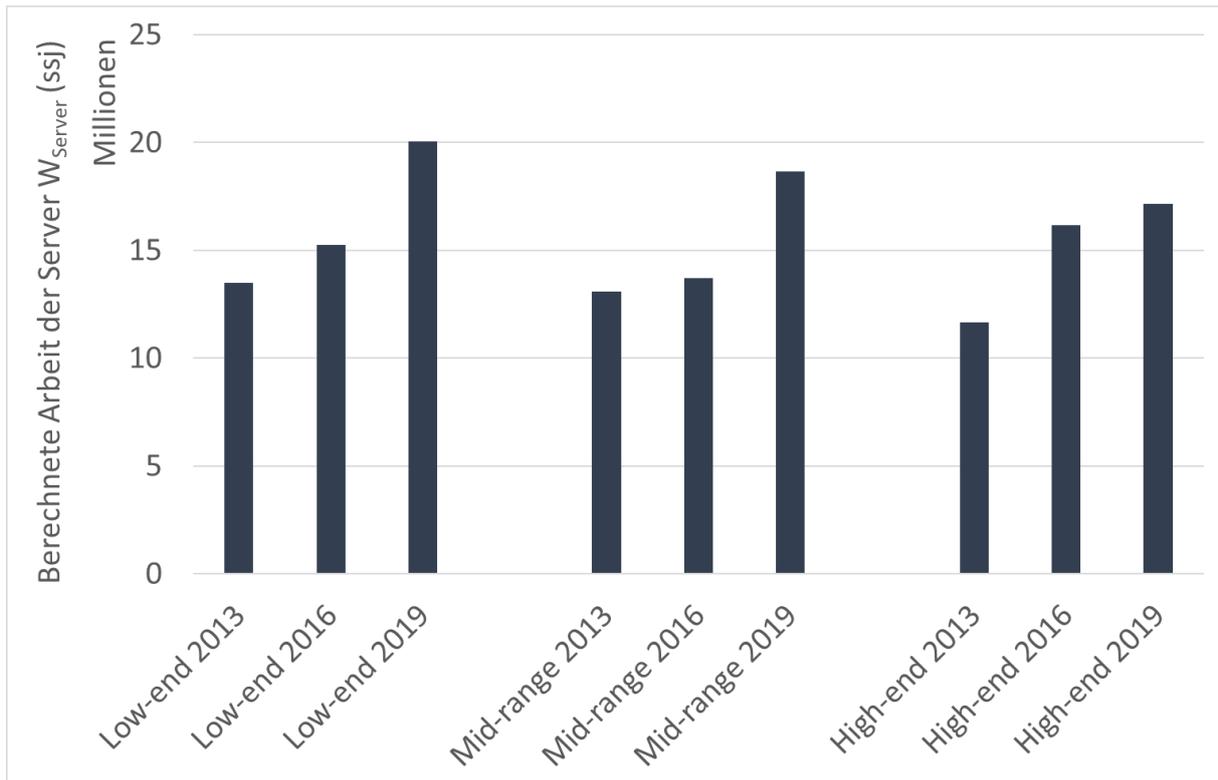


Abbildung 38: Berechnete Arbeit der Server (W_{Server}) für identische Lastsimulation mit Hilfe des SPECpower-Benchmarks

In Abbildung 39 sind die Ergebnisse für Berechnung der Kennzahl W_{Server} mit Hilfe verschiedener Serverbenchmarks dargestellt. Um die Ergebnisse vergleichbar zu machen, wurden die Berechnungsergebnisse jeweils auf den Mittelwert normiert. Der Vergleich zeigt zum einen, dass die Berechnungsergebnisse für die betrachteten Serverbenchmarks vergleichbar sind. Die größten Abweichungen in den Berechnungsergebnissen liefert der LINPACK-Benchmark. Die Abweichungen bei den Benchmarks SPECpower und Sysbench sind vergleichbar.

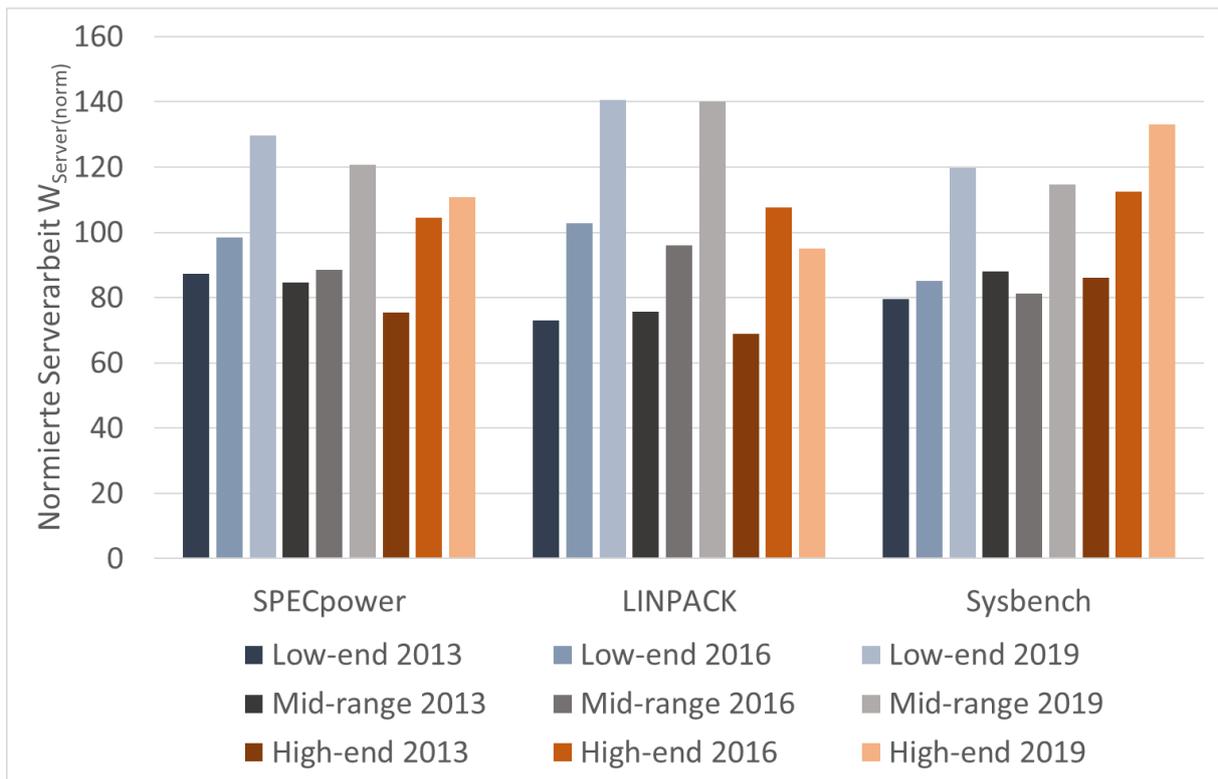


Abbildung 39: Berechnete Arbeit der Server (W_{Server}) für identische Lastsimulation mit Hilfe der Benchmarks SPECpower, LINPACK und Sysbench (normiert, Mittelwert = 100).

Eine Analyse der Ergebnisse der Testmessungen kann einige Erkenntnisse für die Eignung der entwickelten Kennzahlen W_{Server} und EE_{RZ} zur Bewertung der Energieeffizienz von Rechenzentren liefern. Diese Erkenntnisse sind aufgrund der nur beispielhaft durchgeführten Messungen mit einer ausgewählten Lastsimulation noch vorläufig und müssten durch weitere Messungen überprüft werden. Insbesondere können längere Messungen mit realen Serverlasten auf zwei verschiedenen heterogenen Serverfarmen wertvolle weitere Erkenntnisse liefern.

Aus aktueller Sicht kann festgestellt werden, dass bei gleicher simulierter Last die Berechnung der Serverarbeit W_{Server} mit dem verfolgten Ansatz zu vergleichbaren Ergebnissen führt – über verschiedene Servergenerationen und Leistungsklassen der Server hinweg. Die Abweichungen der Berechnungsergebnisse sind allerdings so groß, dass eine exakte Bestimmung der Serverarbeit und damit auch der Energieeffizienz eines Rechenzentrums nicht ohne weiteres möglich erscheint. Größere Abweichungen in den Berechnungsergebnissen treten anscheinend insbesondere dann auf, wenn unterschiedliche Servergenerationen genutzt werden.

AP3.2: Erstellung eines prototypischen Softwaretools zur Erstbewertung der Energieeffizienz von Rechenzentren inkl. Feldtest

3.2.1 Problemstellung und Zielsetzung

Im Rahmen von AP 3.2 wurde ein prototypisches Softwaretool zur Erstbewertung der Energieeffizienz von Rechenzentren erstellt und ein Feldtest mit dem Softwaretool durchgeführt. Mit dem Softwaretool werden vier Herausforderungen adressiert, die sich bisher hinsichtlich einer Bewertung der Energieeffizienz von Rechenzentren ergeben:

- Zum einen bestehen insbesondere bei Bestandsrechenzentren häufig noch sehr hohe Potenziale zur Steigerung der Energieeffizienz (Gröger und Köhn 2016). Während bei neu gebauten Rechenzentren oft der Stand der Technik hinsichtlich Energieeffizienz eingesetzt wird (siehe AP 4), werden Bestandsrechenzentren aufgrund von Befürchtungen hinsichtlich möglicher Ausfälle meist kaum modernisiert („Never touch a running system“). Infolgedessen sind ältere Rechenzentren oft deutlich weniger energieeffizient, insbesondere bei Infrastrukturen wie Kühlung und unterbrechungsfreie Stromversorgung - siehe auch Ausführungen in AP 1.
- Bisher gibt es wenige Kennzahlen oder Benchmarks, mit denen ein Rechenzentrumsbetreiber sein Rechenzentrum mit anderen Rechenzentren hinsichtlich der Energieeffizienz vergleichen kann (siehe AP 3.1). Damit werden mögliche Potenziale zur Steigerung der Energieeffizienz oft nicht identifiziert. Die Erhebung von Kennzahlen ist zudem oft mit hohem Aufwand für den Rechenzentrumsbetreiber verbunden.
- Zertifikate und Umweltzertifikate für energieeffiziente Rechenzentren verlangen oft einen hohen Aufwand an Personal und anderen Ressourcen. Selbst Angebote wie der von der Stadt Hamburg geförderte Effizienz-Check für Serverräume und Rechenzentren (Behörde für Umwelt und Energie Hamburg 2019) oder diverse Schnelltests von RZ-Beratern sind meist mindestens mit einem Aufwand von einem Tag verbunden.
- Es gibt nur wenige verfügbare Daten zu Energiebedarf und Ausstattungen von Rechenzentren. Damit fehlen Rechenzentrumsbetreibern oft Vergleichsmöglichkeiten. Die Möglichkeiten, solche Informationen zu erhalten, sind begrenzt, weil die Betreiber von Rechenzentren eine starke Konkurrenz spüren und sie als "kritische Infrastruktur" betrachten. Deshalb geben sie so wenig Informationen wie möglich über den Standort, die Komponenten und die Strukturen ihrer Rechenzentren preis (Hintemann 2015). Außerdem entwickelt sich die Rechenzentrumsbranche sehr dynamisch und passt sich schnell an die wachsende Nachfrage nach Rechenleistung an. Studien und Veröffentlichungen über Rechenzentren, die vor einigen Jahren erstellt wurden, spiegeln die aktuelle Realität oft nicht mehr angemessen wider.

Ziel in AP 3.2 war es, ein Softwaretool zu entwickeln mit dem auch Rechenzentrumsbetreiber, die bisher kaum oder keine Erfahrungen mit dem Thema Energieeffizienz haben, eine erste Energieeffizienzbewertung in sehr kurzer Zeit durchführen können. Dazu werden nur wenige Daten abgefragt wie Art/Funktion des Rechenzentrums, Ausstattung mit IT oder das Baujahr. Das Tool sollte bei der Bewertung der Energieeffizienz neben dem Energiebedarf in der Nutzungsphase auch die graue Energie berücksichtigen. Das Tool wurde gemeinsam mit den Praxispartnern im Projekt in einem serviceorientierten Ansatz entwickelt und soll frei zugänglich als Smartphone-App oder Webapplikation angeboten werden.

3.2.2 Vorgehensweise

Das Softwaretool zur Erstbewertung wurde von b.r.m. mit Unterstützung von Borderstep und der Universität Oldenburg entwickelt. Im Innovationsprozess wurden die potenziellen Anwender des Tools eng einbezogen. So wurden vor Beginn der konkreten Definition der Anforderungen an das Tool Arbeiten Anwenderinterviews geführt und gemeinsam mit Anwendern ein Innovationsworkshop durchgeführt, auf dem der mögliche Leistungsumfang, die Zielgruppen und die Usability des Tools diskutiert und ermittelt wurden. Der Prototyp wurde mehrfach durch potenzielle Anwender evaluiert. Auch nach Fertigstellung des Prototyps und Abschluss des Projektes wird über eine Kommentarfunktion im Tool weiteres Anwenderfeedback gesammelt.

Im Folgenden wird der Ablauf des Entwicklungsprozesses von Erbet dargestellt.

Recherche, Anwenderinterviews und Innovationsworkshop

Zur Ermittlung der potenziellen Zielgruppen und der Anwender-Anforderungen an Leistungsumfang und Usability des Softwaretools sowie zur gemeinsamen Entwicklung von innovativen Ideen für die Umsetzung des Prototypens wurde im Juni 2017 unter Koordination von UOL-PIN ein Innovationsworkshop vorbereitet, durchgeführt und nachbereitet. An dem Innovationsworkshop nahmen als potenzielle Toolanwender außer den Projektpartnern auch Vertreter von weiteren Rechenzentren und Dienstleistern von Rechenzentren teil. Auf Basis von Anwenderinterviews und Marktrecherchen wurden Inputs für den Workshop zu aufzunehmenden Kenngrößen und Kennzahlen von Rechenzentren, potentiellen Funktionen und Anwendungsfällen der Softwarelösung aufbereiten. Außerdem wurde ein Überblick über verfügbare und vergleichbare Tools gegeben. Insgesamt wurden fünf leitfadengestützte Experteninterviews durchgeführt. Diese dienten einerseits dazu, die Thematik aus Anwendersicht zu erschließen und andererseits, Verbundpartnern von TEMPRO, die zum Innovationsworkshop nicht anwesend sein konnten, mit in die Anforderungsdefinition einzubinden. Die Interviews wurden aufgezeichnet und inhaltlich zusammengefasst.

Auf dem Workshop wurden die Anwenderanforderungen mit Hilfe des Value Proposition Canvas Tools nach Osterwalder/Pigneur 2015 (Osterwalder et al. 2015) erfasst. Das Value Proposition Canvas (Abbildung 40) ist ein vertiefendes Tool zum Business Model Canvas (Osterwalder und Pigneur 2011) und erlaubt, die Aufgaben der Anwender, deren Probleme (Stör- und Risikofaktoren bei der Erfüllung der Anwenderaufgaben) sowie deren Gewinne (Mehrwerte für die Aufgabenerfüllung sowie Vorteile für den Anwender) zu analysieren. In einem weiteren Schritt wurden die Ausprägungen des Nutzenversprechens, d.h. also Möglichkeiten der genauen Ausgestaltung des Produktes „Softwaretool zur Bewertung der Energieeffizienz“ diskutiert und nach „Problemlösern“ (wie kann das Softwaretool die zuvor definierten Probleme der Anwender mindern) und „Gewinnerzeugern“ (wie kann das Softwaretool für den Anwender Vorteile/ Gewinne schaffen) strukturiert.

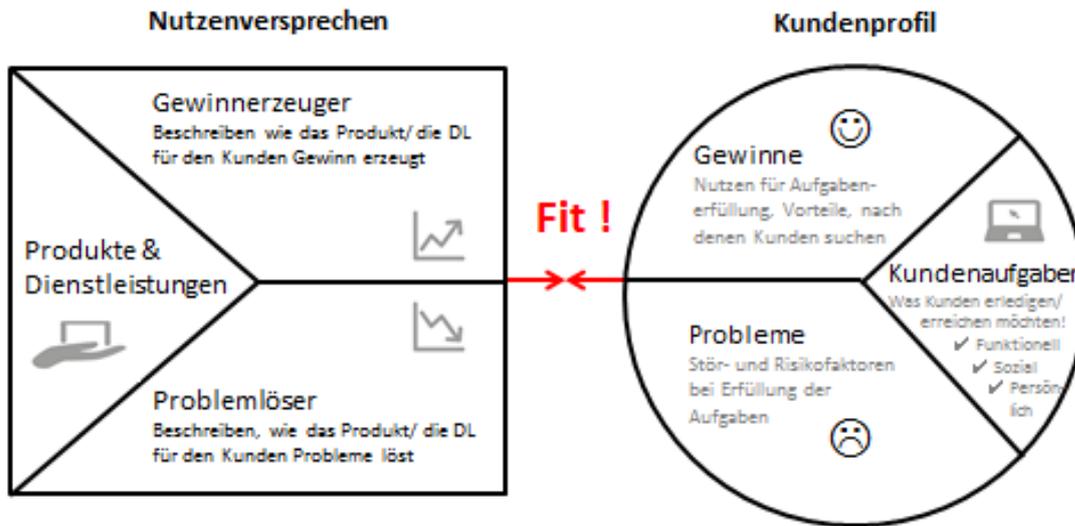


Abbildung 40: Value Proposition Canvas (Quelle: Fichter, K., Hurrelmann, K., Seela, A. (2017) nach Osterwalder et al. (2015)).

Während der Diskussion in den Arbeitsgruppen und der abschließenden Diskussion der Anwendungsfälle im Plenum ist von den Experten die Relevanz des Themas und der prinzipielle Bedarf an einem Tool zur Erstbewertung herausgestellt worden. Folgende Anwendungsfälle des Tools zur Erstbewertung der Energieeffizienz von Rechenzentren wurden diskutiert und bewertet:

- Erste einfache Selbstbewertung für Rechenzentrumsbetreiber, bei denen bisher keine detaillierten Informationen zur Energieeffizienz vorliegen.
- Sensibilisierungsfunktion durch Selbstbewertung: Ergebnisse des Tools können dazu beitragen, dass Facility und IT Management gemeinsam an Lösungen arbeiten.
- Benchmarking des eigenen Rechenzentrums mit vergleichbaren Rechenzentren.
- Akquise-Tool für RZ Berater, um für den Kunden schnell eine erste Einschätzung zur Eignung von Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz aufzeigen zu können. Für diesen Anwendungsfall wird nur eine kleine Anzahl von potenziellen Nutzern erwartet.

Es wurde festgelegt, dass das zu entwickelnde Tool die ersten drei Anwendungsfälle bedienen soll und zumindest für kleine und mittlere Anwenderunternehmen frei verfügbar sein soll. Eine Nutzung des Tools als Akquise-Tool für RZ-Berater ist optional, aber kein Entwicklungsziel des Tools.

Datenrecherche und -aufbereitung, Anforderungskatalog und Storyboard

Auf Grundlage der Ergebnisse des Workshops wurden die notwendigen Grundfunktionalitäten des Softwaretools definiert. Auf Basis der Arbeiten in AP 1 und AP 2 wurde ein Berechnungsmodell entwickelt, mit dem ein Benchmarking eines Rechenzentrums und eine Erstbewertung der ganzheitlichen Energieeffizienz eines Rechenzentrums möglich ist. Auf einem Softwareworkshop wurden gemeinsam mit den Entwicklern und projektinternen Anwender des Tools die Hauptfunktionen des Tools definiert sowie das Berechnungsmodell diskutiert und weiterentwickelt. Es wurden die notwendigen Datenbanken und Erfassungsformulare sowie das Betriebskonzept des Tools bestimmt. Außerdem wurde ein Projektplan für die Softwareprogrammierung und -evaluation festgelegt.

Das Tool Erbet deckt einen Teil möglicher Energieeffizienzbewertungen von Rechenzentren ab. Im Rahmen von TEMPRO wurden zusätzlich zwei weitere Ansätze diskutiert und verfolgt. Zum einen können mit Hilfe eines Kalkulator-Tools Energie- und Kosteneinsparungen durch Energieeffizienzinvestitionen ermittelt und dargestellt werden. b.r.m. hat ein solches Tool im Vorfeld von TEMPRO entwickelt. Eine weitere mögliche Funktionalität ist die Output-orientierte kennzahlenbasierte Darstellung der Energieeffizienz eines Rechenzentrums (AP 3.3). b.r.m. hat ein Storyboard entwickelt, wie diese drei Ansätze kombiniert eingesetzt werden können, um eine ganzheitliche und in verschiedenen Phasen ablaufende Energieeffizienzbewertung von Rechenzentren durchzuführen. Dabei dient Erbet zunächst zur Sensibilisierung und zur ersten Abschätzung von Energieeffizienzpotenzialen. Mit Hilfe des Kalkulator-Tools können konkrete Energie- und Kosteneinsparpotenziale errechnet werden. Das in AP 3.3 prototypische entwickelte Tools kann dann dazu dienen, ein Rechenzentrum kennzahlenbasiert zu optimieren und zu betreiben.

Als Zielgruppe für Erbet wurden die Betreiber von Rechenzentren aller Größen definiert. Dabei wird zwischen den Betreibern von Rechenzentren für die eigene Organisation, Colocation-Rechenzentren, Cloud-Rechenzentren und Hochschulrechenzentren unterschieden. Die Frage, ob Colocation-Rechenzentren berücksichtigt werden sollen, wurde auf dem Softwareworkshop intensiv diskutiert. Betreiber von Colocation-Rechenzentren können in der Regel keine Aussage über die IT-Ausstattung ihrer Rechenzentren machen, da diese in der Verantwortung ihrer Kunden liegt. Daher können Colocation-Betreiber auch nur einen Teil des Funktionsumfangs des Tools nutzen. Insbesondere die Sensibilisierungsfunktion für eine gemeinsame Optimierung von IT- und Facility-Management kann nicht erfüllt werden. Dennoch sollen auch Colocation-Betreiber mit dem Tool angesprochen werden, da Colocation-Rechenzentren eine sehr hohe Bedeutung im Gesamtmarkt der Rechenzentren und damit für den Energiebedarf aller Rechenzentren haben. Ihr Anteil an den Rechenzentrumskapazitäten in Deutschland beträgt im Jahr 2020 voraussichtlich ca. 45% (Hintemann und Clausen 2018b).

Die Eingabe von Daten in das Tool soll in zwei Schritten erfolgen. In einem ersten Schritt wird nur die Art des Rechenzentrums, das Jahr der Inbetriebnahme und die Größe (in IT-Fläche) angegeben. Auf Basis dieser Werte können dem Anwender mit Hilfe einer Datenbank Informationen zu vergleichbaren typischen Rechenzentren in Deutschland gegeben werden. Das Tool soll insbesondere folgende Informationen zur Energie- und Klimabilanz eines vergleichbaren typischen Rechenzentrums liefern:

- Anzahl der Server
- Gesamter Stromverbrauch pro Jahr
- Stromverbrauch der IT pro Jahr

- PUE-Wert
- Stromkosten
- Leistungsdichte (Watt/m²)
- Daten zu den Anteilen verschiedener Komponenten des Rechenzentrums am Energiebedarf sowie den Anteilen von Herstellung, Transport und Entsorgung am ganzheitlichen Energiebedarf und an den CO₂-Emissionen des Rechenzentrums

Die erforderliche Datenbank wurde vom Borderstep Institut auf Basis der Modelldaten aus AP 1 und AP 2, weiterer Vorarbeiten der Projektpartner (Fichter und Hintemann 2014; Hintemann 2017a, 2018b; Hintemann et al. 2010; Stobbe et al. 2015) sowie Daten von 75 Rechenzentrumsbetreibern, die im Rahmen einer Online-Befragung erhoben wurden, entwickelt.

Nachdem der Anwender die Vergleichsdaten für ein typisches Rechenzentrum erhalten hat, wird ihm die Möglichkeit gegeben, weitere Daten zu seinem Rechenzentrum einzugeben, um damit auch Abschätzungen zu seiner eigenen Energie- und Klimabilanz machen zu können. Auf Basis der Ergebnisse des Innovationsworkshops und Anwenderbefragungen wurde festgelegt, dass folgende Informationen abgefragt werden:

- Gesamtstromverbrauch des Rechenzentrums im Jahr
- Stromverbrauch der IT pro Jahr
- Anzahl physikalische Server
- Durchschnittliche Betriebszeit der Server (in Jahren)
- Strompreis
- CO₂-Emissionen des Stromanbieters (in gCO₂/kWh)?

Diese Daten sollten jedem Rechenzentrumsbetreiber vorliegen bzw. mit minimalem Aufwand zugänglich sein. Falls einzelne Daten dennoch nicht eingegeben werden können, hat der Anwender die Möglichkeit, mit Durchschnittswerten zu arbeiten.

Auf Basis dieser Eingaben wird dem Anwender eine Abschätzung seiner Energie- und Klimabilanz gegeben. Die berechneten Daten werden so dargestellt, dass ein direkter Vergleich mit einem typischen Rechenzentrum möglich ist. Zusätzlich liefert das Tool erste Informationen, welche Energieeinsparpotenziale beim Rechenzentrum existieren.

3.2.3 Umsetzung des Erstbewertungstool Erbet

Der Prototyp für Erbet ist unter www.tempro-energy.de/erbet frei nutzbar. Die Verfügbarkeit des Tools wurde über Mailings an potenzielle Anwender und über die Plattform Datacenter-Insider einem breiten Kreis an potenziellen Anwendern mitgeteilt.

Um einen möglichst einfachen Zugang zum Erstbewertungstool Erbet zu ermöglichen wurde diese nach dem KISS-Prinzip („Keep it simple, stupid“) als einfache Webanwendung mit minimalen Anforderungen an den Webserver und den Browser und möglichst wenigen Abhängigkeiten von externen Quellen erstellt. Zusätzlich sollten eine einfache Portierbarkeit und Erweiterbarkeit gegeben sein. Außerdem sollte den beteiligten Projektpartner ein freier Zugang zu den Sourcen für alle Projektpartner möglich sein. Aus diesen Gründen basiert Erbet ausschließlich auf offenen Web-Standards und gängigen und frei verfügbaren Frameworks und Bibliotheken. Für die Benutzeroberfläche von Erbet kommen somit die Web-Standards HTML5 und CSS3 zum Einsatz,

welche durch die quasi-standard Javascript-Bibliotheken jQuery¹⁴ und D3¹⁵ und das Bootstrap-Framework¹⁶ inkl. Font Awesome¹⁷ ergänzt werden. Mit Hilfe des Bootstrap-Frameworks wurde hierbei ein responsives Design erstellt, dass eine Benutzung von Erbet auch auf mobilen Endgeräten ermöglicht. Damit entfällt die Notwendigkeit, eine gesonderte Smartphone-App für Erbet zu entwickeln (siehe Abbildung 41).

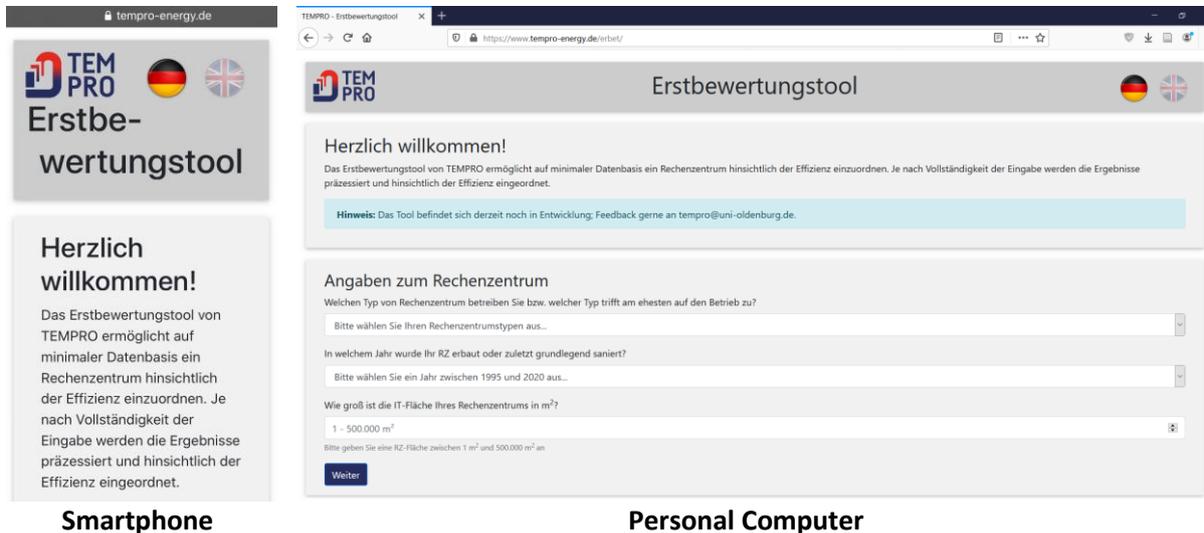


Abbildung 41: Startseite Erbet auf Smartphone und Personal Computer - Erbet unterstützt responsive Design

Aus datenschutzrechtlichen Erwägungen wird keine Speicherung der im Tool ein- und ausgegebenen Daten vorgenommen. Daher wurde bewusst auf den Einsatz eines Datenbankservers verzichtet. Die von Borderstep entwickelte Datenbank zu Vergleichsrechenzentren und weitere benötigte Kennzahlen wurden in die dateibasierte SQLite-Bibliothek eingebunden. Als positiver Nebeneffekt lässt sich Erbet somit auf jedem gängigen Webserver mit PHP und SQLite-Unterstützung durch einfaches Kopieren der Sourcen installieren.

Neben einer Version in deutscher Sprache wurde zur Erhöhung der Reichweite des Tools auch eine englischsprachige Version erstellt. Die Umstellung der Sprache ist über einen Länderbutton auf der Webseite möglich.

Erbet besteht aus zwei HTML-Seiten. Auf der ersten Seite, der Startseite (Abbildung 42), werden neben einer kurzen Begrüßung und einem kurzen Erläuterungstext zum Tool wenige grundlegenden Eckdaten zum Rechenzentrum des Benutzers abgefragt. Diese Eckdaten umfassen den Typ, das Alter sowie die Fläche des Rechenzentrums.

¹⁴Erbet benutzt derzeit jQuery Version 3.3.1-slim; <https://jquery.com/>

¹⁵Erbet benutzt derzeit D3 Version 2-min; <https://d3js.org/>

¹⁶Erbet benutzt derzeit Bootstrap Version 4.1.1-min; <https://getbootstrap.com/>

¹⁷Erbet benutzt derzeit über Bootstrap 4.1.1 Font Awesome 4.7.0; <https://fontawesome.com/>

HERZLICH WILLKOMMEN!

Das Erstbewertungstool von TEMPRO ermöglicht auf minimaler Datenbasis ein Rechenzentrum hinsichtlich der Effizienz einzuordnen. Je nach Vollständigkeit der Eingabe werden die Ergebnisse präzisiert und hinsichtlich der Effizienz eingeordnet.

Hinweis: Das Tool befindet sich derzeit noch in Entwicklung. Feedback gerne an tempro@uni-oldenburg.de.

Angaben zum Rechenzentrum

Welchen Typ von Rechenzentrum betreiben Sie bzw. welcher Typ trifft am ehesten auf den Betrieb zu?

Bitte wählen Sie Ihren Rechenzentrumstypen aus...

In welchem Jahr wurde Ihr RZ erbaut oder zuletzt grundlegend saniert?

Bitte wählen Sie ein Jahr zwischen 1995 und 2020 aus...

Wie groß ist die IT-Fläche Ihres Rechenzentrums in m²?

1 - 500.000 m²

Bitte geben Sie eine RZ-Fläche zwischen 1 m² und 500.000 m² an

Weiter

Das Erstbewertungstool ist eine Entwicklung im Rahmen des vom BMW geförderten Projektes TEMPRO unter dem Förderkennzeichen 03ET1418A-H (Förderzeitraum: 01.11.2016 - 31.10.2019). Das Tool befindet sich noch im Entwicklungsstadium und es kann keine Gewähr auf die Richtigkeit der Werte und Ergebnisse gegeben werden.

© 2018-2019 - TEMPRO (v0.3.1 - 2019-12-11)
Datenschutz - Impressum

This website was made with Bootstrap (https://getbootstrap.com/) and jQuery (https://jquery.com/), both licensed under MIT license. It uses Fontawesome (https://fontawesome.com/) licensed under SIL OFL 1.1 (http://scripts.sil.org/OFL), D3.js (https://d3js.org/) licensed under BSD license (https://opensource.org/licenses/BSD-3-Clause) and plotly.js (https://plot.ly/javascript/) licensed under MIT license. Benchmark gauges based on the "linear gauge with gradient" example by Viktor Mendosa (https://codepen.io/ViktorMendosa/pen/8f1c9e). Flag icons taken from https://www.dreamart.com/wordpress/wordpress-flags-europe-16633606 licensed under the Creative Commons Attribution 3.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/).

Abbildung 42: Die Startseite von Erbet mit der Abfrage der wichtigen Eckdaten des Rechenzentrums

Bei dem Typ des Rechenzentrums stehen folgende Auswahlmöglichkeiten zur Verfügung:

- Rechenzentrum für eine eigene Organisation
- Colocation-Rechenzentrum
- Cloud/Hosting-Rechenzentrum
- Hochschul-Rechenzentrum.

Wird Colocation-Rechenzentren ausgewählt, erscheint ein Hinweis zur eingeschränkten Funktionalität des Tools bei diesem Rechenzentrumstyp. Das Alter des Rechenzentrums wird über das Jahr ermittelt, in dem das Rechenzentrum erbaut oder zuletzt grundlegend saniert worden ist. Hierfür kann das entsprechende Jahr ausgewählt werden, wobei das erste Jahr in der Auswahl auf 1995 sowie das letzte Jahr auf das aktuelle Jahr gesetzt ist.

Die Fläche des Rechenzentrums wird in m² abgefragt und ist auf einen Bereich von 1 bis 500.000 m² sowie ganzzahligen Eingaben beschränkt.

Nachdem alle Eingaben betätigt worden sind und der "Weiter"-Button geklickt wurde, gelangt der Benutzer zur zweiten HTML-Seite (results.php, Abbildung 43). Hierbei werden alle Eingaben an diese Seite übergeben. Das Tool berechnet die Kenndaten eines vergleichbaren Rechenzentrums aus der SQLite-Datenbank und gibt diese im oberen Bereich der Seite aus. Zu diesen Kenndaten gehören:

- Anzahl der (physischen) Server
- Gesamter Energieverbrauch pro Jahr
- Energieverbrauch der IT pro Jahr
- Durchschnittlicher Energiepreis
- CO₂-Emissionsfaktor (in g je kWh)
- sowie die durchschnittliche Nutzungsdauer der Server in Jahren.

Mit diesen Werten wird zusätzlich die Energie- und Klimabilanz berechnet und ausgegeben. Hierbei werden folgende Werte ermittelt:

- Energieverbrauch im Betrieb pro Jahr
- Kumulierter Energieverbrauch pro Jahr (KEA)
- CO₂-Emissionen pro Jahr
- Power-Usage-Efficiency-Wert (PUE)
- Jährliche Energiekosten (nur Arbeitspreis)
- Durchschnittliche Leistungsdichte der IT in Watt pro m²

Die Werte für den Energieverbrauch im Betrieb, der KEA sowie der CO₂-Emissionen werden zusätzlich in Tortendiagrammen mit einer prozentualen Aufteilung dargestellt.

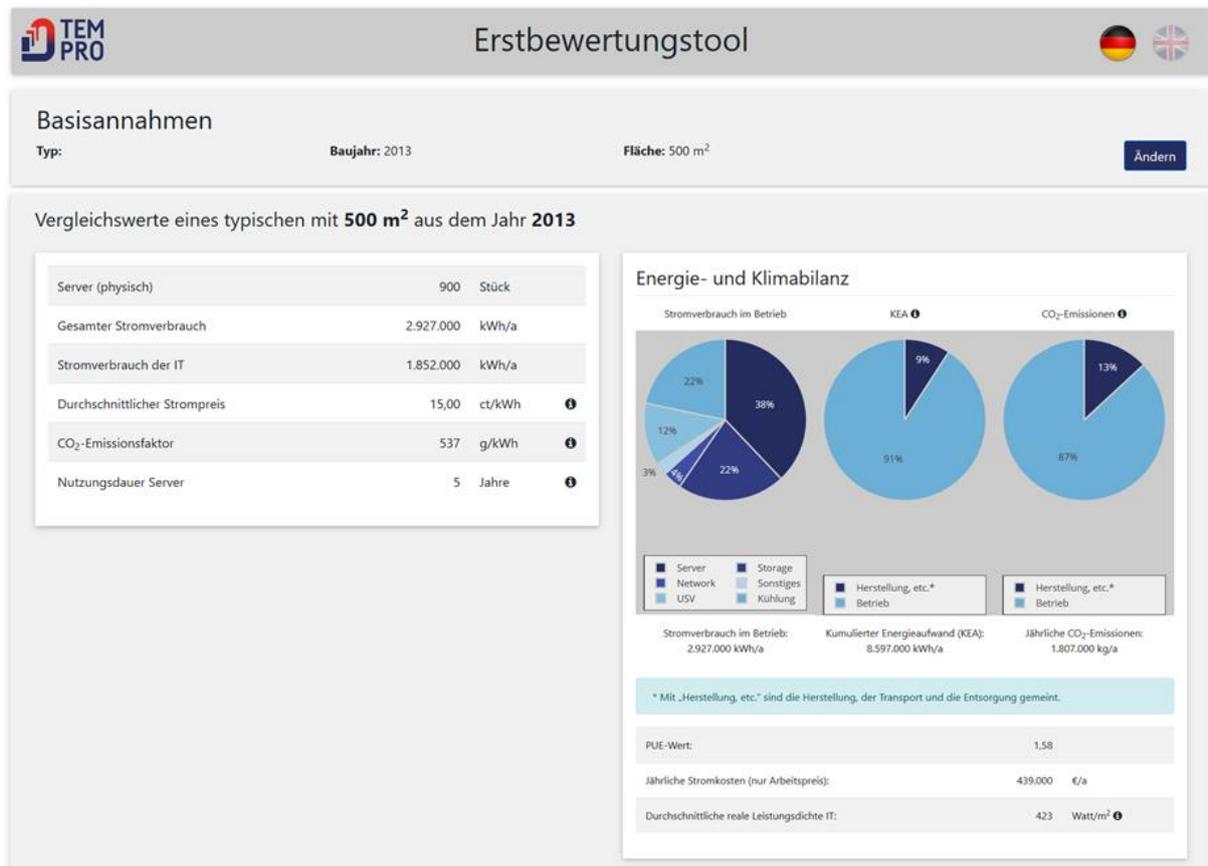


Abbildung 43: Ergebnisseite Erbet - oberer Teil: Daten eines vergleichbaren Rechenzentrums

Im unteren Teil der Seite hat der Benutzer die Möglichkeit weitere Angaben zu seinem Rechenzentrum einzugeben. Hierbei könne folgende Angaben gemacht werden:

- Gesamtenergieverbrauch pro Jahr
- Energieverbrauch der IT pro Jahr
- Anzahl der (physischen) Server
- durchschnittliche Nutzungsdauer der Server in Jahren
- Energiepreis in Cent je kWh
- CO₂-Emissionen des Energieanbieters in gCO₂/kWh

Nach Betätigung des “Aktualisieren”-Buttons unter der Eingabemaske wird die Energie- und Klimabilanz des eigenen Rechenzentrums als Abschätzung analog zu der Ausgabe zum Vergleichsrechenzentrum darüber ausgegeben (Abbildung 44). Somit ist ein direkter Vergleich zwischen dem eigenen und dem Vergleichsrechenzentrum sehr leicht möglich. Alle Berechnungen und Aktualisierungen der Ausgabe dazu laufen hierbei lokal im Browser des Benutzers in Javascript ab.

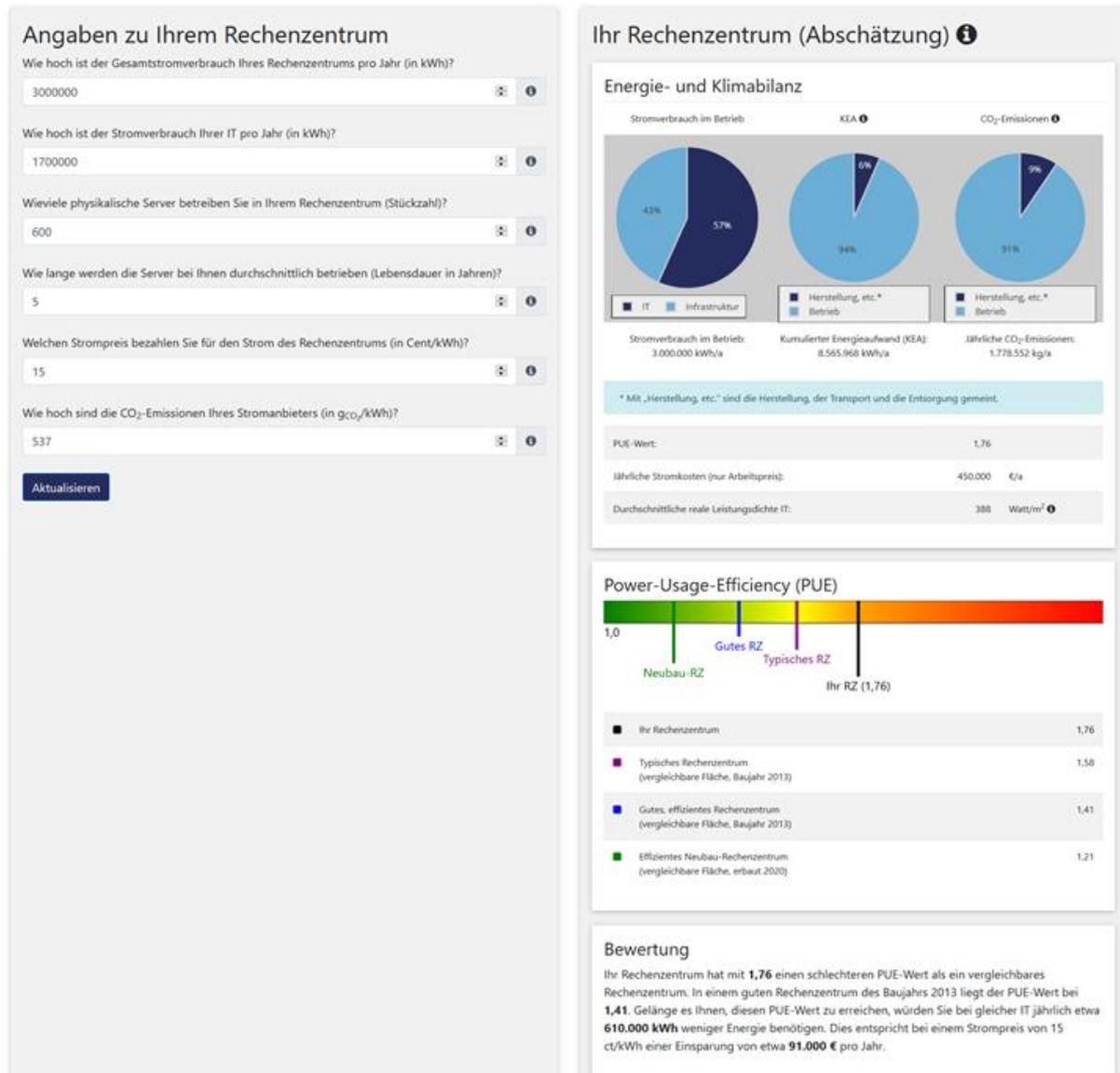


Abbildung 44: Ergebnisseite Erbet unterer Teil: Weitere Eingabemöglichkeiten und Ergebnisdarstellung eigenes Rechenzentrum

Zusätzlich befindet sich unter der Ausgabe der Energie- und Klimabilanz eine Ausgabe zum PUE-Wert als Balkendiagramm. Hier wird neben dem eigenen und dem Vergleichsrechenzentrum auch der Wert für ein “gutes, effizientes” Rechenzentrum angegeben. Dieses “gute” Rechenzentrum dient hierbei als Benchmark für eine mögliche und realistische Zielvorgabe. Die Werte dieses “guten” Rechenzentrums werden als Grundlage in der folgenden Bewertung herangezogen. Hier werden auf Basis der

vorliegenden Daten mögliche Energieeinsparpotentiale und die damit direkt verbundene monetäre Einsparung ausgegeben.

Um die Potenziale gegenüber dem aktuellen Stand der Technik darzustellen, wird zusätzlich zum Vergleich mit einem guten Rechenzentrum des gleichen Baujahrs auch der PUE-Wert eines vergleichbaren Neubau-Rechenzentrums dargestellt.

3.2.4 Ergebnisse der Evaluation des Softwaretools

Die verschiedenen Entwicklungsversionen von Erbet wurde nach lokalen Testläufen in mehreren Stufen evaluiert. Eine erste Evaluation fand im internen Expertenkreis in AP 3 statt. Nach der Berücksichtigung der Kommentare und Anpassung des Tools wurde durch UOL-PIN eine Evaluation innerhalb des TEMPRO-Projektkonsortiums vorgenommen. Nach weiteren Anpassungen aufgrund der Evaluationsergebnisse hat UOL-PIN eine Evaluation mit externen Experten durchgeführt. Die Evaluation wurde mit Hilfe einer Online-Befragung und Anwenderinterviews vorgenommen. So konnte ein Feedback zu dem entwickelten Prototyp erhalten werden und Rückschlüsse für die weiteren Entwicklungsarbeiten gezogen werden.

Die Ergebnisse der Evaluierung wurden in einem Arbeitspapier ausführlich zusammengefasst. Im Folgenden werden sie im Überblick dargestellt.

Zunächst wurden 15 ausgewählte Experten per E-Mail eingeladen, den Erbet-Prototypen zu testen und im Online-Tool zu bewerten. Sechs Experten haben an der Online-Befragung teilgenommen.

In der Onlineumfrage ist um eine Einschätzung zu folgenden Themengebieten gebeten worden:

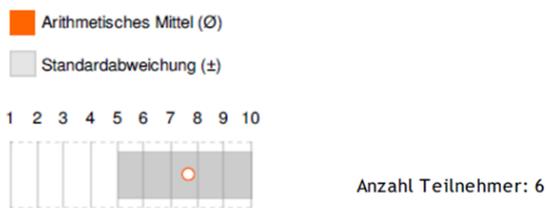
1. Wie beurteilen Sie die Usability des Erstbewertungstools auf einer Skala von 1 (sehr schlecht) bis 10 (sehr gut)? (Kann ich nicht beurteilen)
2. Wie nützlich sind Ihrer Ansicht nach die angezeigten Ergebnisse des Tools im Rahmen einer Erstbewertung eines Rechenzentrums?
3. Sind die Ergebnisse für Sie nachvollziehbar und plausibel? (Skala von 1 (gar nicht) bis 10 (sehr gut)? (Kann ich nicht beurteilen)
4. Möchten Sie uns noch etwas zum Erstbewertungstool mitteilen?

In Abbildung 45 sind die Ergebnisse der Fragen 1 bis 3 in der Zusammenfassung dargestellt. Das Tool hat in allen Bereichen gute Bewertungen bekommen. Die Bewertungen wären im Durchschnitt sogar sehr gut, wenn nicht ein Befragter in mehreren Fragen Bewertungen zwischen 1 und 3 abgegeben hätte.

Eine Analyse der Antworten auf die offene Frage vier erlaubte Rückschlüsse, warum eine Bewertung deutlich abwich. Bei dem Befragten handelte es sich um den Betreiber eines Colocation-Rechenzentrums. Für Colocation-Rechenzentren ist Erbet nur sehr eingeschränkt geeignet, da die Betreiber in der Regel keine Informationen zur IT-Ausstattung haben und damit auch keine Angaben zu den durchschnittlichen Ressourcenbedarfen gemacht werden können.

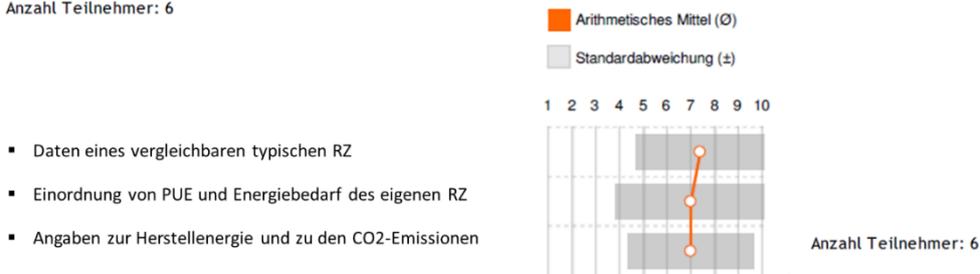
Die Teilnehmer an der Online-Befragung wurden anschließend per Telefon ausführlich interviewt.

1. Wie beurteilen Sie die Usability des Erstbewertungstools auf einer Skala von 1 (sehr schlecht) bis 10 (sehr gut)?



2. Wie nützlich sind Ihrer Ansicht nach die angezeigten Ergebnisse des Tools im Rahmen einer Erstbewertung eines Rechenzentrums?

Anzahl Teilnehmer: 6



3. Sind die Ergebnisse für Sie nachvollziehbar und plausibel?

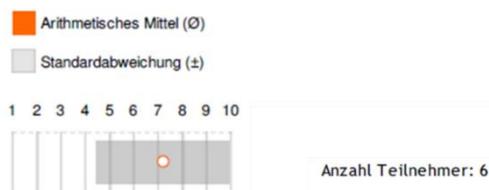


Abbildung 45: Online-Befragung zu Erbet – Ergebnisse der Fragen 1 bis 3

Die Telefoninterviews mit den Anwendern wurden mit Hilfe folgender Leitfragen durchgeführt:

1. Welchen Nutzen bietet Ihnen selbst das Erstbewertungstool?
2. Wer könnte aus Ihrer Sicht ein solches Tool nutzen?
3. Wofür können die Ergebnisse des Tools genutzt werden?
4. Welche weiteren Funktionen könnte das Tool beinhalten?
5. Haben Sie Verbesserungsvorschläge (Usability, optische Darstellung, Hilfetexte)?

Die Telefoninterviews wurden transkribiert und ausgewertet. Zusammenfassend können folgende Ergebnisse zu Nutzen, potenziellen Anwendern und Anwendungsfeldern festgehalten werden:

Nutzen:

- Gute Usability
- Usability nicht durch umfangreiche Funktionserweiterungen beeinträchtigen
- Klares Ergebnis durch Fokus auf PUE
- Gute Darstellung der Ergebnisse biete Entscheidungsgrundlage
- Wissenschaftlich fundiertes Benchmarking trage zur Akzeptanz der Ergebnisse bei

Potenzielle Anwender:

- *IT-Verantwortliche für Rechenzentren seien wesentliche Zielgruppe*
- *RZ-Berater seien wesentliche Zielgruppe*
- *Tool sei insbesondere für kleine RZ-Betreiber und KMU mit eigenem RZ geeignet*
- *Tool biete für große RZ-Betreiber einen geringen Erkenntnisgewinn – könne jedoch in die Kundenkommunikation integriert werden*
- Eignung für Colocation- und Cloud-Betreiber müsse geprüft werden

Anwendungsfelder

- Benchmark-Ergebnis als Entscheidungsgrundlage
- *Tool als Unterstützung bei „Make or Buy“-Entscheidungen*
- Tool als Grundlage zur Förderung des Dialogs zwischen IT- und Facility-Management
- Einbindung des Tools in einen Gesamtberatungsprozess
- Marketinginstrument im Kundendialog
- Tool als Unterstützung für Preisverhandlungen
- Tool als Beitrag zur Etablierung des PUE (auch über RZ-Experten hinaus)
- Tool als Ersatz/ Alternative für den Blauen Engel

Die Ergebnisse der Befragung zu Nutzen, potenziellen Anwendern und Anwendungsfeldern zeigen, dass die für das Erstbewertungstool im Innovationsworkshop (Juni 2017) definierten Ziele sehr gut erreicht wurden

Im Rahmen der Anwenderinterviews wurden eine Reihe von weiteren Verbesserungsvorschlägen für die Weiterentwicklung des Tools gemacht. Tabelle 16 stellt die Verbesserungsvorschläge sowie die nach der Analyse durchgeführte Umsetzung dar. Die meisten der Verbesserungsvorschläge konnten umgesetzt werden. Es wurde auch im Rahmen der Evaluierung die Frage erörtert, ob Colocation-Rechenzentren in dem Tool nicht abgebildet werden sollten, da das Tool wie oben dargestellt hierauf nur bedingt anwendbar ist. Nach Rücksprache mit Colocation-Anbietern wurde die Entscheidung gefällt, sie im Anwendungsbereich des Tools zu belassen. Die Hinweise auf die nur eingeschränkte Nutzbarkeit wurden allerdings deutlicher hervorgehoben.

Tabelle 16: Verbesserungsvorschläge in Anwenderinterviews und Umsetzung.

Verbesserungsvorschlag	Umsetzung
Erweiterung der optischen Darstellung (z. B. Ampeldarstellung, andere Farben)	ja, optische Darstellung weiter optimiert.
Prüfung des Einsatzes des Tools auf mobilen Endgeräten	ja, mobile Webanwendung weiter verbessert
Möglichkeit, mehrere Rechenzentren im Tool anzugeben, integrieren bzw. Druckausgabe verbessern, damit Vergleich einfacher durchgeführt werden kann	Möglichkeit, mehrere Rechenzentren gleichzeitig zu bewerten verworfen, da für ein Erstbewertungstool nicht notwendig, Druckausgabe verbessert, um einfachere Vergleichbarkeit zu schaffen
Einordnung des Grades Abweichung von Referenzwerten	teilweise, Bewertungstext etwas überarbeitet
Prüfung der Einordnung des PUE (grüner Bereich zu breit)	ja, farbliche Bewertung angepasst
Relevanz des kumulierten Energieaufwandes und der CO ₂ -Emissionen erläutern	ja, Erläuterungstexte erweitert
Bezugsgröße bei „Herstellung“ erläutern	ja, Erläuterungstexte erweitert

Relevanz der Nutzungsdauer der Server erläutern	ja, Erläuterungstexte erweitert
Relevanz der Abfrage „Anzahl der Server“ prüfen bzw. nach Art des RZs differenzieren	teilweise, klarer dargestellt, dass das Tool nur bedingt für Colocation Rechenzentren geeignet ist, Erläuterungstexte überarbeitet
Relevant der Abfrage „IT-Fläche“ prüfen	geprüft und für aktuelle Version des Tools weiterhin als sinnvoll erachtet (Größe ist jedem bekannt)
Aussagekraft des Bezuges „Senkung PUE und Auswirkung auf Stromkosten“ einordnen	teilweise, Bewertungstext etwas überarbeitet
Prüfung der prozentualen Verteilung des Stromverbrauchs	geprüft, Datenbank auf Basis des eingegangenen Inputs angepasst
Prüfung des durchschnittlichen Strompreises	geprüft, Erläuterungstext angepasst
Integration von Best Practice Beispiele beim Stromverbrauch	geprüft, Best Practice ist vorhanden, Erläuterungstext angepasst
Prüfung der Angabe zur durchschnittlichen Leistungsdichte der IT	geprüft, Datenbank auf Basis des eingegangenen Inputs angepasst
Integration von Hilfetexten oder weiterführenden Links	Ja, Hilfetexte ergänzt
Ziel und Nutzen des Erstbewertungstool kommunizieren	ja, Erläuterungstexte erweitert
Angebot einer Checkliste zu notwendigen Angaben	geprüft, aber als für ein Erstbewertungstool als ungeeignet betrachtet
Erweiterung um Monetarisierung des Investitionspotenzials prüfen	geprüft, aber als für ein Erstbewertungstool als ungeeignet betrachtet

AP3.3: Entwicklung eines Konzeptes und einer prototypischen Implementierung zur outputorientierten Darstellung und Steigerung der Energieeffizienz eines Rechenzentrums (Sollzustand)

Für die Entwicklung eines Konzeptes und einer prototypischen Implementierung zur outputorientierten Darstellung und Steigerung der Energieeffizienz eines Rechenzentrums, wurde unter Berücksichtigung der Kennzahlenerhebung aus AP 3.1 und der Kennzahlauswahl für AP 3.2, die große Auswahl in einem ersten Schritt klassifiziert. Das Umweltzeichen Der Blaue Engel, mit dem Zertifikat Energieeffizienter Rechenzentrumsbetrieb (RAL-UZ 161), liefert dazu anerkannte Kennzahlen zur Energieeffizienzbestimmung in Rechenzentren, dessen Kennzahlenauswahl und Kriterien zur Orientierung berücksichtigt wurden. Basierend auf der Klassifizierung, wurde eine interaktive Excel-Tabelle mit den Kriterien des Zertifikats RAL-ZU 161 als Vorprototyp für eine zur energieeffizienten Zertifizierung entwickelt.¹⁸

¹⁸ Vgl. Zwischenbericht 2018-01 für detailliertere Inhalte

Kennzahlen zum Zeitpunkt der Antragsstellung des Zertifikates "Der Blaue Engel"	
Elektrische Energie	
Elektrische Energie	<p>Der Strombedarf des Rechenzentrums muss überwiegend, zu mehr als 50 %, aus erneuerbaren Energien gedeckt werden</p> <p>trifft zu <input checked="" type="checkbox"/> trifft nicht zu <input type="checkbox"/></p> <p>Der Einsatz von erneuerbaren Energien ist ausreichend!</p>
	<p>Wert der Kohlendioxid-Äquivalente pro kWh in gramm (g)</p> <p>370,00 <u>Der Wert der Kohlendioxid-Äquivalente ist in Ordnung!</u></p>
	<p>Der Bereich der Energieversorgung ist für das Zertifikat 'Der Blaue Engel' ausreichend.</p>
Energy Usage Effectiveness (EUE)	<p>Eingabe gesamtenergiebedarfs des Rechenzentrums in (kWh pro Jahr) 1.000,00 Eingabe Energiebedarf der gesamten IT in (kWh pro Jahr) 700,00</p> <p>EUE = $\frac{700}{1000} = 0,7$</p> <p>Inbetriebnahme des Rechenzentrums, ausgehend vom Zeitpunkt der Antragsstellung</p> <p><input type="checkbox"/> vor maximal 12 Monaten</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> vor mehr als 12 Monaten aber weniger als 5 Jahre</p> <p><input type="checkbox"/> vor mehr als 5 Jahren</p> <p>Der Wert der EUE ist im zulässigen Bereich.</p>
Ein Energiemanagementsystem ist vorhanden und verfügt mindestens über folgende Punkte	

Abbildung 46: Ausschnitt Vorprototyp (Excel)

Aufbauend auf diesen ersten Erkenntnissen und erhobenen Anforderungen, wurden Gestaltungsvorschläge (Mockups) für den zu entwickelnden Prototyp entworfen. Dazu wurden die identifizierten Kategorien in einzelne Formularabschnitte (Unternehmensdefinition, Energienutzung, Wassernutzung, Klimatisierung, Unterbrechungsfreie Stromversorgung) zur Datenerfassung sowie einer Auswertungsübersicht der Kennzahlen und Auswertung der Zertifizierungsaussage, eingeteilt.¹⁹

¹⁹ Vgl. Zwischenbericht 2018-08 für detailliertere Inhalte

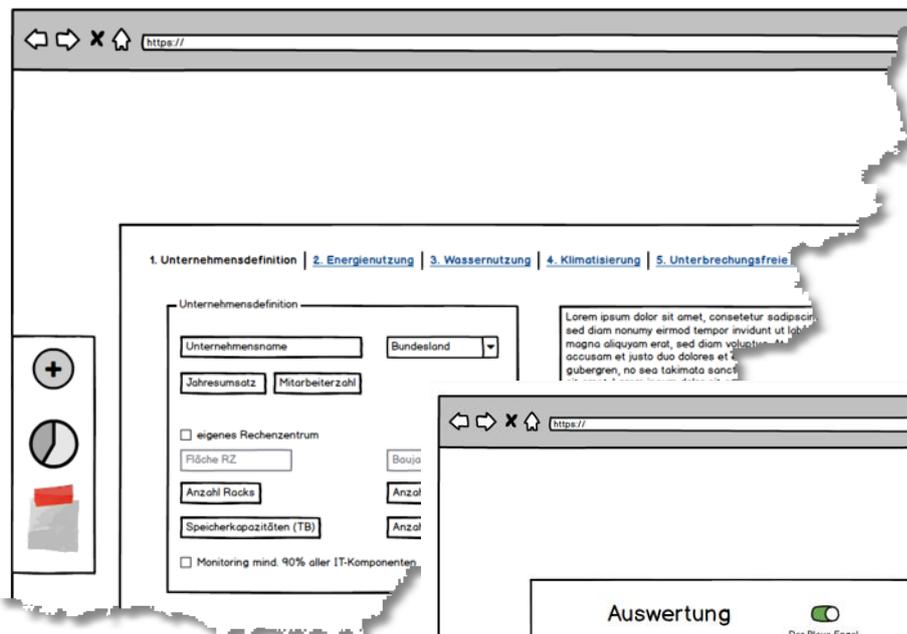


Abbildung 47: Ausschnitt - Mockup - 1



Abbildung 48: Ausschnitt - Mockup - 2

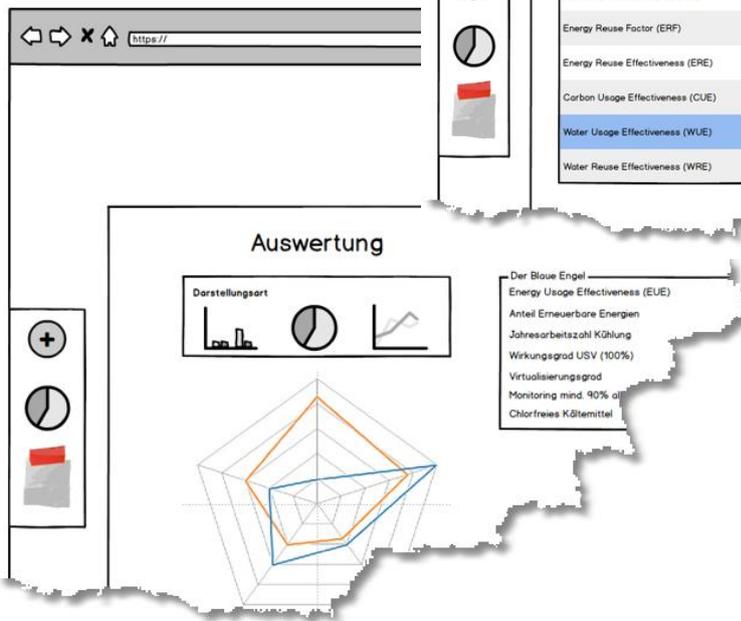


Abbildung 49: Ausschnitt - Mockup - 3

Auf Basis der Mockups und der erhobenen Anforderungen, wurden erste Implementierungsschritte des Tools definiert, das für die *outputorientierte Darstellung zur Steigerung der Energieeffizienz eines Rechenzentrums* entwickelt werden soll. Dazu wurde die Bezeichnung *ESteig* (Energieeffizienzsteigerung) gewählt und folgende Datengrundlage zur Eingabe definiert.

Tabelle 17: ESteig - Datenerfassung

<p>Eingabe Unternehmensdaten</p> <ul style="list-style-type: none"> • Unternehmensname • Bundesland • Jahresumsatz (€) • Mitarbeiterzahl
<p>Eingabe Daten des Rechenzentrums</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fläche (m²) • Baujahr • Anzahl Racks • Anzahl physische Server • Gesamtspeicherkapazitäten von Speichersystemen (TB) • Anzahl virtuelle Server • Monitoring von mindestens 90 % aller mittleren IT-Lasten <ul style="list-style-type: none"> ○ JA ○ NEIN • Es wird eine IT-Inventarliste gepflegt <ul style="list-style-type: none"> ○ JA ○ NEIN
<p>Eingabe Energiebedarf</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rechenzentrum gesamt (kWh/a) • IT-Ausstattung getrennt (kWh/a) • Rechenzentrum gesamt (Moment; kWh) • IT-Ausstattung getrennt (Moment; kWh) • Kühlungssystem/Klimatisierung (kWh/a) • Verlustleistung USV (kWh/a)
<p>Eingabe Energieträger</p> <ul style="list-style-type: none"> • CO₂-Emissionsfaktor (g/kWh) • Anteil erneuerbarer Energien (%)
<p>Eingabe Wasserverbrauch</p> <ul style="list-style-type: none"> • Genutzte Wassermengen für Rechenzentrumsbetrieb (liter/a) • Weiterverwendete Wassermengen außerhalb des Rechenzentrums (liter/a)
<p>Eingabe klimaanlagebezogener Daten</p> <ul style="list-style-type: none"> • Inbetriebnahme
<p>Eingabe Kühlleistung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kühlleistung/abgeführte Wärme (kWh/a) • Weiterverwendete Abwärme (kWh/a) • Verwendung chlorfreier/halogenfreier Kühlmittel <ul style="list-style-type: none"> ○ JA ○ NEIN
<p>Eingabe Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Effizienz bei 100 % Last • Effizienz bei 75 % Last • Effizienz bei 50 % Last • Effizienz bei 25 % Last

The screenshot shows the TEM PRO ESteig interface. At the top, there is a navigation bar with five steps: 1. Unternehmen (1. Definition), 2. Energienutzung (2. Dateneingabe), 3. Wassernutzung (3. Dateneingabe), 4. Klimatisierung (4. Dateneingabe), and 5. USV (5. Dateneingabe). The current step is 'Unternehmensdaten'.

Unternehmensdaten

Unternehmensname VLBA	Bundesland Niedersachsen
Jahresumsatz (€) 30000000	Mitarbeiterzahl 263

Daten des Rechenzentrums

Fläche (m ²) 120	Baujahr 08.05.2001
Anzahl Racks 32	Anzahl physische Server 270
GesamtSpeicherkapazitäten von Speichersystemen (TB) 375	Anzahl virtuelle Server 650

Two checkmarks are visible at the bottom of the form, indicating that the data center meets certain requirements:

- ✓ Monitoring von mindestens 90% aller mittleren IT-Lasten. Es wird über ein Echtzeitmonitoring die Last von Rechnersystemen ermittelt. Davon inbegriffen ist die CPU-, RAM- sowie die Speicherauslastung.
- ✓ Es wird eine IT-Inventarliste gepflegt. In einer IT-Inventarliste werden sämtliche im Rechenzentrum betriebenen Komponenten aufgelistet. Erfasst werden dabei mindestens die Server- und Speichersysteme.

A 'WEITER →' button is located at the bottom right of the form.

Abbildung 50: Ausschnitt - ESteig

Ist die Eingabe erfolgt, findet eine Auswertung der ausgewählten Kennzahlen statt.

Tabelle 18: ESteig - Kennzahlenauswahl

Detaillierte Berechnung und Ausgabe der eingegebenen Werte gemäß den Kennzahlen des Zertifikats RAL-UZ 161

- Power Usage Effectiveness (PUE)
- Bestimmt wird die PUE durch die Division der Gesamtenergiemenge des Rechenzentrums durch den Stromverbrauch der IT-Ausstattung. Je weiter sich der Wert an 1 annähert, desto effizienter ist das Verhältnis.
 - Gesamtstromverbrauch Rechenzentrum (Moment)
 - Energiebedarf IT-Ausstattung (Moment)
- partial Power Usage Effectiveness Elektro (pPUEElektro)
- Um die partielle Power Usage Effectiveness zu berechnen, wird zum Stromverbrauch der IT-Ausstattung der Stromverbrauch der unterbrechungsfreien Stromversorgung addiert und durch den Stromverbrauch der IT-Ausstattung dividiert. Dadurch wird sichtbar, welchen Mehrverbrauch die unterbrechungsfreie Stromversorgung zum Verbrauch der IT-Ausstattung erzeugt.
 - Energiebedarf unterbrechungsfreie Stromversorgung
 - Energiebedarf IT-Ausstattung
- partial Power Usage Effectiveness Klima (pPUEKlima)

- Um die partielle Power Usage Effectiveness zu berechnen, wird zum Stromverbrauch der IT-Ausstattung der Stromverbrauch der Klimatisierung addiert und durch den Stromverbrauch der IT-Ausstattung dividiert. Dadurch wird sichtbar, welchen Mehrverbrauch die Klimaanlage zum Verbrauch der IT-Ausstattung erzeugt.
 - Energiebedarf Klimaanlage
 - Energiebedarf IT-Ausstattung
 - Data Center Infrastructure Efficiency (DCiE)
- Diese Kennzahl wird in Prozent ausgedrückt und durch die Division des Energiebedarfs der IT-Ausstattung und des Gesamtstromverbrauchs des Rechenzentrums berechnet (bzw. durch den Kehrwert der PUE).
 - Gesamtstromverbrauch Rechenzentrum (Moment)
 - Energiebedarf IT-Ausstattung (Moment)
 - Energy Usage Effectiveness (EUE)
- Die Energy Usage Effectiveness berechnet sich analog zur PUE, verwendet dabei jedoch Jahreswerte beim Stromverbrauch. Je weiter sich der Wert an 1 annähert, desto effizienter ist das Verhältnis.
 - Gesamtstromverbrauch Rechenzentrum
 - Energiebedarf IT-Ausstattung
 - Renewable Energy Factor (REF)
- Der Renewable Energy Factor beschreibt das Verhältnis von genutzten erneuerbaren Energien als Energiequelle zum Gesamtstromverbrauch eines Rechenzentrums. Der REF ist ein Indikator für die Nachhaltigkeit des Rechenzentrumsbetriebs. Sie ist auf den Wert 1 limitiert, da maximal der Gesamtstromverbrauch des Rechenzentrums einbezogen werden darf.
 - Menge erneuerbarer Energien
 - Gesamtstromverbrauch Rechenzentrum
 - Energy Reuse Effectiveness (ERE)
- Die Energy Reuse Effectiveness verrechnet in den Wert der PUE die außerhalb des Rechenzentrums weitergenutzte Abwärme des Rechenzentrums. Die ERE gibt damit an, wie viele Ressourcen im Vergleich zur PUE nachhaltig weitergenutzt werden. Der Optimalwert dabei bei 0, im schlechtesten Fall beim Wert der EUE.
 - Menge zurückgewonnener Energie
 - Gesamtstromverbrauch Rechenzentrum
 - Gesamtstromverbrauch IT-Ausstattung
 - Energy Reuse Factor (ERF)
- Der Energy Reuse Factor definiert das Verhältnis aus zurückgewonnener Energie (z. B. durch Nutzung von Abwärme) und dem Gesamtenergiebedarf des Rechenzentrums. Der Optimalwert beträgt dabei 1, was eine vollständige Rückgewinnung bedeutet.
 - Menge zurückgewonnener Energie
 - Gesamtstromverbrauch Rechenzentrum
 - Carbon Usage Effectiveness (CUE)
- Die Carbon Usage Effectiveness ergänzt die Kennzahl der PUE um die CO₂-Emissionen. Sie ist damit ein Indikator für die Nachhaltigkeit des Rechenzentrumsbetriebs. Bei einem idealen Ausstoß von 0 g CO₂/kWh beträgt der Wert 0. Der CO₂-Faktor ergibt sich aus dem Strommix bzw. den Angaben des Bundesumweltamtes.
 - Gesamtstromverbrauch Rechenzentrum
 - Gesamtstromverbrauch IT-Ausstattung
 - CO₂-Emissionen (Strommix)
 - Water Usage Effectiveness (WUE)

- Die Water Usage Effectiveness gibt die Effizienz der Wassernutzung des Rechenzentrumsbetriebs an. Je mehr Wasser verbraucht wird, desto höher und schlechter wird der Wert. Ein natürliches Maximum ist nicht vorhanden.
 - Für RZ-Betrieb genutzte Wassermengen
 - Gesamtstromverbrauch IT-Ausstattung
- Water Reusage Effectiveness (WRE)
 - Für RZ-Betrieb genutzte Wassermengen
 - Außerhalb des RZ weitergenutzte Wassermengen
 - Gesamtstromverbrauch IT-Ausstattung
- Jahresarbeitszahl (JAZ)
 - Alter Kühlsystem/Klimatisierung (in Monaten)
 - Kühllast/Abgeführte Wärmemenge
 - Gesamtstromverbrauch Kühlung/Klimatisierung
- Die Jahresarbeitszahl hilft bei der Bestimmung der Energieeffizienz von Kühlsystemen im Rechenzentrumsbetrieb. Sie ist definiert aus dem Verhältnis der innerhalb eines Jahres vom Kühlsystem aus dem Rechenzentrum abgeführte Wärmemenge zur dazu eingesetzten elektrischen Energie. Je höher die Jahresarbeitszahl ist, umso effizienter ist der Verhältnis. Ein effizienter Wert für moderne Rechenzentren ist 7.

Zusätzlich zu der Auswertung der ausgewählten Kennzahlen, findet eine Auswertung zur Erfüllung der Kriterien des Zertifikats DE-ZU 161 statt.²⁰

Tabelle 19: ESteig - Vergabekriterien des Zertifikats „Energieeffizienter Rechenzentrumsbetrieb (DE-UZ 161)“

- Detaillierte Angaben zu den einzelnen Vergabekriterien des Zertifikats „Energieeffizienter Rechenzentrumsbetrieb (DE-UZ 161)“**
- Grenzwerte der Energy Usage Effectiveness (EUE)
 - Betriebszeit des Rechenzentrums
 - Notwendige Effizienzen
 - Erreichte Effizienzen
 - Für eine erfolgreiche Zertifizierung muss die EUE, abhängig vom Baujahr des Rechenzentrums, definierte Grenzwerte einhalten. So gilt bei einer Betriebsdauer des Rechenzentrums von unter einem Jahr ein Grenzwert von 1.4, ab einem Jahr und unter 5 Jahren 1.6 und über 5 Jahren liegt der Grenzwert bei 1.8.
 - Grenzwert für CO₂-Ausstoß pro kWh im Strommix
 - Notwendige Effizienzen
 - Erreichte Effizienzen
 - Für eine erfolgreiche Zertifizierung darf das spezifische Treibhauspotential des genutzten Strommixes den Wert von 370g CO₂/kWh nicht überschreiten.
 - Mindestwert des Anteils erneuerbarer Energien
 - Notwendige Effizienzen
 - Für eine erfolgreiche Zertifizierung muss der Anteil der erneuerbaren Energien im Strommix bei mindestens 50% liegen.

²⁰ Vgl. Zwischenbericht 2019-01 für detailliertere Inhalte

- Erreichte Effizienzen
 - Mindestwert Jahresarbeitszahl (JAZ)
- Für eine erfolgreiche Zertifizierung muss die Jahresarbeitszahl, abhängig von der Betriebsdauer der Klimatisierung/Kühlsysteme, definierte Schwellwerte erreichen. Bis zu einer Betriebsdauer von 12 Monaten muss die Jahresarbeitszeit mindestens 7 betragen, bei einer Betriebszeit von 12 Monaten bis 5 Jahren mindestens 5 und bei mehr als 5 Jahren Betriebszeit mindestens 3.5.
 - Betriebszeit der Klima-/Kühlsysteme
 - Notwendige Effizienzen
 - Erreichte Effizienzen
 - Mindestwert Effizienz der unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV)
- Die für den Rechenzentrumsbetrieb verwendete unterbrechungsfreie Stromversorgung muss für eine erfolgreiche Zertifizierung bei vier verschiedenen Laststufen definierte Effizienzen vorweisen können.
 - Nennlast USV
 - Notwendige Effizienzen
 - Erreichte Effizienzen
 - Mindestwert Virtualisierungsgrad
- Für eine erfolgreiche Zertifizierung muss der Virtualisierungsgrad (das Verhältnis aus virtuellen und physischen Servern) bei mindestens 2 liegen.
 - Anzahl physischer Server
 - Anzahl virtuelle Server
 - Notwendige Effizienzen
 - Erreichte Effizienzen
 - Überwachung von mindestens 90 % aller mittleren IT-Last
- Mindestens 90 % aller Komponenten im Rechenzentrum müssen in ihrer mittleren Auslastung überwacht und dokumentiert werden. Hierbei ist die mittlere CPU-, Speicher- und RAM-Auslastung zu ermitteln.
 - Notwendig für Zertifizierung
 - Kriterium wird erfüllt
 - Verwendung chlorfreier/halogenfreier Kältemittel
- Für den Kühlbetrieb dürfen ausschließlich chlorfreie/halogenfreie Kältemittel eingesetzt werden.
 - Notwendig für Zertifizierung
 - Kriterium wird erfüllt
 - Erstellung einer IT-Inventarliste
- Das im Rechenzentrum eingesetzte IT-Inventar (Server, Speichersysteme und Netzwerkgeräte) muss in einer IT-Inventarliste dokumentiert werden.
 - Notwendig für Zertifizierung
 - Kriterium wird erfüllt

Dazu wird im Folgenden der Prototyp ESteig detaillierter erläutert.

Zu Beginn wird eine Einstiegsseite dargestellt, auf der die Auswahl zweier Versionen des Zertifikats Energieeffizienter Rechenzentrumsbetrieb (RAL-UZ 161) des Umweltzeichens Der Blaue Engel (bis 12/2019 sowie ab 01/2019) zur Verfügung stehen. Zudem ist es möglich, über eine weitere Anwendung zusätzliche Kennzahlen für Rechenzentren zu berechnen, die sich mit der Eingabe der Datenerfassung ergeben.

TEM PRO Versionsauswahl

ESteig

Dieses Tool erlaubt es Ihnen, eine Reihe von ausgewählten Kennzahlen zu Ihrem Rechenzentrum berechnen zu lassen. Zudem wird überprüft, ob Ihr Rechenzentrum den Anforderungen des Blauen Engels an einen Energieeffizienten Rechenzentrenbetrieb genügt.

Zertifizierung nach:

DE-UZ 161 bis 12/2019

[WEITER ZUM TOOL](#)

Ausgewählte Kennzahlen

Dieses Tool erlaubt es Ihnen, eine Reihe von weiteren ausgewählten Kennzahlen zu Ihrem Rechenzentrum berechnen zu lassen.

[WEITER ZUM TOOL](#)

Abbildung 51: ESteig - Auswahlmaske

Die Eingabe der zur Berechnung der Kennzahlen notwendigen Daten erfolgt mit Hilfe eines Assistenten, der den Benutzer durch mehrere Eingabeschritte führt. In jedem Schritt wird eine bestimmte Menge von Daten zum betrachteten Rechenzentrum erfasst.

- Allgemeine Informationen zum Unternehmen und Rechenzentrum
 - Unternehmensname
 - Bundesland
 - Jahresumsatz
 - Mitarbeiterzahl
 - Fläche
 - Baujahr
 - Anzahl Racks
 - Anzahl physische Server
 - Anzahl virtuelle Server
 - Gesamtspeicherkapazitäten von Speichersystemen
 - Ob ein Monitoring von mindestens 90 % aller mittleren IT-Lasten durchgeführt wird
 - Ob eine IT-Inventarliste gepflegt wird

Abbildung 52: ESteig – Datenaufnahme – Allgemein

- Informationen zum Energiebedarf und verwendeter Energieträger
 - Jährlicher Energiebedarf des gesamten Rechenzentrums
 - Jährlicher Energiebedarf der IT-Ausstattung
 - Momentaner Energiebedarf des gesamten Rechenzentrums
 - Momentaner Energiebedarf der IT-Ausstattung
 - Jährlicher Energiebedarf des Kühlsystems
 - Verlustleistung der USV
 - CO2-Emissionsfaktor
 - Anteil erneuerbarer Energien

Abbildung 53: ESteig – Datenaufnahme – Energieverbrauch

- Informationen zum Wasserverbrauch
 - Jährlich für den Rechenzentrumsbetrieb genutzte Wassermenge
 - Jährlich außerhalb des Rechenzentrums weiterverwendete Wassermenge

Abbildung 54: ESteig – Datenaufnahme – Wasserverbrauch

- Informationen zur Klimatisierung
 - Datum der Inbetriebnahme der Klimaanlage
 - Jährliche thermische Last/abgeführte Wärmemenge
 - Jährlich weiterverwendete Abwärme
 - Ob chlorfreie/halogenfreie Kühlmittel eingesetzt werden

Abbildung 55: ESteig – Datenaufnahme – Klimatisierung

- Informationen zur unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV)
 - Wirkungsgrad bei 100 % Last
 - Wirkungsgrad bei 75 % Last
 - Wirkungsgrad bei 50 % Last
 - Wirkungsgrad bei 25 % Last



Abbildung 56: ESteig – Datenaufnahme – USV

Nachdem die notwendigen Daten erfasst wurden, berechnet das System die Auswertung der folgenden Kennzahlen.

- Power Usage Effectiveness (PUE)
- partial Power Usage Effectiveness (pPUEElektro)
- partial Power Usage Effectiveness (pPUEKlima)
- Data Center Infrastructure Efficiency (DCiE)
- Energy Usage Effectiveness (EUE)
- Renewable Energy Factor (REF)
- Energy Reuse Effectiveness (ERE)
- Energy Reuse Factor (ERF)
- Carbon Usage Effectiveness (CUE)
- Water Usage Effectiveness (WUE)
- Water Reusage Effectiveness (WRE)
- Jahresarbeitszahl (JAZ)

Dazu wird zu jeder Kennzahl eine Beschreibung, der Optimalwert, Durchschnittswert und der berechnete Wert angegeben. Der Nutzer kann zu jeder Kennzahl eine Detailansicht aufrufen. In dieser wird ein visueller Vergleich des berechneten Wertes zum Optimalwert bzw. zum Durchschnittswert in Form eines Balkendiagramms dargestellt. Zusätzlich erfolgt eine Auflistung aller zur Berechnung dieser Kennzahl relevanten Informationen.

Das System speichert alle bisher durchgeführten Auswertungen und berechnet anhand dieser den Durchschnittswert sowie die Standardabweichung zu jeder Kennzahl. Mittels dieser statistischen Werte erfolgt eine Bewertung in Form von Emojis:



Überdurchschnittliches Ergebnis



Durchschnittliches Ergebnis



Unterdurchschnittliches Ergebnis

Dabei wird Standardabweichung wie folgt bestimmt.

Es sei die Menge $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ von n Indikatorwerten. Jeder Indikatorwert entspricht der Auswertung eines bestimmten Indikators für ein entsprechendes Rechenzentrum (z. B. EUE, JAZ etc.). Es soll eine Funktion $s: V \rightarrow \mathbb{R}$ bestimmt werden, die jedem Indikatorwert $v_i \in V$ eine Bewertung in Form einer Zahl $s_i \in S$ zuordnet. Der Wertebereich S der Bewertungen ist dabei prinzipiell frei wählbar. Das arithmetische Mittel μ sei gegeben durch:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{v \in V} v$$

Der Mittelwert μ wird wie in oben beschrieben berechnet. Die Standardabweichung σ wird wie folgt berechnet:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{v \in V} (v - \mu)^2}$$

Mit dem Wertebereich der Standardabweichung über- und unterhalb des arithmetischen Mittelwertes ergibt sich der Sigmabereich, der ein durchschnittliches Ergebnis liefert.

Ein überdurchschnittliches Ergebnis liegt genau dann vor, wenn der berechnete Wert besser als der Durchschnittswert ist und außerhalb der σ -Umgebung liegt.

Ein durchschnittliches Ergebnis liegt genau dann vor, wenn der berechnete Wert innerhalb der σ -Umgebung liegt.

Ein unterdurchschnittliches Ergebnis liegt genau dann vor, wenn der berechnete Wert schlechter als der Durchschnittswert ist und außerhalb der σ -Umgebung liegt.

Der Rechenzentrumsbetreiber kann sich eine Bewertung anhand der Kriterien des Umweltzertifikats RAL-UZ 161 anzeigen lassen. Zu jedem Vergabekriterium wird eine Beschreibung dargestellt und ob das betrachtete Rechenzentrum diesem Kriterium genügt. Anhand eines Netzdiagramms erhält der Benutzer einen Überblick über das Verhältnis der Ist- und Soll-Werte²¹.

²¹ Vgl. Tabelle 19: ESteig - Vergabekriterien des Zertifikats „Energieeffizienter Rechenzentrumsbetrieb (DE-UZ 161)“

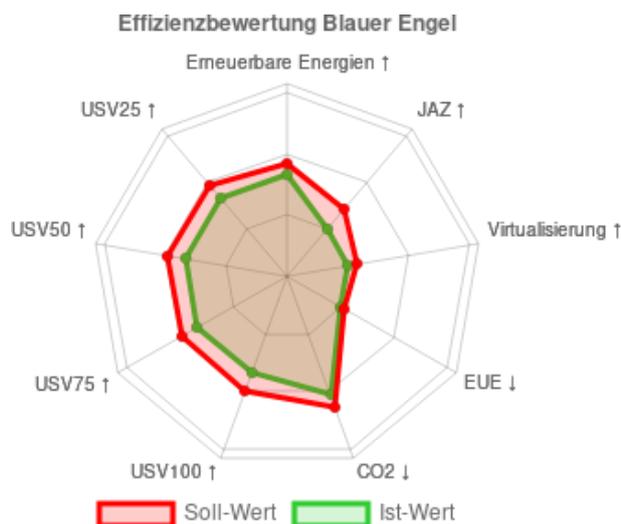


Abbildung 57: ESteig – Diagramm zur Darstellung der KPIs

Als Optimal- bzw. Referenzwerte wurden zunächst die Anforderungen aus DE-UZ 161 (bis 12/2019) verwendet und anschließend aufgrund neuer Vergabekriterien bzw. einer neuen Version des Umweltzertifikats „Energieeffizienter Rechenzentrumsbetrieb“ (ab 01/2019), mit den Vergabekriterien wie folgt in ESteig angepasst:

- Anstelle des Energy Usage Effectiveness (EUE) wird nun nur noch der PUE angegeben
- Anpassungen der Anforderungen an die Jahresarbeitszahl (JAZ)
- Anpassungen der Anforderungen an den Strommix (REF)
- Berücksichtigung der Kennzahl *IT Equipment Utilization for servers (ITEUsv)*, die durch den Anwender direkt in die Benutzeroberfläche eingegeben wird
- Anpassungen der Anforderungen an die Mindesteffizienz bei unterschiedlichen Lastpunkten der unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV)

ESteig bietet neben der Überprüfung weitere Kennzahlen an, die sich aus der Auswahl in AP 3.1 als zusätzlich relevant herausgestellt haben:

- Corporate Average Datacenter Efficiency (CADE)
- Compute Power Efficiency (CPE)
- Data Center Density (DCD)
- Data Center Energy Productivity (DCeP)
- Datacenter Infrastructure Efficiency (DCiE)
- Energy Reuse Effectiveness (ERE)
- Energy Reuse Factor (ERF)
- Physical Server Reduction Ratio (PSRR)
- Power Usage Effectiveness (PUE)
- Datacenter Utilization (U_{DC})
- Network Utilization ($U_{network}$)
- Server Utilization (U_{server})
- Storage Utilization ($U_{storage}$)
- UPS Load Factor

Die Datenerfassung erfolgt analog dabei über ein zusätzliches Formular.

Abbildung 58: ESteig – Ausgewählte KPIs

Im Folgenden wird ein kurzer Einblick in die Kernpunkte der Implementierung von ESteig beschrieben.

- **Implementierung des Clients**

Der Client ist als Webanwendung implementiert worden, um eine ortsunabhängige Verfügbarkeit und geräteunabhängige Nutzung zu gewährleisten. Für die Nutzung ist lediglich eine Internetverbindung und ein Webbrowser notwendig. Zudem können alle eingegebenen und berechneten Daten zentral gespeichert sowie ausgewertet werden.

- **Webtechnologien**

Die Anwendung wurde mit HTML5 zur Beschreibung des Seitenlayouts, CSS3 zum Styling und JavaScript (ES6) zur Programmierung entwickelt.

- **Frontendframework**

Als Frontendframework wird das CSS-Framework *Materialize*²² eingesetzt. Materialize setzt die Designprinzipien der von Google veröffentlichten Designsprache „Material Design“ um. Webseiten, die mit diesem Framework erstellt werden, passen sich automatisch an verschiedene Bildschirmgrößen an (Responsive Design).

Die Erweiterung *Materialize-Stepper* erweitert das Framework um eine Wizard-Komponente, die die Abfrage von Informationen in mehreren Schritten erlaubt.

- **Visualisierung**

Zur Darstellung der verschiedenen Diagramme wird das Open-Source-Framework *ChartJS*²³ eingesetzt. Dieses kann ebenso wie das CSS-Framework Materialize ohne aufwendige Anpassungen geräteübergreifend verwendet werden.

- **Implementierung des Servers**

Der Server ist als Java-Webserver entwickelt worden. Dieser setzt auf dem quelloffenen Spring Framework auf. Spring erlaubt eine einfache Entwicklung von qualitativ hochwertigen Webservern in Java. Zusätzlich wird „Spring Boot“ eingesetzt, der dem Entwickler einen Großteil der aufwendigen Konfigurationsarbeit abnimmt. Außerdem erlaubt „Spring Boot“ die Erzeugung von eigenständigen Anwendungen, die auf keinen Container (wie z. B. Apache Tomcat) angewiesen sind.

- **Datenbank**

Als Datenbank wird MariaDB, der quelloffene Fork des bekannten Datenbankmanagementsystems MySQL, eingesetzt.

- **Datenbankzugriff**

Der Zugriff auf die Datenbank erfolgt über JDBC. JDBC ist eine einheitliche Schnittstelle, die Zugriff auf verschiedenste relationale Datenbanken erlaubt.

Alle Datenbankzugriffe werden über die Klasse *DatabaseController* gekapselt. Sie stellt Methoden wie etwa *saveOrganization()* zur Verfügung, die einen Zugriff auf die Daten erlauben, ohne sich mit dem konkreten Persistenzmechanismus auseinandersetzen zu müssen.

- **REST-Controller**

Der mit Spring realisierte REST-Controller akzeptiert Daten über die POST-Schnittstelle */saveData*. Der Client überträgt die eingegebenen Informationen mittels Schlüssel-Wert-Paaren an diese Schnittstelle und erhält als Antwort die JSON-kodierte Auswertung.

Im Folgenden wird das notwendige Deployment zum Betrieb von ESteig beschrieben.

²² <http://materializecss.com/>

²³ <https://github.com/chartjs/Chart.js/blob/master/LICENSE.md>

- **Deployment der Clientanwendung**

Die Clientanwendung ist eine Webanwendung und benötigt wenige Ressourcen sowie Konfiguration. Diese wird im Folgenden beschrieben.

- **Voraussetzungen**

Auf dem Server muss ein Webserver (z. B. Apache oder NGINX) installiert sein.

- **Konfiguration**

Zur Konfiguration der Clientanwendung, ist an oberster Stelle der Datei *index.js* die Konstante *API_URL* definiert. Ihr Wert muss an die Adresse der /saveData-Schnittstelle der Serveranwendung angepasst werden.

- **Inhalt kopieren**

Nun kann der Inhalt des „Client“-Verzeichnis mittels eines simplen Webservers (z. B. Apache oder NGINX) verfügbar gemacht werden. Der Client kann dann in einem Webbrowser gestartet werden, indem zur Adresse der „index.html“ navigiert wird.

- **Deployment der Serveranwendung**

Die Serveranwendung benötigt für den Betrieb eine Datenbank. Im Folgenden wird das für den Betrieb von „ESteig“ notwendige Deployment beschrieben.

- **Voraussetzungen**

Auf dem Server muss das Java 8 Runtime Environment und MariaDB (oder MySQL) installiert sein.

- **Einrichten der Datenbank**

Es muss zunächst eine Datenbank namens „ba_prototype“ und anschließend ein zugehöriger Nutzer „prototype_user“ mit dem Passwort „prototype_user“ angelegt werden. Dieser Nutzer benötigt mindestens die Berechtigungen für „SELECT“ und „INSERT“. Die Datenbankstruktur muss anschließend aus der Datei „ba_prototype.sql“ importiert werden.

- **Starten der Serveranwendung**

Die Serveranwendung kann nun mit „java -jar ba_prototype-0.1.0.jar“ gestartet werden. Der Server lauscht standardmäßig auf Port 8080. Die REST-Schnittstelle ist dadurch über „localhost:8080/saveData“ erreichbar. Der Port kann mit einem zusätzlichen Kommandozeilenargument „--server.port=8080“ angepasst werden.²⁴

Durch das entwickelte Konzept in AP 3.3 sowie dessen prototypischen Implementierung, ermöglicht das entstandene ESteig Tool eine outputorientierte Darstellung und Steigerung der Energieeffizienz eines Rechenzentrums. Dazu werden durch Eingabedaten anerkannte Zertifizierungskriterien sowie damit verbundene Kennzahlen bewertet, um Potenziale aufzuzeigen, mit denen der Sollzustand erreicht werden kann.

²⁴ Vgl. Zwischenbericht 2019-08 für detailliertere Inhalte

AP4 Aktuelle technologische Potenziale zur Steigerung der Energieeffizienz von Rechenzentren

Tabelle 20: Übersicht AP 4

Übersicht AP 4		
	Start: 1. Monat	Dauer: 15 Monate
Titel	Aktuelle technologische Potenziale zur Steigerung der Energieeffizienz von Rechenzentren	
Zielsetzung	Analyse und Bewertung relevanter aktueller technologischen Entwicklungen hinsichtlich der Energieeffizienz von Rechenzentren	
Federführender Partner	Borderstep	
Unterarbeitspakete	<ul style="list-style-type: none"> ▪ AP 4.1: Entwicklung eines Analyserasters zur Darstellung aktueller technologischer Entwicklungen in Rechenzentren (Borderstep) ▪ AP 4.2: Identifizierung und Dokumentation ressourcenrelevanter technologischer Entwicklungen in Rechenzentren (Borderstep) ▪ AP 4.3: Bewertung der ressourcenrelevanten technologischen Entwicklungen und Bestimmung der für die Umsetzung in TEMPRO geeigneten Technologien (Borderstep, UOL-PIN) 	
Ergebnisse	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Technologieradar hinsichtlich der Energieeffizienz von Rechenzentren als Basis für die technischen Entwicklungen in AP 5 (Meilenstein 1) ▪ Dokumentierter Innovationsworkshop zu Effizienztechnologien in Rechenzentren ▪ Identifizierung und Bewertung von Effizienztechnologien, die im Projekt erprobt werden 	

Das Ziel von AP 4 bestand darin, die hinsichtlich der Energieeffizienz von Rechenzentren relevanten aktuellen technologischen Entwicklungen zu identifizieren, zu analysieren und zu bewerten. Neben der Bedeutung der Technologien für den Ressourcenbedarf der Rechenzentren wurden die aktuellen technologischen Entwicklungen auch danach bewertet, ob sie sich zur Entwicklung und Erprobung in TEMPRO eignen.

Hierzu wurde zunächst ein Analyseraster zur Technologiebewertung basierend auf einem Technologieradar entwickelt. In einem zweiten Schritt wurden aktuelle und als relevant anzusehenden technologischen Entwicklungen und ihre Potenziale zur Steigerung der Energieeffizienz recherchiert und dokumentiert. Für diese Entwicklungen wird dann im dritten Schritt anhand des Analyserasters eine Bewertung in einem umfangreichen Stakeholder-Prozess durchgeführt. Zur Diskussion des entwickelten Analyserahmens, zur Identifikation der relevanten technologischen Entwicklungen und zur Bewertung der Potenziale zur Steigerung der Energieeffizienz wird mit Unterstützung von UOL-PIN ein Innovationsworkshop vorbereitet, durchgeführt und dokumentiert. An dem Innovationsworkshop

nehmen neben dem Projektkonsortium und den assoziierten Partnern auch Vertreter von weiteren Unternehmen und Wissenschaftsorganisationen. Im Ergebnis wurden in AP 4 besonders erfolgversprechende Technologien zur Steigerung der Energieeffizienz von Rechenzentren identifiziert und bewertet. AP 4 lieferte damit auch einen Input für die in AP 5 zu erforschenden Lösungen.

Die Ergebnisse aus AP 4 wurden bereits auf mehrend Fachworkshops und wissenschaftlichen Konferenzen vorgestellt. Für die Konferenzbeiträge sind zwei wissenschaftliche Paper entstanden (Hintemann und Hinterholzer 2018b, 2018a).

AP4.1: Entwicklung eines Analyserasters

Die fortschreitende Digitalisierung von Wirtschaft und Gesellschaft führt dazu, dass in Behörden, Wirtschaft, Wissenschaft und auch in den anderen Bereichen des gesellschaftlichen Lebens immer größere Datenmengen transportiert, gespeichert, verwaltet und für unterschiedliche Dienste zur Verfügung gestellt werden. Verbunden mit dieser Entwicklung wird auch der Bedarf an zentraler Bereitstellung von Daten und Rechenleistung in Rechenzentren weiter zunehmen. Die Ergebnisse in AP 1 zeigen, dass dieser steigende Bedarf an Rechenleistung auch zu einem zunehmenden Bedarf an Energie führt. Vor diesem Hintergrund ist es wesentlich, neue ressourcensparende Technologien in Rechenzentren zu identifizieren und zu bewerten. Dies ist das zentrale Ziel des Arbeitspaketes 4. Hierzu wurde in AP 4.1 ein Analyseraster entwickelt, das im Folgenden dargestellt wird. Bei der Entwicklung des Analyserasters wurden insbesondere zwei Zielsetzungen verfolgt:

1. Das Analyseraster soll geeignet sein, die technischen Entwicklungen anschaulich darzustellen. Die zentralen Ergebnisse des AP 4 sollen im Rahmen der geplanten Innovationsworkshops sowie in Veröffentlichungen und in Vorträgen gut zu kommunizieren sein. Aus diesem Grund setzt das Analyseraster stark auf graphische Elemente.
2. Das Analyseraster soll verschiedene technische Bereiche des Rechenzentrums abdecken, angefangen von der IT-Hardware über Software und Dienste bis hin zu Infrastrukturelementen wie Klimatisierung und Stromversorgung. Dabei soll das Analyseraster anschlussfähig an die technischen Entwicklungsarbeiten in AP 5 sein.

Das in AP 4 verwendete Analyseraster unterscheidet zunächst drei grundlegende Bereiche im Rechenzentrum:

- Kühlung/Klimatisierung/Lüftung
- Stromversorgung/-erzeugung
- IT und -Management

Im Jahr 2015 entfielen 59% des Energiebedarfs der Rechenzentren in Deutschland auf den Bereich der IT, 25% auf die Klimatisierung und 14% auf die Stromversorgung (Hintemann 2016; Stobbe et al. 2015). Damit werden die wesentlichen Bereiche, in denen Energie im Rechenzentrum benötigt wird, abgedeckt. Diese Unterscheidung berücksichtigt auch, dass die Kompetenzen beim Rechenzentrumsbetrieb und bei der Planung und Realisierung von Rechenzentren fast immer hinsichtlich Facility Management und IT-Management unterschieden werden. Im Bereich des Facility Management scheint es sinnvoll, zwischen Kühlung/Klimatisierung Lüftung und Stromversorgung/-erzeugung zu unterscheiden, da die hier verwendeten Technologien und Anlagen weitgehend unabhängig voneinander sind. Im Bereich IT-Hardware und Management könnte noch zwischen

Server, Storage und Netzwerk unterschieden werden. Da es aber gerade bei künftigen Technologien immer mehr Lösungen gibt, bei denen die Grenzen zwischen diesen Bereichen verschwimmen, wird auf eine Unterteilung verzichtet.

Für die drei Bereiche wird jeweils ein sogenannter Technologieradar entwickelt, mit dem der aktuelle Entwicklungsstand und das Einsatzgebiet der Technologien dargestellt werden. Ein Technologieradar ist ein Instrument des Technologiemonitorings und unterstützt bei der Identifikation, Bewertung und Beobachtung von relevanten Technologien (Rohrbeck et al. 2006). In Abbildung 59 ist ein solcher Technologieradar schematisch dargestellt. Mit Hilfe dieses Technologieradars können anschaulich und gut kommunizierbar energieeffiziente Technologien dargestellt werden, die aktuell bereits massenhaft in Rechenzentren eingesetzt werden (Technologie A), für die es bereits einen Nischenmarkt gibt (Technologie B), die sich in der Pilotanwendung befinden (Technologie C) oder die noch im Forschungsstadium (Technologie D) sind. Der Technologieradar unterscheidet auch zwischen Technologien, die aktuell im Rechenzentrum eingesetzt werden oder für den Einsatz im Rechenzentrum vorgesehen sind und Technologien aus anderen Einsatzbereichen, die dort entweder schon marktreif eingesetzt werden (Technologie E) oder deren Einsatz sich noch in der Pilotanwendung (Technologie F) oder im Forschungsstadium befindet.

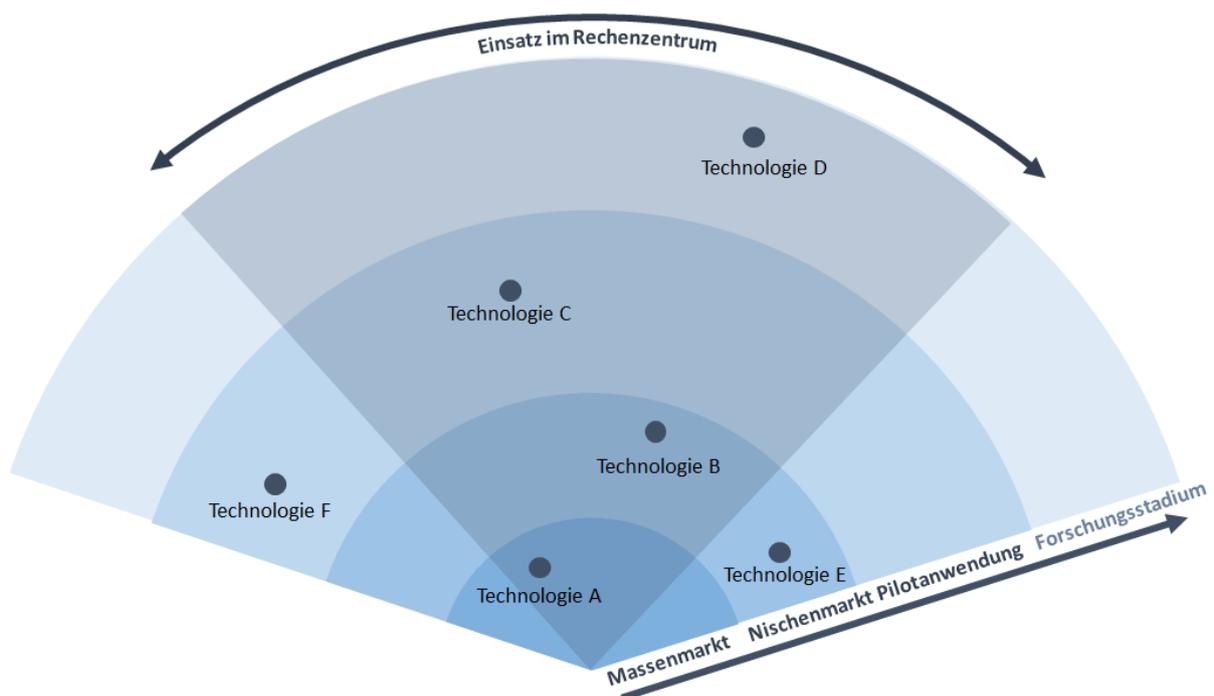


Abbildung 59: Schematische Darstellung des Borderstep Technologieradars für Rechenzentren

Die im jeweiligen Technologieradar aufgeführten Technologien werden nach einer einheitlichen Systematik dargestellt. Dazu wurden auf Factsheets im Umfang von jeweils einer Seite folgende Punkte erhoben:

- Kurzdarstellung der Technologie
- Nutzen der Technologie

- Treiber und Hemmnisse der Technologien
- Wesentliche Akteure im Technologiefeld
- Für welche Rechenzentren sind die Technologien geeignet?
- Marktreife der Technologien
- Einsparpotenziale auf Ebene einzelner Rechenzentren
- Einsparpotenziale für die Gesamtheit aller Rechenzentren in Deutschland
- Eignung für die Entwicklung und Erprobung in TEMPRO

AP4.2: Identifizierung und Dokumentation ressourcenrelevanter technologischer Entwicklungen in Rechenzentren

Zur Identifikation, Dokumentation und Bewertung von Energieeffizienztechnologien wurde ein transdisziplinärer Ansatz verfolgt, der im Folgenden beschrieben wird.

Als unabhängige und gemeinnützige Forschungseinrichtung ist Borderstep im Bereich der anwendungsorientierten Innovations- und Entrepreneurshipforschung tätig und dem Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung verpflichtet. Die Forschungsprojekte sind durch einen engen Bezug zur Praxis gekennzeichnet. Der überwiegende Teil der Projekte sind Kooperationsprojekte mit Praxispartnern, wie dies auch bei TEMPRO der Fall. Ein Schwerpunkt der Arbeiten des Borderstep Instituts besteht in der Identifikation, Analyse und Bewertung neuer nachhaltiger Technologien sowie in der Unterstützung ihrer Implementierung. Hierzu wird ein am Borderstep Institut entwickelter und eingesetzter transdisziplinärer Ansatz verfolgt. Transdisziplinarität ist ein methodisches Vorgehen, das wissenschaftliches und praktisches Wissen verbindet. Die Nutzung solcher transdisziplinären Ansätze wird von der Notwendigkeit angetrieben, komplexe Probleme der realen Lebenswelt zu lösen und hierbei die Vielfalt wissenschaftlicher und gesellschaftlicher Sichtweisen dieser Probleme zu berücksichtigen. Seit Ende des 20. Jahrhundert haben sich in der Wissenschaft und der Wissensgesellschaft immer mehr transdisziplinäre Orientierungen durchgesetzt (Hadorn et al. 2008).

Der am Borderstep Institut entwickelte transdisziplinäre Ansatz zieht in einem gestuften Verfahren Experten aus Wissenschaft, Gesellschaft in die Identifikation, die Analyse und die Bewertung neuer nachhaltiger Technologien ein. Transdisziplinäre Forschung ist für solche Problemstellungen, bei denen eine hohe Unsicherheit besteht und bei der verschiedene Wertvorstellungen zum Tragen kommen, besonders geeignet (Funtowicz und Ravetz 2003). Gerade bei Nachhaltigkeits-Themenstellungen haben transdisziplinäre Forschungsansätze ihre Stärken (Baumgärtner et al. 2008; Brandt et al. 2013; Lang et al. 2012; Nanz et al. 2017). Transdisziplinäre Forschung adressiert vor allem drei verschiedene Arten von Wissen: das Systemwissen, das Zielwissen und das Transformationswissen. Systemwissen bezieht sich auf Fragen über die Entstehung und mögliche Entwicklung eines Problemfeldes und über Interpretationen der Probleme in der Lebenswelt. Zielwissen beinhaltet Wissen über die Bestimmung und Erläuterung von praxisorientierten Zielen. Und Transformationswissen bezieht sich auf die Entwicklung von pragmatischen Mitteln und Möglichkeiten, die bestehenden Systeme zu transformieren (Pohl und Hadorn 2007). Diese drei Wissensarten werden auch bei der Technologieanalyse des Borderstep-Instituts adressiert. Zum einen werden in einer Kombination von Wissen aus Forschung und praktischer Anwendung neue Technologien analysiert und beschrieben (Systemwissen). Zum zweiten werden die Technologien im Hinblick auf Nachhaltigkeitsziele bewertet (Zielwissen). Drittens erfolgen gemeinsam mit Praxispartnern ein Transfer der gewonnenen Erkenntnisse und eine Förderung der als erfolgversprechend identifizierten Technologien (Transferwissen).

Im konkreten Fall wurde das transdisziplinäre Vorgehen zur Entwicklung der oben vorgestellten Technologieradare für energieeffiziente Rechenzentrumstechnologien angewendet. Die Vorgehensweise orientiert sich an den typischen drei Phasen eines transdisziplinären Vorhabens: die Phase der Problemidentifikation und Problemstrukturierung, die Phase der Problemforschung und die Implementierungs-Phase (Elzinga 2008; Pohl und Hadorn 2007).

Insgesamt wurden ca. 50 Rechenzentrumsexperten aus Wissenschaft und Wirtschaft in den Prozess einbezogen. Hierunter waren Vertreter aus der Wirtschaft wie Rechenzentrumsbetreiber, Rechenzentrumsdienstleister (Planer und Berater) und Rechenzentrumsausrüster (Hersteller von IT-Hardware und –Software, Klimatechnik, Energietechnik, Mess-, Steuer- und Regelungstechnik). Außerdem wurden Wissenschaftler aus sechs verschiedenen Disziplinen (Informatik, Klimatechnik, Wirtschaftswissenschaften, Materialwissenschaften, Umwelttechnik und Energiewirtschaft) in den Prozess einbezogen.

Auf Basis umfangreicher Technologie-Recherchen wurden im Rahmen der Problemforschungsphase von einem interdisziplinären Team von Borderstep-Wissenschaftlern erste Entwürfe für drei Technologieradare in den oben genannten Technologiefelder entwickelt. Als Quellen wurden Fachzeitschriften und Onlineportale für Rechenzentrumstechnologien verwendet wie z.B. dcd, IT Business, Technology Review, www.datacenterknowledge.com, www.networkworld.com, www.datacenterjournal.com, www.datacenterdynamics.com, www.datacenterweek.com, www.datacenterinsider.de oder www.lanline.de. Zusätzlich wurden zu einzelnen Technologien Fachinterviews mit Experten geführt. Außerdem analysiert wurden die Preisträger von Rechenzentrumspreisen der letzten Jahre, wie dem DCD Award, dem Datacloud Award, dem Datacenter Week Award oder dem Deutschen Rechenzentrumspreis.

Die so entwickelten Technologieradare wurden auf einem TEMPRO-internen Workshop am 11. Oktober 2017 in Berlin den Fachexperten aus Unternehmen und Wissenschaft vorgestellt. Es folgte eine sechswöchige Kommentierungsphase, in der die Technologieradare weiterentwickelt und ergänzt wurden. Das Zwischenergebnis wurde dann auf einem Innovationsworkshop am 5. Dezember 2017 in Berlin externen Experten vorgestellt. An dem Workshop nahmen insgesamt 15 Experten teil. Darunter waren Vertreter großer internationaler IT-Hersteller, internationaler Hersteller von Klimatisierungs- und Stromversorgungsinfrastruktur, Rechenzentrumsberater sowie Vertreter unterschiedlicher wissenschaftlicher Disziplinen an Hochschulen. Im Rahmen des Workshops wurden die Innovationsradare noch einmal geringfügig ergänzt und angepasst. Außerdem wurde gemeinsam eine Priorisierung der besonders bedeutenden Energieeffizienz-Technologien vorgenommen.

AP4.3: Bewertung der ressourcenrelevanten technologischen Entwicklungen und Bestimmung der für die Umsetzung in TEMPRO geeigneten Technologien

4.3.1 Technologieradar für Kühlung/Klimatisierung in Rechenzentren

In der folgenden Abbildung wird der Technologieradar für den Bereich der effizienten Kühlung und Klimatisierung von Rechenzentren dargestellt.

Borderstep/TEMPRO-Technologieradar Energieeffizienz in Rechenzentren Kühlung/Klimatisierung

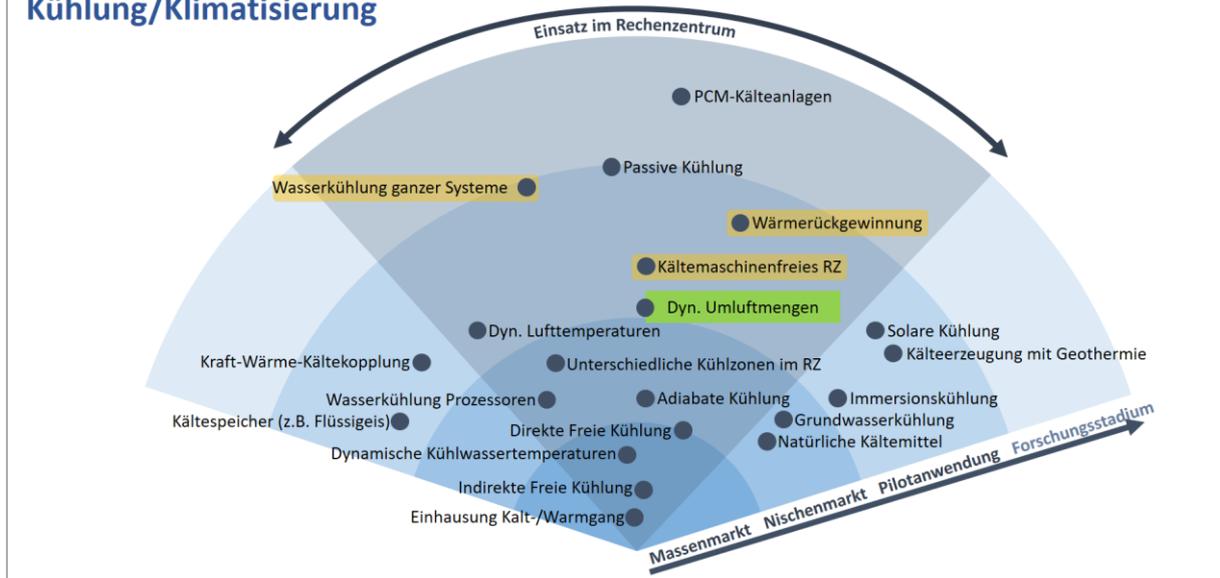


Abbildung 60: Technologieradar für Kühlung und Klimatisierung

Im Bereich der Kühlung, Klimatisierung und Belüftung wurden 21 verschiedene Energieeffizienztechnologien identifiziert und im Detail analysiert. Für jede der in den Technologieradaren erwähnten Technologien wurde gemeinsam mit den Experten ein einseitiges Faktenblatt erstellt. Die Lösungen reichen von etablierten Technologien wie der Indirekten Freien Kühlung bis hin zu den Forschungsprojekten wie dem Einsatz von Phase Change Materials (PCM) zur Kühlung in Rechenzentren. Auch Kühlösungen aus anderen Branchen, die bisher noch nicht in Rechenzentren eingesetzt wurden, wurden berücksichtigt. Dies sind zum Beispiel Kältespeicher mit Flüssigeis.

Auf dem Innovationsworkshop im Dezember 2017 stimmten die Experten über die Bedeutung der verschiedenen Technologien ab. Die drei wichtigsten Technologien sind im Radar gelb hervorgehoben. Im Folgenden werden diese Technologien kurz dargestellt.

Wasserkühlung ganzer Server: Bei der Wasserkühlung ganzer Server handelt es sich um eine Methode der Serverkühlung, bei der alle relevanten Komponenten eines Servers thermisch zu einem wasserabgeleiteten System geleitet werden. Dazu sammelt ein individuell geformter, mit Wasserrohren verbundener Metallkörper die gesamte Wärme von den Komponenten. Da dieses Konzept nur einen Einlass und einen Auslass verwendet, wird das Risiko von Leckagen minimiert.

Dieses System kann die Energieeffizienz verbessern, indem der Massenstrom des Kühlmittels aufgrund der höheren Wärmekapazität von Wasser (im Vergleich zu Luft) reduziert wird. Darüber hinaus verbessert die Wasserkühlung die Möglichkeiten Abwärmenutzung erheblich, da deutlich höhere Betriebstemperaturen ermöglicht werden.

Wärmerückgewinnung: Die gesamte elektrische Energie, die die Geräte und Anlagen des Rechenzentrums (z.B. IT, USV, Beleuchtung) versorgt, wird letztlich in Wärmeenergie umgewandelt. Diese Niedertemperaturwärme kann durch den Einsatz verschiedener Technologien zurückgewonnen werden und für andere Zwecke wie Heizung und Warmwasseraufbereitung genutzt werden.

Eine direkte Methode der Wärmerückgewinnung ist die Nutzung der Abwärme für die Heizung der Räume des Rechenzentrums, z.B. für Büroräume während des Winters. Darüber hinaus können andere Anlagen mit Niedertemperaturwärme versorgt werden, z.B. Gewächshäuser oder Schwimmbäder. Eine indirekte Wärmerückgewinnung kann mit einem Wärmepumpensystem erfolgen, mit dem die Abwärme auf ein höheres Temperaturniveau gebracht wird. Wenn die Wärme über eine gewisse Distanz transportiert werden muss, ist es zwingend erforderlich, die Wärme an Flüssigkeiten mit einer deutlich höheren Wärmekapazität als Luft - zum Beispiel Wasser - zu übertragen.

Zur Verbesserung der Effektivität und des Temperaturniveaus kann die Wärmerückgewinnung mit einer direkten Flüssigkeitskühlung der IT-Komponenten kombiniert werden, beispielsweise durch Tauchkühlung oder Wasserkühlung ganzer Systeme.

Kältemaschinenfreies Rechenzentrum: Der Betrieb von Kühlsystemen in Rechenzentren hängt hauptsächlich von zwei Temperaturen ab, der maximal zulässigen Temperatur der Wärmequelle (IT-Hardware, USV) und der Temperatur des Kühlkörpers. Solange die Temperatur des Kühlkörpers niedriger ist als die maximal zulässige Eintrittstemperatur für den Kühlkreislauf (plus einer ΔT für einen Wärmetauscher), kann die Kühlung ohne Kältemaschine erfolgen.

Die identifizierten und bewerteten Effizienztechnologien für die Kühlung und Klimatisierung von Rechenzentren wurden auch dahingehend bewertet, ob eine Erforschung und prototypische Umsetzung im Rahmen von AP 5 von TEMPRO möglich ist. Die drei oben genannten Technologien stellen leider sehr hohe Anforderungen an die vorhandenen Anlagen und Testeinrichtungen. Diese waren ohne einen erheblichen Mehraufwand in die Investition der verfügbaren Testanlagen zum Zeitpunkt der Bewertung nicht zu erfüllen.

Eine weitere identifizierte erfolgversprechende Technologie, die Volumenstromregelung unter Verwendung von Serverdaten, konnte in AP 5 prototypisch umgesetzt werden.

4.3.2 Technologieradar für Energieversorgung/-erzeugung in Rechenzentren

Der zweite Technologieradar bezieht sich auf die Technologien um Energieversorgung und -erzeugung von Rechenzentren. In der folgenden Abbildung sind die wesentlichen Technologien und Innovationen dargestellt.

Borderstep/TEMPRO-Technologieradar Energieeffizienz in Rechenzentren Energieversorgung und -erzeugung

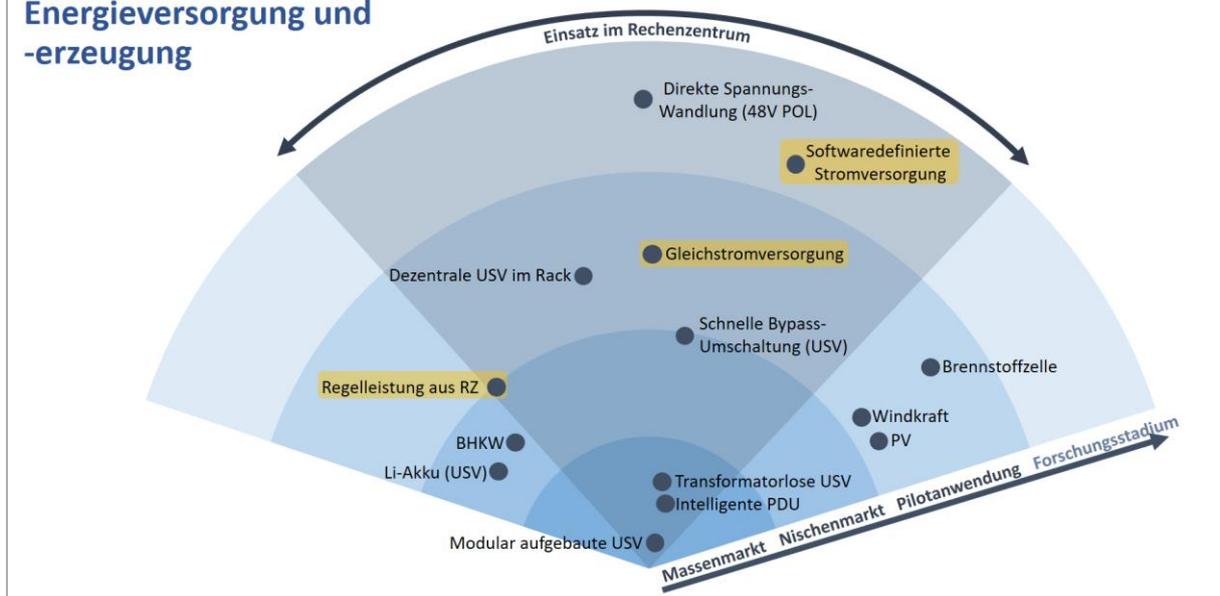


Abbildung 61: Technologieradar für Energieversorgung und -erzeugung

Insgesamt wurden 14 verschiedene Energieeffizienztechnologien im Bereich der Energieversorgung/-erzeugung identifiziert. Im Detail wurden Lösungen diskutiert und analysiert, die bereits heute in Rechenzentren eingesetzt werden, deren Einsatz aber auch weiter gefördert werden sollte, wie zum Beispiel modulare USVs. Aber auch Lösungen, die sich noch im Forschungsstadium befinden, wie z.B. die e48V POL-Technologie, bei der die Stromversorgung mit 48V ohne eigene Serverstromversorgung bis zum Point of Load (POL) erfolgt.

Die in Abbildung 61 gelb markierten Technologien wurden von den Experten auf dem Innovationsworkshop im Dezember 2017 als besonders erfolgsversprechen bewertet.

Regelleistung aus RZ: Die Komponenten eines Rechenzentrums, insbesondere eine unterbrechungsfreie Stromversorgung und ein Dieselgenerator, können das Stromnetz flexibel im Rahmen der sogenannten Sekunden- oder Minutenreserve mit Strom versorgen. Je nach lokalen technischen und marktwirtschaftlichen Vorschriften (z.B. Regierung, Netzbetreiber, Energiemarkt) kann es möglich und rentabel sein, diese Einrichtungen zur Flexibilisierung des Stromnetzes zu nutzen.

Gleichstromversorgung: Fast jedes Rechenzentrum wird mit Wechselstrom aus einem Stromnetz versorgt. In den meisten Rechenzentren wird dieser Wechselstrom mehrfach umgewandelt, z.B. in den USVen in Gleichstrom zur Versorgung der Batterien, dann wieder in Wechselstrom und anschließend wieder in Gleichstrom auf Serverebene (z.B. 12 V, 5 V). Die mehrfache Spannungswandlung ist mit Verlusten verbunden, die bei einer zentralen Gleichstromversorgung des Rechenzentrums deutlich reduziert werden könnten. Im Bereich von Telekommunikationsinfrastrukturen wird eine Gleichstromversorgung schon seit langem eingesetzt, für Rechenzentren gibt es erst einige Pilotprojekte.

Softwaredefinierte Stromversorgung: Neue Servertechnologien integrieren alle Komponenten der lokalen Energieumwandlung von Servern und Racks in das Management des Rechenzentrums. Dies kann dazu beitragen, die gesamte Stromversorgung zu optimieren und an die aktuelle Arbeitslast anzupassen. Die Software kann auch auf die bei Änderung der Eigenschaften von Bauteilen durch Alterung reagieren und damit einen stabileren Betrieb gewährleisten (DataCenter Insider 2017; electronicspecifier.com 2017).

Die Technologien im Bereich Energieversorgung und -erzeugung konnten im Rahmen von TEMPRO nicht erforscht werden, da entsprechende Prüfstände nicht verfügbar waren.

4.3.1 Technologieradar für IT und IT-Management

Der dritte Bereich der Effizienztechnologien in Rechenzentren konzentriert sich auf Technologien innerhalb der IT und des IT-Managements selbst. Er umfasst sowohl energieeffiziente Computertechnologien als auch Management-Tools, die die Gesamteffizienz der IT-Hardware in Rechenzentren verbessern. Abbildung 62 zeigt das Technologie-Radar für diesen Bereich.

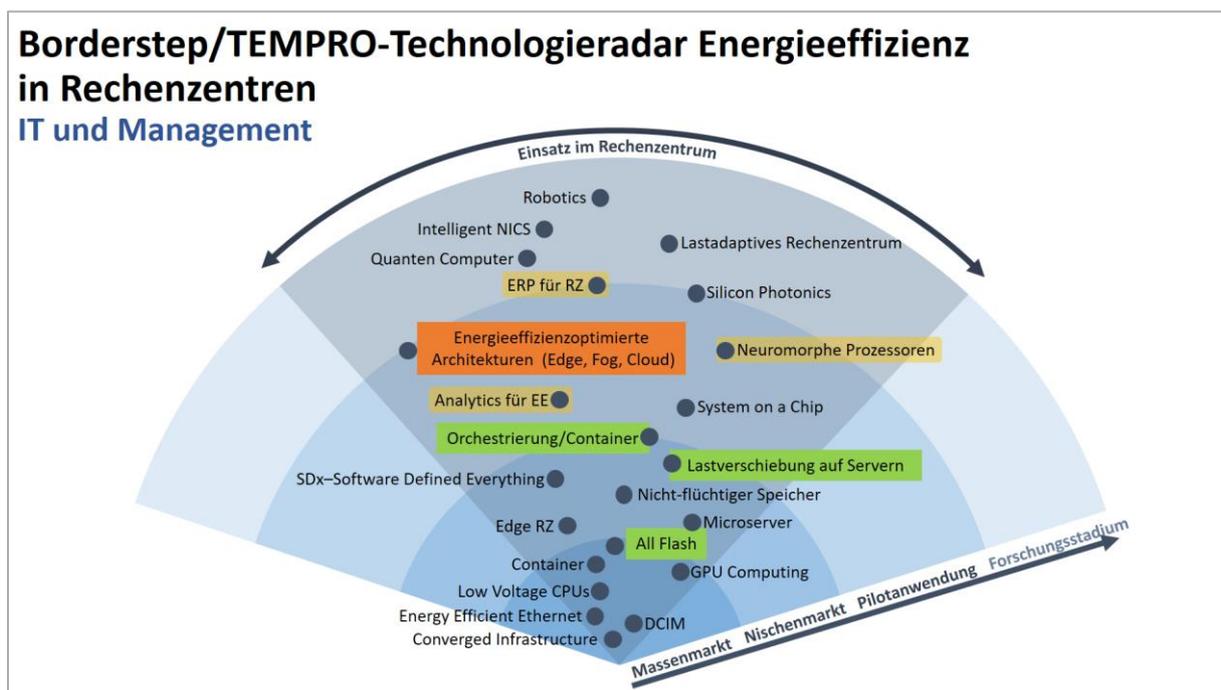


Abbildung 62: Technologieradar für IT und IT-Management

Im Bereich IT und IT-Management wurden insgesamt 23 verschiedene Technologien identifiziert und analysiert, die geeignet sind, die Energieeffizienz von Rechenzentren in Zukunft weiter zu steigern. Das Spektrum der Technologien reicht von bestehenden Lösungen wie All-Flash-Lösungen bis hin zu Quantencomputern.

Die folgenden Technologien wurden im Innovationsworkshop im Dezember 2017 als hoch signifikant für die Energieeffizienz von Rechenzentren identifiziert:

Enterprise Resource Planning (ERP) für Rechenzentren: ERP optimiert den Gesamtbetrieb in einem Unternehmen wie einem Rechenzentrum. Moderne Implementierungen verwenden Softwaretools zur Überwachung und Anpassung von Betriebsprozessen. Durch diese ständige Optimierung der Prozesse

im Rechenzentrum kann ein Rechenzentrum sowohl in ökonomischer als auch in ökologischer Hinsicht mit maximaler Effizienz arbeiten.

Analytics für Energieeffizienz: Moderne Rechenzentren sind mit einer hohen Anzahl von Sensoren und Messgeräten ausgestattet, die die energieverbrauchsrelevanten Prozesse ständig überwachen. Mit Hilfe von Technologien der künstlichen Intelligenz können die aufgenommenen Daten analysiert werden und Strategien abgeleitet werden, wie das Rechenzentrum energieeffizienter betrieben werden kann. Solche Lösungen eignen sich sowohl für den Einsatz auf der Infrastrukturebene der Rechenzentren (Kühlung/Stromversorgung) als auch auf der Ebene des IT-Managements.

Neuromorphe Prozessoren: Neuromorphe Prozessoren bilden die Funktion des biologischen zentralen Nervensystems innerhalb komplexer Schaltkreise durch eine Kombination von digitalen und analogen Komponenten ab. Die meisten Algorithmen der künstlichen Intelligenz (KI) simulieren neuronale Netzwerke. Neuromorphe Prozessoren können KI-Funktionen direkt ins Silizium integrieren ("neuromorphe Chips"). Diese Chips führen spezifische Aufgaben im Vergleich zu herkömmlichen Chips viel schneller und mit größerer Energieeffizienz aus und sind in der Lage, die Gesamteffizienz der IKT zu verbessern (Knight 2018).

Die drei identifizierten Technologien mit sehr hohen Potenzialen befinden sich noch in der Pilotphase oder im Forschungsstadium. Die Weiterentwicklung dieser Technologien innerhalb von TEMPRO scheitert an den nicht verfügbaren Geräten und Anlagen sowie an dem für die Technologien erforderlichen spezifischen Know-how.

Es würden mit dem Technologieradar zur IT und IT Management aber drei weitere Technologien identifiziert, die in AP 5 umgesetzt werden konnten. Diese Technologien sind in Abbildung 62 grün markiert: Lastverschiebung auf Servern, All Flash und Orchestrierung/Container.

Außerdem wurde die Thematik der Berücksichtigung von Energie- und Ressourceneffizienzaspekten bei künftigen IT-Architekturen als besonders wichtig erachtet (orange markiert). Die Analysen in AP 1 zeigen, dass insbesondere der Aufbau von Edge Rechenzentren mit deutlichen Erhöhungen des Energiebedarfs der Rechenzentren verbunden sein kann.

Erste Ergebnisse und Auszüge aus den Technologieradaren wurden bei nicht öffentlichen Fachworkshops z.B. auf der Konferenz Future Thinking im Jahr 2018 vorgestellt. Ebenso wurden die Ergebnisse im Arbeitskreis Rechenzentrum des deutschen Digital-Verbandes Bitkom im Juni 2018 vorgestellt und diskutiert. Die internationale Veröffentlichung der Ergebnisse im Rahmen dieses Papers ist ein weiterer wichtiger Schritt. Danach sollen die Technologieradare gemeinsam mit den beteiligten Praxispartnern in einem abgestimmten Verfahren weiten Teilen der Fachöffentlichkeit durch Vorträge, Publikationen in Zeitschriften, Blog-Beiträgen und ähnlichem zur Verfügung gestellt werden.

AP5 Entwicklung, Erprobung und prototypische Umsetzung erfolgversprechender Effizienztechnologien

Tabelle 21: Übersicht AP 5

Übersicht AP 5			
	Start: 1. Monat		Dauer: 36 Monate
Titel	Erforschung erfolgversprechender Effizienztechnologien		
Zielsetzung	Entwicklung, Erprobung und prototypische Umsetzung erfolgversprechender Effizienztechnologien		
Federführender Partner	AP 5 Koordination: Borderstep		
	AP 5.1: dc-ce	AP 5.2: BTC	AP 5.3: KDO
Unterarbeitspakete	<ul style="list-style-type: none"> ▪ AP 5.1 (Effiziente Kühlung): Entwicklung, Erprobung und prototypischen Umsetzung von Effizienztechnologien im Bereich der Klimatisierung und der USV in einem Testrechenzentrum (dc-ce, Borderstep, UOL-PIN) ▪ AP 5.2 (Effiziente Cloud): Entwicklung, Erprobung und prototypischen Umsetzung von Effizienztechnologien im Bereich von Speicher- und Netzwerklösungen für Cloud Services (BTC, Borderstep, UOL-PIN) ▪ AP 5.3 (Störfall): Entwicklung, Erprobung und prototypischen Umsetzung von automatisierten Mechanismen zur zügigen Systemverlagerung und –abschaltung bei zu hohen Temperaturen in Rechenzentren (KDO, Borderstep, UOL-PIN) 		
Ergebnisse	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Prototyp einer übergreifenden Temperaturregelung unter Berücksichtigung der Lüfterleistung in Servern ▪ Prototyp einer dynamischen Leistungsregelung für Klimaanlage mit optimierten Algorithmen ▪ Prototyp eines energieeffizienten cloudfähigen Speichersystems unter Verwendung von Flashspeichern ▪ Prototyp einer energieeffizienten cloudfähigen Netzwerk-Infrastruktur auf Basis von Virtualisierungstechniken ▪ Entwicklung von Regelalgorithmen und prototypische Implementierung zum dynamischen Management von IT-Lasten mit Hilfe von OpenNebula ▪ Prototyp einer Softwarelösung zum Notfallmanagement von IT-Lasten auf Basis von OpenNebula ▪ Dokumentation der Ergebnisse von drei Innovationsworkshops ▪ Zusammenfassende Darstellung der Effizienzpotenziale, relevanter Kundenanforderungen und möglicher Anwendungsszenarien für die erforschten Technologien (Meilenstein 6) 		

Das AP 5 gliedert sich in drei Unterarbeitspakete auf, die jeweils von einem der Praxispartner federführend geleitet wurden. Auf Basis der Ergebnisse in AP4 wurden erfolgversprechende Effizienztechnologien bei den Praxispartnern erforscht und im Projekt prototypisch umgesetzt.

Hierbei wurden die Unternehmen von Borderstep und UOL-PIN unterstützt. Borderstep recherchiert und ermittelt für die in den Unterarbeitspaketen erforschten Technologien die Effizienzpotenziale, die relevanten Kundenanforderungen und mögliche Anwendungsszenarien für die Technologien. Diese Ergebnisse wurden als Input zu jeweils einem Innovationsworkshop pro Unterarbeitspaket aufbereitet (insgesamt 3 Workshops). Außerdem haben die Praxispartner in Kooperation mit UOL-PIN und Borderstep jeweils ein Arbeitspapier zur Darstellung der Entwicklungsarbeiten und der Ziele des Arbeitspaketes für den Innovationsworkshop erarbeitet. Die Innovationsworkshops selbst wurden von UOL-PIN konzipiert, moderiert und nachbereitet. Borderstep stellt auch den Transfer des in den anderen Arbeitspaketen gewonnen Know-hows in die technischen Entwicklungsarbeiten sicher.

Im AP5.1 wurden Technologien zur Kühlung von Rechenzentren erforscht und prototypisch umgesetzt. AP5.1 wurde federführend von dc-ce rz-Beratung bearbeitet. dc-ce verfügt über ein Testrechenzentrum in Berlin, indem die neuen Konzepte zur Kühlung pilotweise umgesetzt werden konnten.

Im AP5.2 wurden neue Lösungen zu Lastmanagement mit Container-Technologie sowie zum Aufbau von energieeffizienten Netzwerkstrukturen insbesondere in Cloud-Computing-Umgebungen erforscht und in einer Testumgebung prototypisch umgesetzt. AP5.2 wurde federführend von BTC bearbeitet. BTC verfügt über eine Server-Testumgebung für Cloud-Dienste, die im Rahmen des Vorhabens erweitert wurde.

Im AP5.3 wurden Lösungen zum Management von hohen Temperaturen in Rechenzentren erforscht und prototypisch umgesetzt. Das Arbeitspaket wurde federführend von der KDO bearbeitet. Hohe Temperaturen im Rechenzentrum ermöglichen eine hohe Effizienz bei der Kühlung. Aktuelle IT-Hardware ist so ausgelegt, dass problemlos Raumtemperaturen (Zulufttemperaturen) von bis zu 30°C im Rechenzentrum realisiert werden können. Aus Sicht des zuverlässigen Rechenzentrumsbetriebs stellen so hohe Temperaturen jedoch eine große Herausforderung bei einem Störfall in der Kühlanlage dar. Durch die hohen Temperaturen sinkt die Zeit zwischen Auftreten des Störfalls und Ausfall der IT-Hardware dramatisch. Um hohe Temperaturen im Rechenzentrum realisieren zu können und dennoch eine hohe Zuverlässigkeit auch bei Störfällen zu erreichen, ist die Entwicklung von Mechanismen notwendig, die den Zeitraum zwischen Auftreten des Störfalls und Ausfällen der Hardware verlängern bzw. im Idealfall sogar dazu führen, dass die Hardware nicht ausfällt. Bei der KDO wurden Mechanismen entwickelt und getestet werden, mit denen ein zuverlässiger Betrieb der IT auch bei sehr hohen Raumtemperaturen möglich ist.

Zur Unterstützung der Entwicklungsarbeiten und einem Abgleich der Entwicklungsziele mit den Anforderungen wurden im ersten Halbjahr 2018 zu jedem Unterarbeitspaket jeweils ein Innovationsworkshop durchgeführt. Die Innovationsworkshops wurden von UOL-PIN mit Unterstützung von Borderstep konzipiert, vorbereitet, durchgeführt und ausgewertet. Auf den Innovationsworkshops (Abbildung 63) wurden jeweils zunächst vom Borderstep Institut die für die verschiedenen betrachteten Lösungen die Effizienzpotenziale, die relevanten Kundenanforderungen und mögliche Anwendungsszenarien für die Technologien dargestellt. Gemeinsam mit internen und externen Experten wurden Hemmnisse und Chancen der Technologien diskutiert und Anforderungen an die Entwicklung definiert.



Abbildung 63: Innovationsworkshop zu AP 5.1 auf der Future Thinking 2018

Die wesentlichen Ergebnisse in AP 5 können zusammenfassend wie folgt dargestellt werden:

- Die Forschungsarbeiten in den drei Unterarbeitspaketen führten jeweils zur Entwicklung und Fertigstellung von erfolgversprechenden Prototypen, mit denen in der Zukunft Rechenzentren deutlich energieeffizienter betrieben werden können.
- AP 5.1 lieferte vielfältige neue Erkenntnisse zur Klimatisierung von Rechenzentren, die bereits auf Konferenzen und in einem wissenschaftlichen Journal publiziert wurden. Am Hermann-Rietschel-Institut der TU Berlin wurde im Rahmen von TEMPRO ein neuer Prüfstand aufgebaut, mit der die Kühlungslösungen getestet werden konnten. Eine neuartige Volumenstromregelung auf Basis von Servertemperaturdaten wurde hierauf erfolgreich in einem Proof-of-Concept prototypisch umgesetzt. Der Einsatz der Lösung verspricht damit Einsparpotenziale von 2 bis 5%, gemessen am Gesamtenergiebedarf des Rechenzentrums.
- In AP 5.2 wurde in einer Testumgebung bei BTC ein Prototyp für eine energieeffiziente Cloud-Lösung aufgebaut. Die Lösung setzt basiert auf der Nutzung von Container-Technologien und einem energieeffizienten Cloud Speicher. Je nach Ausgangssituation im Rechenzentrum sind durch den Einsatz der Container-Lösung Energieeinsparungen von 10 bis 40% möglich. Auch die Materialeffizienz des Rechenzentrums kann durch die Lösung deutlich erhöht werden. Konservativ abgeschätzt können bis zu 20% der Serverhardware eingespart werden. Der energieeffiziente Cloud-Speicher ermöglicht in einem typischen Rechenzentrum eine Energieeinsparung von ca. 12 % gegenüber einer herkömmlichen Lösung.
- AP 5.3 lieferte die prototypische Umsetzung einer Lösung zum Störfallmanagement bei Ausfall der Klimaanlage. Die Lösung ermöglicht es, die Ausfallsicherheit im Rechenzentrum zu

verbessern und gleichzeitig die Temperatur zu erhöhen. Damit wird die Effizienz der Klimatisierung gesteigert. Für ein typisches Rechenzentrum sind Einsparung der Kühlenergie von ca. 20% möglich. Bezogen auf den Gesamtenergiebedarf des Rechenzentrums bedeutet dies Einsparungen von etwa 5 %.

- Insgesamt kann festgestellt werden, dass im Rahmen von AP 5 vielversprechende neue Technologien zur Erhöhung der Energieeffizienz von Rechenzentren prototypisch entwickelt wurden. Mit Hilfe des Berechnungsmodells aus AP 1 wurde ermittelt, dass beim Einsatz dieser Technologien realistische Einsparungen der Rechenzentren in Deutschland von ca. 10 % möglich sind. Damit könnten etwa 1,5 Mrd. kWh elektrische Energie pro Jahr eingespart werden.

AP5.1: Effiziente Kühlung

Im „Arbeitspaket 5.1: Effiziente Kühlung“ wurden auf Basis der Arbeiten in AP 4, der verfügbaren Testmöglichkeiten und der Innovationsworkshops zwei Technologiefelder prototypisch erprobt, die für eine Bezugnahme auf die Übertragbarkeit der Erkenntnisse bei Bestandsrechenzentren sowie für neue Rechenzentren mit Luftkühlung geeignet sind. Hierbei handelt es sich um einen Proof-of-Concept zu einer Volumenstromregelung innerhalb des Rechenzentrums, welche nicht von den klassischen physikalischen Größen Druck oder Temperatur im Serverraum abhängig ist, sondern sich anhand der Servertemperaturdaten regeln lässt. Außerdem wurde der Einfluss einer gezielten Luftführung auf die Energieeffizienz und die Kühlung der im Serverrack über die einzelnen Höheneinheiten verteilten Server untersucht.

Die Ergebnisse der Luftführungsuntersuchung wurden in einem Journal (Tawackolian et al. 2020) veröffentlicht. Aus diesem Grund wird auf das Proof-of-Concept zur Volumenstromregelung detaillierter eingegangen.

Zur Umsetzung beider Untersuchungsbereiche wurde am Hermann-Rietschel-Institut der TU Berlin ein Prüfstand gebaut (siehe Abbildung 64 und Abbildung 65).

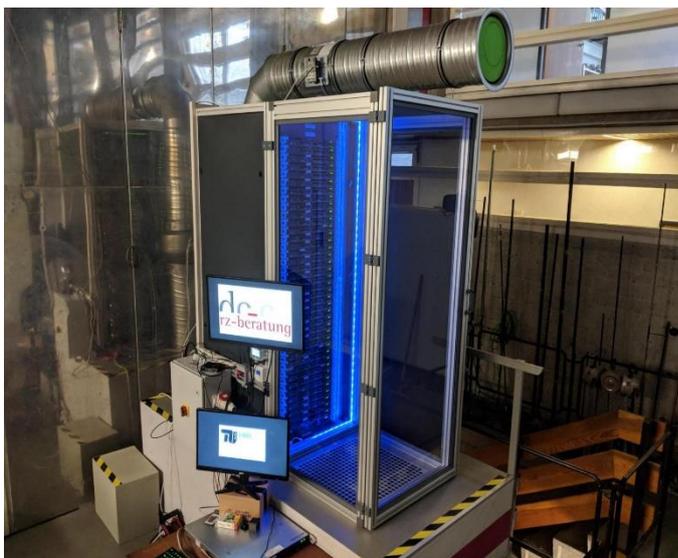


Abbildung 64: Prüfstand

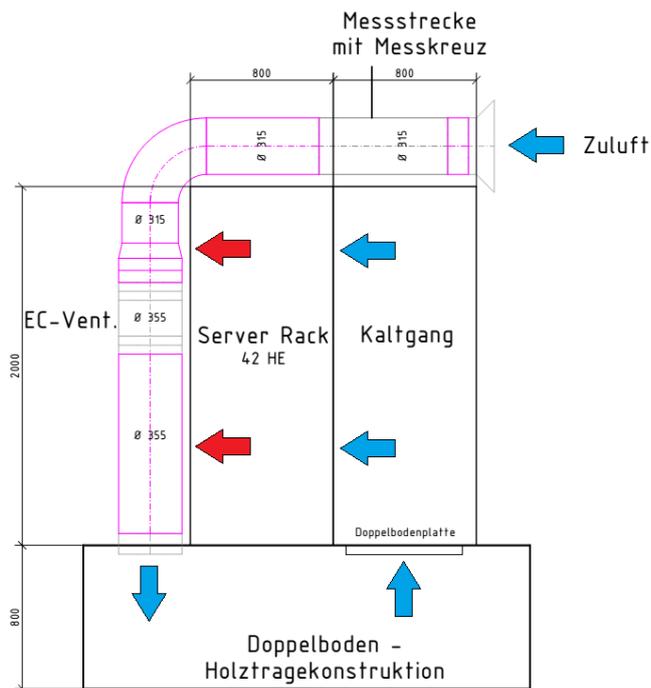


Abbildung 65: Planungsentwurf - Prüfstand für die Kontrolle der Zuluftführung zu den Servern

Der Prüfstand reduziert die Testumgebung auf ein einzelnes 42U-Serverrack mit Kaltgangeinhausung, Doppelboden mit Strömungsgleichrichter und eine Zuluftansaugung mittels regelbarem EC-Rohrventilator. Die Prüfstandsdaten sind in Tabelle 1 dargestellt. In das Rack sind 40 1U-Server gleichen Typs verbaut. Diese sind über zwei PDUs angeschlossen, welche das Auslesen der aktuellen Stromaufnahme ermöglichen. Die Daten der Server sind in Tabelle 22 festgehalten.

Tabelle 22: Prüfstandsdaten.

Durchfluss	400 m ³ /h bis 2.000 m ³ /h
Temperatur	24 °C
Rackleistung, el.	2 kW bis 8 kW
Anlagenventilator	Rosenberg R 355 G.3DI 0,24 kW
Durchflussmesser	TROX VMR 315
Bodenplatte	Mero-TSK
	600 mm × 600 mm
	Freier Querschnitt: 51%

Tabelle 23: Serverhardware.

Anzahl der Server	40 Stück
Chassis	Super Micro SC813M
CPU	Intel E5-1650
RAM	32GByte-DDR3
Board	Super Micro X9SRi-3F
Mainboard-Ventilatoren	4 × DELTA FFB0412SHN 12V, 6W, 13.000 rpm
Netzteil-Ventilatoren	1 × Minebea NMB-MAT model 1611RL-04W-B56 12V, 3W

5.1.1. Untersuchung der Volumenstromregelung – Ein Proof of Concept

In klassischen Rechenzentren wird der Volumenstrom im Rechenzentrum indirekt über physikalische Indikatoren, wie beispielsweise dem Differenzdruck $\Delta p_{CA,HA} = p_{CA} - p_{HA}$, der sich zwischen Kalt (CA)- und Warmgang (HA) aufgrund der Druckerhöhung über die serverinternen Lüfter und der Druckerhöhung der Umluftventilatoren zur Belüftung des IT-Equipments einstellt, geregelt. In der Theorie ergibt sich aus der Annahme eines ideal betrachteten, homogenen Druckfeldes in Kalt- und Warmgang, dass der ideale Regelwert $\Delta p_{CA,HA} = 0$ Pa ist. In diesem Zustand erhöhen die Umluftventilatoren den Druck derart, dass sie die Druckverluste bis unmittelbar vor dem Serverrack überwinden. Mit der Annahme $\Delta p_{CA,HA} < 0$ Pa ist von einer Rückströmung von Warm- zu Kaltgang auszugehen. Hierbei tritt eine Kontaminierung der Server mit warmer Abluft auf, die zu Hotspots führt. Für den Fall $\Delta p_{CA,HA} > 0$ Pa ist von einer ausreichenden Belüftung der Server auszugehen. Hierbei fällt die Druckerhöhung über die Umluftventilatoren höher aus und die Luft wird unter höheren Druckverlusten durch die Server gefördert. Infolge von Leckagen im Serverrack treten zusätzliche Verluste auf, die die Lüftungseffizienz beeinträchtigen. In der Realität ist eine Homogenität des Druckfeldes aufgrund von Leckagen, strömungstechnischen Phänomenen sowie einer gewissen dynamischen Schwankung durch den Betrieb der Server ausgeschlossen. Dies macht eine deutliche Überhöhung des Druckes notwendig, um eine hohe Versorgungssicherheit der Server mit Kühlluft zu gewährleisten. Am Serverrack-Prüfstand wird die Machbarkeit einer neuen Regelstrategie erprobt. Die Regelstrategie nutzt hierbei die Daten der Server, um hieraus eine direkte Temperaturregelung zu ermöglichen. Das Prinzip der neuen Regelungsmethode ist in Abbildung 66 dargestellt.

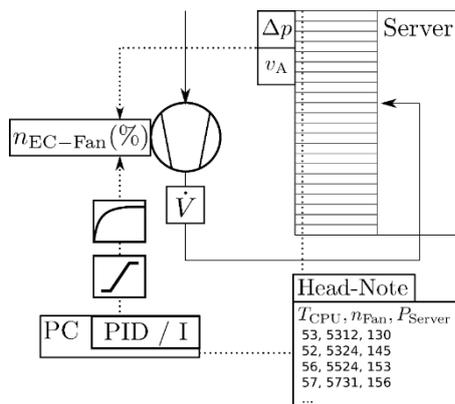


Abbildung 66: Prinzipdarstellung der Umluftregelung über Serverdaten

Die gesamte Messkette basiert auf einer Umsetzung aus selbstentwickelten Tools mit Hilfe freier Softwarepakete. Der Head-Note fragt sekundlich nach allen Datenpunkten der Server mit einer Abtastrate von $f_S = 1$ Hz. Dabei wird jede Abfrage an einen einzelnen Server in einem separaten Thread verarbeitet, da sich diese Abfrage für eine Parallelisierung gut eignet und die resultierende Abtastrate $f_S < 2$ Hz beträgt. Ein auf Python basierender PID-Regler regelt den EC-Umluftventilator. Dies passiert zum Vergleich mit klassischen Methoden anhand der Stellgrößen $\Delta p_{CA,HA}$ oder v_A , wobei letztere die Überströmgeschwindigkeit zwischen Kalt- und Warmgang respektive zum Differenzdruck darstellt. Das Ziel der Regelungsmethode ist es nun, einen Bezug zur CPU-Temperatur T_{CPU} herzustellen, unter dem eine betriebssichere und bedarfsgerechte Regelung des Volumenstromes ermöglicht wird. Die Genauigkeit der Erfassung der eigentlichen CPU-Temperatur ist dabei komplex, da diese einigen Randbedingungen, sowohl hardwareseitig als auch softwareseitig, unterliegt. Für die Machbarkeitsuntersuchung der Regelungsmethode genügt eine erste Approximation des stationären Betriebsverhaltens jedes einzelnen Servers. Hierbei werden unter bekannten und kontrollierten Umgebungsbedingungen (Zulufttemperatur $T_{SUP} = 25$ °C und $\Delta p_{CA,HA} = 0$ Pa) die mittlere CPU-Leistung eines Servers mit dem Softwarepaket „stress-ng“ mittels Zeta-Funktion von $p_{CPU} = 0 - 100$ % in 10 %-Schritten angehoben und für stationäre Zustände die Temperaturen der CPU gemessen sowie gemittelt. Das Ergebnis einer exemplarischen Messung für einen Server zur Ermittlung der Betriebspunkte ist in Abbildung 68 dargestellt. Die sich daraus ergebenden charakteristischen Verläufe der CPU-Temperatur sind für alle Server in Abbildung 67 dargestellt.

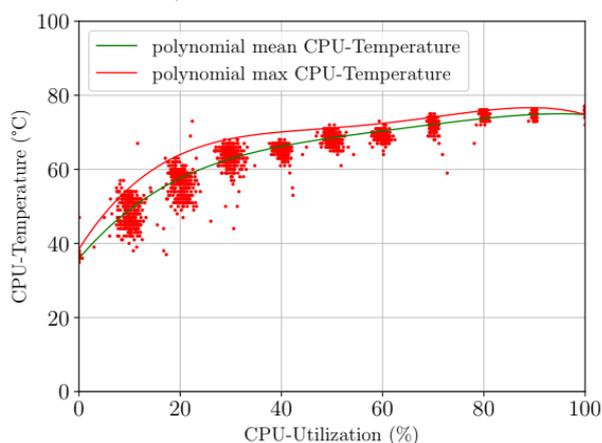


Abbildung 68: Messergebnisse für Server 29. CPU-Temperaturen über CPU-Auslastung.

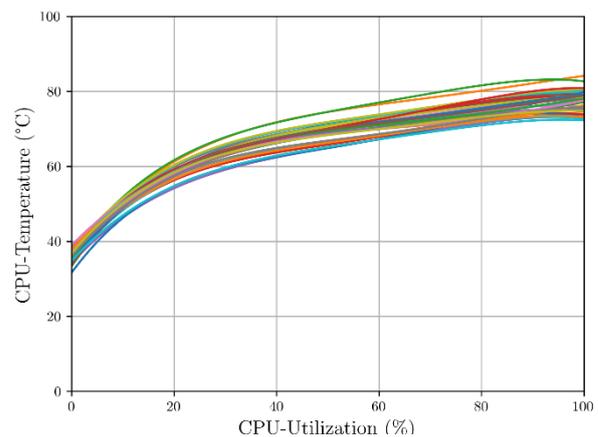


Abbildung 67: Charakteristische CPU-Temperaturverläufe aller Server.

Um eine möglichst genaue Abbildung der Betriebskennlinie eines jeden Servers zu erhalten, werden mittels des Paketes „scipy.optimize“ die Daten an ein Polynom 4. Grades angepasst. Die somit angepassten Funktionen besitzen ein Bestimmtheitsmaß $R^2 > 99$ % und sind infolge dessen hinreichend genau auf Basis der Messdaten abgebildet. Es fällt auf, dass es signifikante Unterschiede der Temperaturcharakteristiken gibt, obwohl die Server hardwareseitig identisch sind. Mögliche Erklärungen hierfür können sowohl Messabweichungen der Sensoren, ein abweichendes Regelverhalten der Lüfter sowie hardwarespezifische Alterserscheinungen oder auch Defekte sein. Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass die Lüfterdrehgeschwindigkeiten innerhalb einer gleichen Baureihe um bis zu 10 % abweichen.

Unter der Annahme, dass sich alle Funktionswerte nach einer ausreichend langen Zeit im Betrieb unter vergleichbaren Bedingungen mit einer geringen Unsicherheit rekonstruieren lassen, kann für die

Regelung mittels Betriebskennlinien eine logische Methode implementiert werden. Diese behandelt, wie bereits angedeutet, zunächst nur den stationären Fall. Hierbei wird für den PID-Regler die Regelgröße x und die Führungsgröße w sowie die daraus entstehende Regelabweichung $e = w - x$ mit den Soll- und Ist-Werten der CPU-Temperatur vorgegeben:

$$\text{Error } \Delta T = T_{SP} - T_{IS}.$$

Der Messcomputer misst zu jedem Zeitpunkt t die aktuelle CPU-Auslastung und ermittelt hiermit die für den Server erwartete CPU-Temperatur, welche zugleich als Sollwert dient. Da der Regler nur einen Sollwert bedienen soll, wird die höchste Abweichung unter allen vorhandenen Servern als aktueller Sollwert eingestellt und das Regelverhalten anhand eines vorab definierten Schwellwertes $\Delta T_{\text{Threshold}}$ abgeleitet. Das Prinzip ist in Abbildung 69 dargestellt.

$$\text{Error } \Delta T = \begin{bmatrix} T_{SP,S1} - T_{IS,S1} \\ T_{SP,S2} - T_{IS,S2} \\ \vdots \\ T_{SP,S40} - T_{IS,S40} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.3^\circ\text{C} \\ 2.7^\circ\text{C} \\ \vdots \\ -0.2^\circ\text{C} \end{bmatrix}$$

← Server 2 selected for control

$\left\{ \begin{array}{l} \Delta T > \Delta T_{\text{Threshold}} \quad \text{Act} \\ \Delta T \leq \Delta T_{\text{Threshold}} \quad \text{Do not act} \end{array} \right.$

Abbildung 69: Beispiel der Regelwertermittlung.

Als Machbarkeitsstudie werden die Server während eines eingeschwungenen Zustandes (Idle) unter Last (50 % CPU-Auslastung) gesetzt und die Temperatur- und Leistungsdaten sowie Fehlerabweichungen erfasst (siehe Abbildung 70). Es ist zu erkennen, dass sich bereits nach $t = 100$ s Laufzeit ein stationärer CPU-Temperaturverlauf einstellt und der Regler in der Lage ist, diesen Wert trotz teilweise großer Schwankungsanteile, bezogen auf die jeweiligen Temperaturmittelwerte, zu halten. Dieses Verhalten ist auch gut in den Verläufen der Regelabweichungen zu erkennen. Für den Regler wurde ein Schwellwert $\Delta T_{\text{Threshold}} = 2^\circ\text{C}$ gewählt. Hierdurch und durch die Verwendung eines moving-average-value der CPU-Temperaturen bei der Datenerfassung wird ein zu starkes Schwankungsverhalten des Reglers kompensiert. Es konnte gezeigt werden, dass eine bedarfsgerechte Regelung mittels Serverdaten möglich ist. Der Regelalgorithmus selbst konnte im Rahmen der Untersuchungen nicht weiter optimiert werden, weshalb dieses Proof of Concept einen Anhaltspunkt für zukünftige Forschungstätigkeiten darstellt. Das energetische Potential dieses Proof of Concept kann nur in Abhängigkeit der aktuellen Regelstrategie eines Bestandsrechenzentrums bewertet werden. Bei deutlich konservativer Differenzdruckregelung (> 4 Pa) in Kombination mit einer hohen kumulierten Serverrackleakage, sind mögliche Einsparpotentiale deutlich höher zu bewerten als bei modernen bedarfsgerechten Regelbetrieben mit geringerer Serverrackleakage.

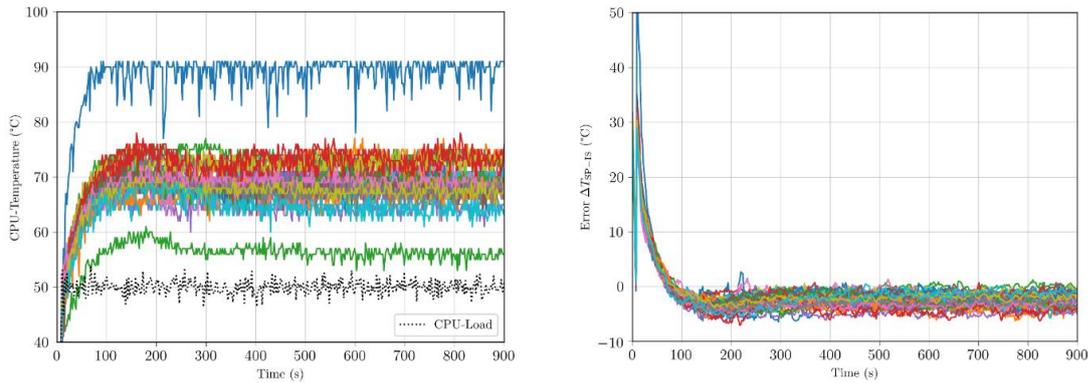


Abbildung 70: Temperaturverläufe (links) und Fehlerabweichung (rechts) bei sprunghafter Änderung von 0 % zu 50 % CPU-Auslastung

Das große Potential liegt in der Erschaffung professioneller Tools für den Rechenzentrumsbetrieb und die Verbindung der gebäudetechnischen Informationen mit der IT-Ebene. Eine weitere, zu untersuchende Fragestellung ist, inwiefern sich diese Anwendung in Bestandsrechenzentren mit großer Hardwareanzahl umsetzen lässt, da nicht alle Server unter kontrollierten stationären Randbedingungen getestet werden können. Dazu wurde zunächst ermittelt, welche Zeitdauer die Server benötigen, um einen stationären Zustandspunkt zu erreichen. Hierfür wurde ein weiterer Benchmark durchgeführt, der sowohl die Temperaturverläufe der Server bei sich ändernden Lastzuständen 0 – 20 % & 0 – 100 % CPU-Leistung sowie den folgenden Idle-Verläufen misst und anhand eines vorgegebenen Thresholds einen stationären Zustand definiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 71 dargestellt. Es ist gut zu erkennen, dass die Abkühlung der Server einen deutlich längeren Zeitraum in Anspruch nimmt als der Aufheizvorgang. Es treten Abweichungen innerhalb Server gleicher Bauart auf. Unter der Annahme, dass alle Server ideal gleich sind, wäre eine einheitliche Temperaturkurve zu erwarten. Diese Abweichungen lassen sich damit erklären, dass der Zusammenbau eines Servers qualitativen Schwankungen unterliegt, die Einfluss auf diese Kurven haben. Unterschiede sind beispielsweise beim Auftragen der Wärmeleitpaste, bei der Taktung der Lüfter, etc. möglich.

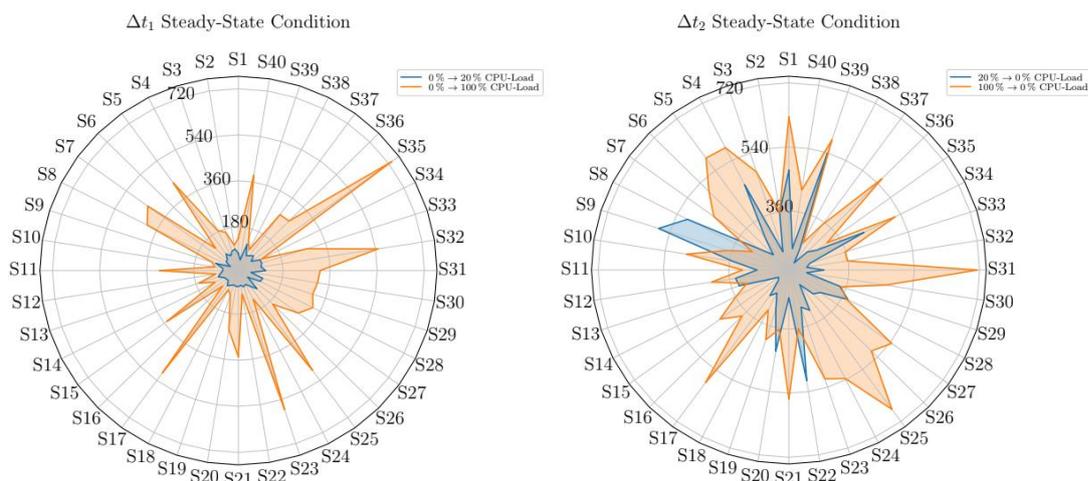


Abbildung 71: Stationäre Verlaufszeiten aller Server für jeweils zwei Belastungs- und Entlastungsvorgänge.

Mit Hilfe dieser Daten lässt sich feststellen, welche Zeitdauer ein einzelner Server benötigt, um einen stationären thermischen Zustand zu erreichen. Mit Hilfe dieser Information wurde eine Untersuchung unternommen, die einen 72-stündigen Benchmark mit randomisierten Lastwerten und Verweilzeiten darstellen soll. Dabei wurden innerhalb der Messaufnahme nach variablen Thresholds die Stationaritätszustände der CPU-Auslastung bestimmt und deren gemessene CPU-Temperaturen in kleinen Bins gemittelt. Dabei wird sich auf die Standardabweichung des Moving-Average-Wertes der Temperaturen bezogen. Die so ermittelten Temperaturreferenzpunkte stellen die Basis zur Bildung der Polynome 4. Grades, analog zum Vorgehen unter kontrollierten Randbedingungen, dar. Ein Beispiel für das Ergebnis der Kurvenbildung aus den Messdaten einer 72-stündigen Messung von Server 29 ist in Abbildung 72 dargestellt.

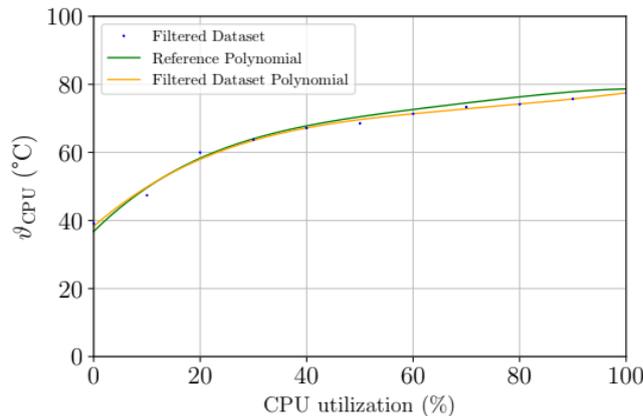


Abbildung 72: Modellierung der Temperaturcharakteristik aus Messdaten unter Realbedingungen.

Das Bestimmtheitsmaß dieser Funktionen ist dabei deutlich von dem Threshold der maximal zulässigen Standardabweichung und der Anzahl der insgesamt aufgenommenen Messpunkte abhängig, was in Abbildung 73 dargestellt ist. Dabei ist zu erkennen, dass eine zu große Anzahl an Messpunkten zu einer Verschlechterung des Bestimmtheitsmaßes führt, was durch ein mögliches „Overfitting“ erklärt werden kann. Gleichzeitig ist das Bestimmtheitsmaß maßgeblich von einer niedrig gewählten Standardabweichung und damit einem insgesamt weniger schwankungsbehafteten Temperaturdatensatz zur Modellbildung abhängig.

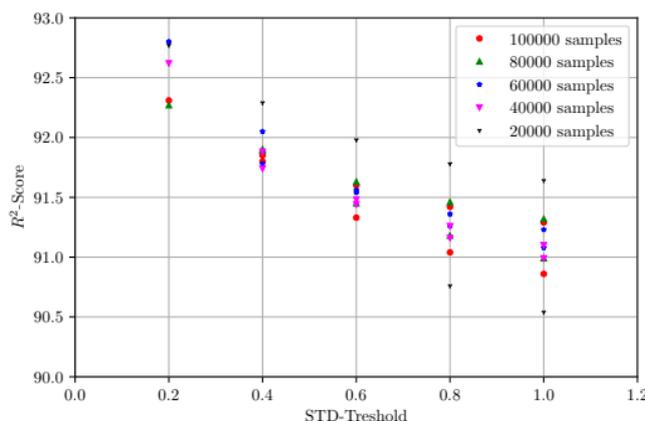


Abbildung 73: Bestimmtheitsmaß über maximale Standardabweichung des Moving-Average der CPU-Temperatur.

5.1.2. Untersuchung der Luftführung

Zur Untersuchung des Einflusses der Luftführung wurde der Serverrack-Prüfstand mit Hilfe von Star-CCM+ als Modell nachgebaut und simuliert, siehe Abbildung 74.

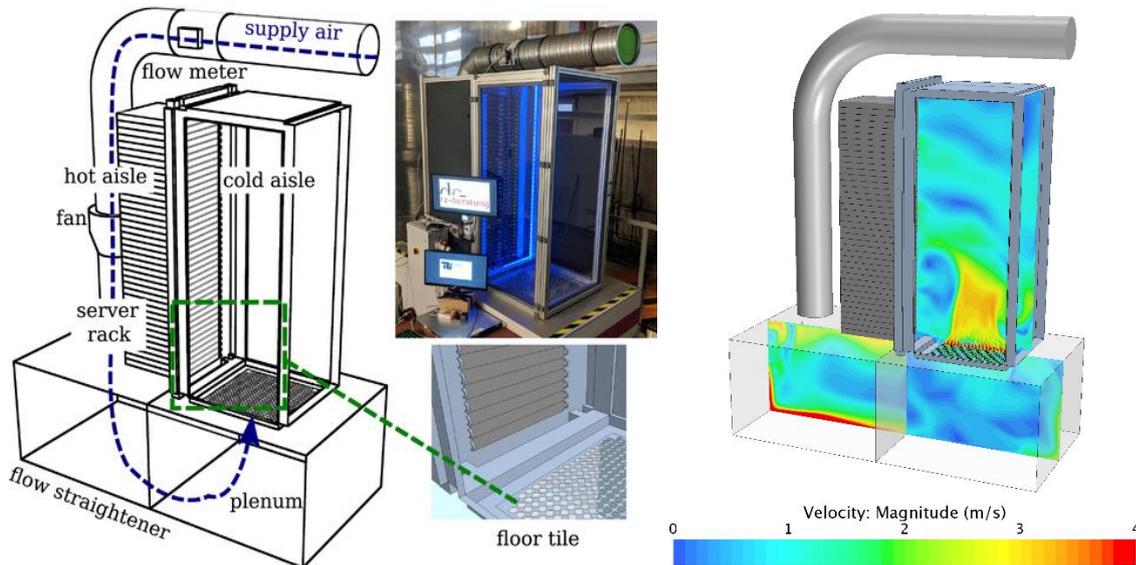


Abbildung 74: Beispiele des Servermodells in CCM+

Die Messdaten aus der Untersuchung zur Volumenstromregelung wurden zur Validierung der Modelldaten herangezogen. Die Ergebnisse wurden in einem Journal (Tawackolian et al. 2020) veröffentlicht und sind daher hier zusammengefasst. Daten zur Modellbildung des Prüfstands und der Server sind in Abbildung 75 Tabelle 22 und Tabelle 23 Abbildung 76 aufgeführt. Der elektrische Leistungsbedarf der verwendeten Server wurde in Abhängigkeit der CPU-Auslastung gemessen (siehe Abbildung 75). Es ist zu erkennen, dass die Graphen des Volumenstromes, der Leistungsaufnahme und der Lüftergeschwindigkeit nahezu übereinanderliegen.

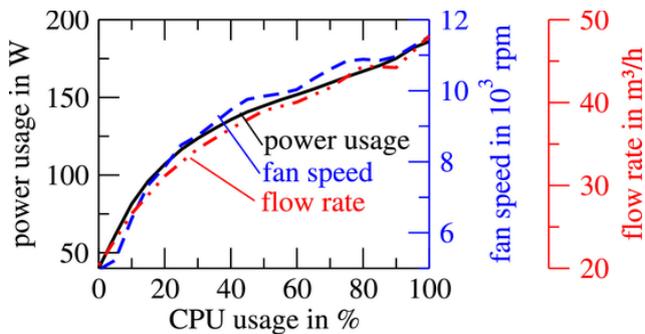


Abbildung 75: Gemessene Leistung, el. (power usage), Ventilator Drehzahl (fan speed) und Durchfluss (flow rate) der untersuchten Server in Abhängigkeit von der CPU-Auslastung (CPU usage)

Die Server bzw. die internen Lüfter sind temperaturgeregelt. Die Leistungsaufnahme und die Drehzahl der Serverventilatoren sind direkt von der CPU-Auslastung abhängig. Weil sich dadurch direkt die Durchflussrate in Abhängigkeit von der CPU-Auslastung ändert, muss die Regelung des Rechenzentrums entsprechend reagieren können. Jeder Server ist mit vier Mainboard-Ventilatoren ausgestattet. Die gemessene Abhängigkeit der elektrischen Leistungsaufnahme der Mainboard-Ventilatoren in Abhängigkeit von der Drehzahl ist in Abbildung 76 dargestellt.

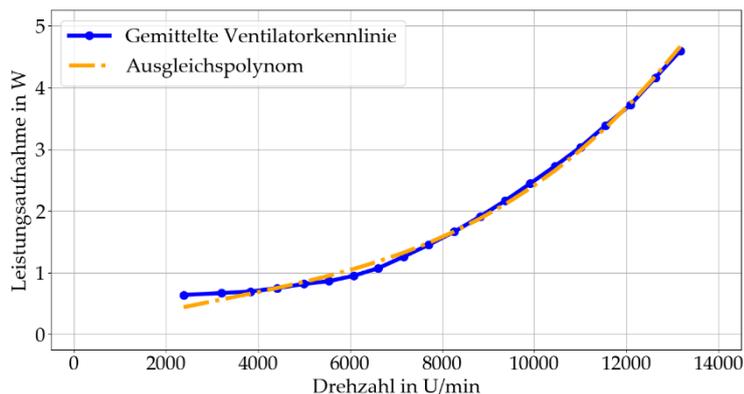


Abbildung 76: Leistungsaufnahme der einzelnen Mainboard-Ventilatoren

Die gesamte nominelle el. Leistungsaufnahme der Serverventilatoren beträgt 1,08 kW und somit 13 % der gesamten nominellen el. Serverleistung (8 kW). Im geschlossenen Kaltgang erfolgt die Volumenstromregelung anhand des Differenzdrucks. Die (vertikale) Druckverteilung ist ausschlaggebend für die benötigte el. Ventilatorleistung der Server. Die Druckverteilung wird durch die Zuluftführung und die Anströmung durch die Bodenplatte beeinflusst. Sechs verschiedene Strömungsverteilungen wurden experimentell und in der Simulation untersucht, um diesen Einfluss der Bodenplatte zu ermitteln. Das Setup der Bodenplatten ist in Abbildung 77 dargestellt.

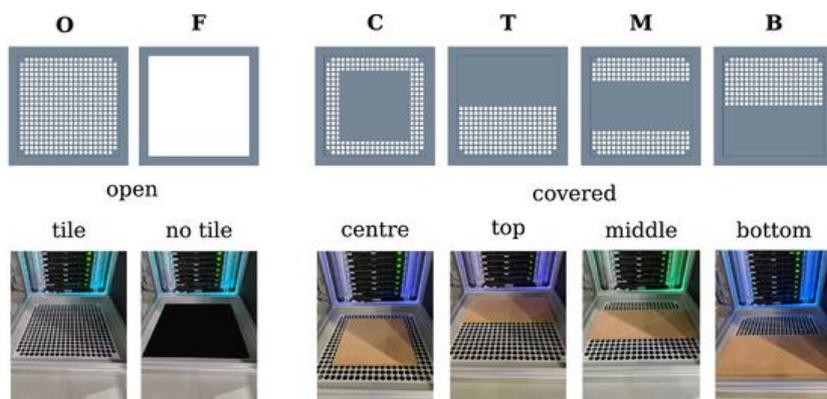


Abbildung 77: Alle Konfigurationen der Bodenplatte.

Abbildung 78 zeigt das Ergebnis der simulierten Strömungsgeschwindigkeiten für die unterschiedlichen Plattenkonfigurationen. Es ist zu erkennen, dass diese sich negativ auf die Homogenität des Geschwindigkeitsfeldes im Kaltgang auswirken. Eine Verblockung führt zu einer deutlich höheren Strömungsgeschwindigkeit und damit auch zu einer inhomogeneren Luftverteilung vor den Serverracks. Dies ist besonders an den unterschiedlichen Druckverteilungen an den Serverinlets zu erkennen, welche in Abbildung 79 dargestellt sind. Hierbei ist besonders gut erkennbar, dass für alle Konfigurationen im unteren Bereich des Serverracks ein permanenter relativer Unterdruck herrscht, während im oberen Bereich ein Überdruck entsteht. Je nach Konfiguration ist dieser Effekt stärker ausgeprägt. Als negatives Beispiel ist die Konfiguration T zu nennen, welche durch den im Rechenzentrum häufig vorkommenden Venturi-Effekt ein deutliches Überdruck/Unterdruck-Verhältnis vor den Servern aufbaut.

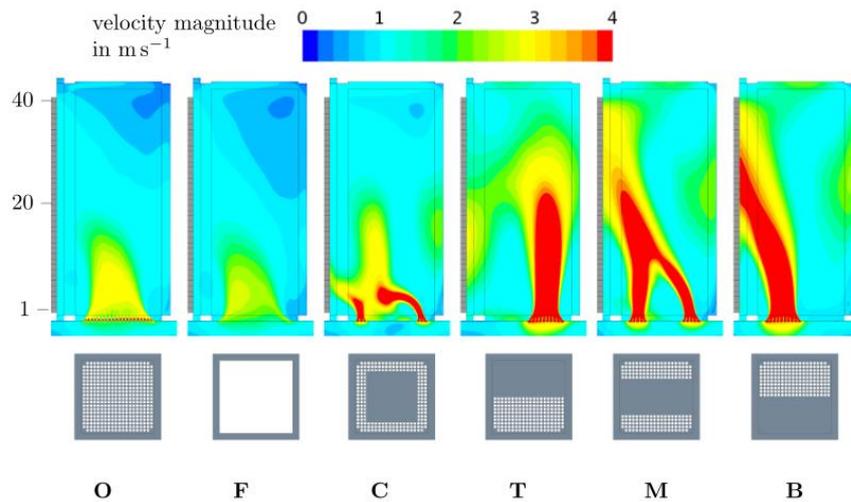


Abbildung 78: Simulierte Strömungsgeschwindigkeiten im Kaltgang (seitlicher Schnitt).

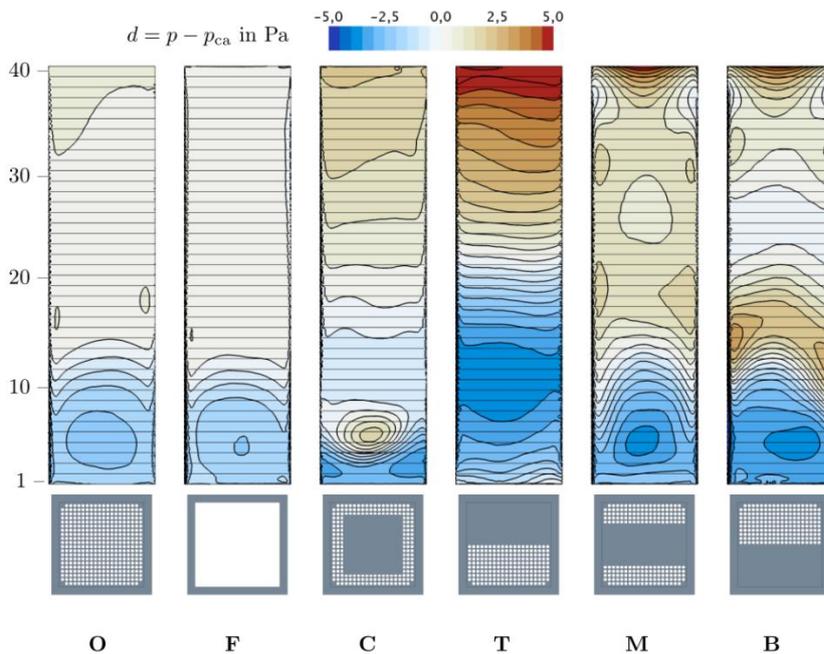


Abbildung 79: Einfluss der Bodenplatten auf die vertikale Druckverteilung.

Die resultierende Abhängigkeit der Server-Ventilatorleistung in Abhängigkeit von der Einbauhöhe ist für die verschiedenen Varianten in Abbildung 80 dargestellt. In den unteren Einbaupositionen 1-10 ist die erforderliche Ventilatorleistung aufgrund der ungleichmäßigen Druckverteilung um bis zu 6 % erhöht. Eine Umverteilung der Strömung durch Teilabdeckungen führte aufgrund der damit einhergehenden Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeiten zu keiner Verbesserung für die unteren Server. Abbildung 81 zeigt die kumulierte Veränderung der Server-Ventilatorleistung für das gesamte Rack. Der kumulierte Einfluss der Zuluft-Führung auf das Rack ist relativ gering ($\pm 2\%$). Die geringen Unterschiede im Experiment resultieren zum Teil aus der unterschiedlichen Anströmung des Differenzdrucksensors und dem damit verbundenen Einfluss auf die Volumenstromregelung. Das

Potential für eine veränderte Strömungsführung im Kaltgang wird deswegen als relativ gering angesehen. Ein aus energetischer Sicht eher relevanter Faktor ist der Einfluss der Druckverteilung auf lokale Leckagen, was während der Untersuchungen auffiel. Dieser Einfluss sollte zukünftig weiter untersucht werden.

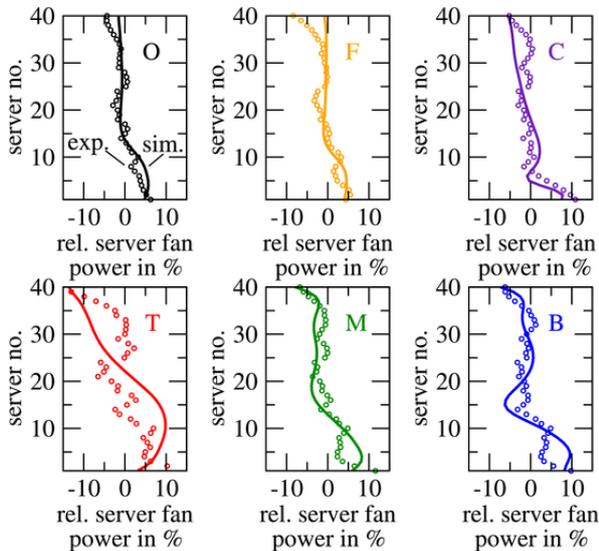


Abbildung 80 Relative Server-Lüfterleistung der Server 1-40. Symbole: Experimente, Linien: Simulationen

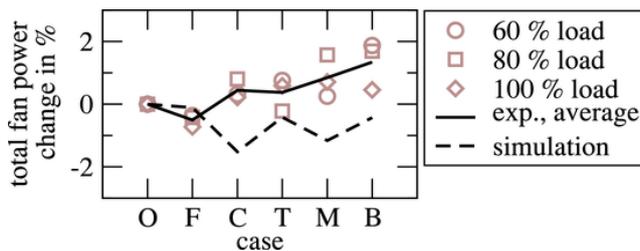


Abbildung 81: Änderung der summierten Server-Ventilatorleistung für das gesamte Rack bei den untersuchten Varianten.

5.1.3. Fazit der Arbeiten AP 5.1 und Energieeffizienzpotenziale

Wie im Projektantrag vorgesehen, wurden die konkreten Entwicklungsziele und Forschungsschwerpunkte in AP 5.1 auf Basis der Vorarbeiten in AP 4, aktueller Entwicklungen und technischer Möglichkeiten im Laufe des Projekts definiert. Es wurden eine Reihe von verschiedenen Lösungskonzepten analysiert und bewertet. Die zu Beginn in Betracht gezogenen Klimatisierungskonzepte „Prototyp einer Kälteanlage ohne Kompressionskühlung“, „Prototyp einer Raumklimaanlage mit unterschiedlichen Klimazonen“ sowie „Prototyp einer dynamischen Leistungsregelung für Klimaanlagen mit optimierten Algorithmen“ wurden nicht weiterverfolgt, da sie im Rahmen von TEMPRO nicht umsetzbar waren oder bereits in anderen Forschungsprojekten bearbeitet wurden bzw. sogar schon am Markt verfügbar sind.

Schwerpunkt der geleisteten Forschungsarbeit war die Schaffung eines Prototyps für eine bedarfsgerechte Volumenstromregelung anhand von Serverdaten. Dieses Ziel wurde erreicht. Durch die direkte Regelung des Luftstroms auf Basis des Zielparameters Servertemperatur werden Fehler vermieden und die Effizienz der Lüftung erhöht. Diese Lösung bietet daher den Vorteil höherer Betriebssicherheit bei gleichzeitig verringertem Energiebedarf für die Kühlung. Außerdem kann die

Lösung nicht nur im Neubau, sondern auch bei Bestandsrechenzentren eingesetzt werden. Mit Messungen konnte gezeigt werden, dass die neuartige Volumenstromregelung den Energiebedarf des Lufttransports im Vergleich zu konventionellen Regelungen um 20 bis 50% reduzieren kann, je nachdem, wie gut die konventionelle Regelung ausgelegt ist. In typischen Rechenzentren ist der Lufttransport für etwa 10% des gesamten Energiebedarfs (inkl. IT) verantwortlich. Der Einsatz der Lösung verspricht damit Einsparpotenziale von 2 bis 5%, gemessen am Gesamtenergiebedarf des Rechenzentrums.

AP5.2: Effiziente Cloud

5.2.1 Überblick

Im Arbeitsbereich 5.2 evaluierte BTC IT Services innovative Technologien (Hard- und Software) zur Erhöhung der Auslastung der IT-Hardware (Computing, Storage und Network). Wie die Ergebnisse in AP 4 und Forschungsergebnisse zeigen, ist eine Erhöhung der Auslastung der IT-Hardware eine entscheidende Möglichkeit, die Energie- und Ressourceneffizienz von Rechenzentren deutlich zu erhöhen. Für Rechenzentren werden Energieeinsparpotenziale von 20 bis 40% und mehr werden als berechnet (Bizo 2019; Hintemann et al. 2014). In den letzten Jahren hat sich zunehmend die Container-Technologie etabliert mit dem erklärten Ziel, im Gegensatz zu herkömmlichen Methoden der Virtualisierung, die Nutzungsdichte der Ressourcen im Rechenzentrum signifikant zu erhöhen und in Kombination mit dem Konzept der Microservices die Softwareentwicklung und damit nicht zuletzt auch die Digitalisierung nicht nur zu beschleunigen, sondern auch nachhaltig zu verbessern. In AP 4 wurde ermittelt, dass im Vergleich zur Ausschöpfung der Potenziale durch klassische Virtualisierung durch Container-Technologien noch einmal weitere 10% Einsparungen möglich sind. Da eine Erhöhung der Auslastung auch gleichzeitig die Zahl der notwendigen IT-Systeme reduziert, bieten die Technologien neben den Vorteilen für Energieeffizienz auch hohe Potenziale zur Steigerung der Materialeffizienz von Rechenzentren.

BTC IT Services verfolgt in TEMPRO das Ziel, eine mandantenfähige, supportete Umgebung zur Bereitstellung und Orchestrierung von Container Clustern prototypisch zu implementieren, welche die verfügbaren Hardware-Ressourcen optimal ausnutzt.

Die Lösung soll dynamisch skalierbare Dienste zur Prozessverbesserung in verschiedenen Fachbereichen des EWE Konzerns und der BTC bieten, z.B.:

- Bereitstellung von Services für Data Scientisten im Sinne eines Data Analytics Labs.
- Bereitstellung einer Umgebung für kurzfristige rechenintensive Aufgaben (bspw. Trainieren von Machine Learning Modellen).
- Weiterhin soll die Lösung es ermöglichen, Kunden der BTC mandantenfähige Management- und Entwicklungsumgebungen für skalierbare Services anzubieten.

Auf einem Innovationsworkshop sind wurden am 24. Mai 2018 im EWE Forum Alte Fleiwa in Oldenburg die Zwischenergebnisse in AP 5.2 mit Experten aus dem EWE Konzern und weiteren externen diskutiert. Auf dieser Grundlage konnten Anwendungsszenarien diskutiert sowie Widerstände, Hemmnisse und mögliche Lösungsansätze identifiziert werden, die in der Dokumentation zum Innovationsworkshop aufbereitet worden sind. Folgende drei erfolgversprechende Anwendungsszenarien wurden von BTC entwickelt:

- Monitoring, Security und Eventmanagement
- IOT-Anwendung am Beispiel Smart Home
- Data Analytics und Machine Learning mit Tensorflow

Abbildung 82 zeigt beispielhaft das Anwendungsszenario „Data Analytics und Machine Learning mit Tensorflow“.

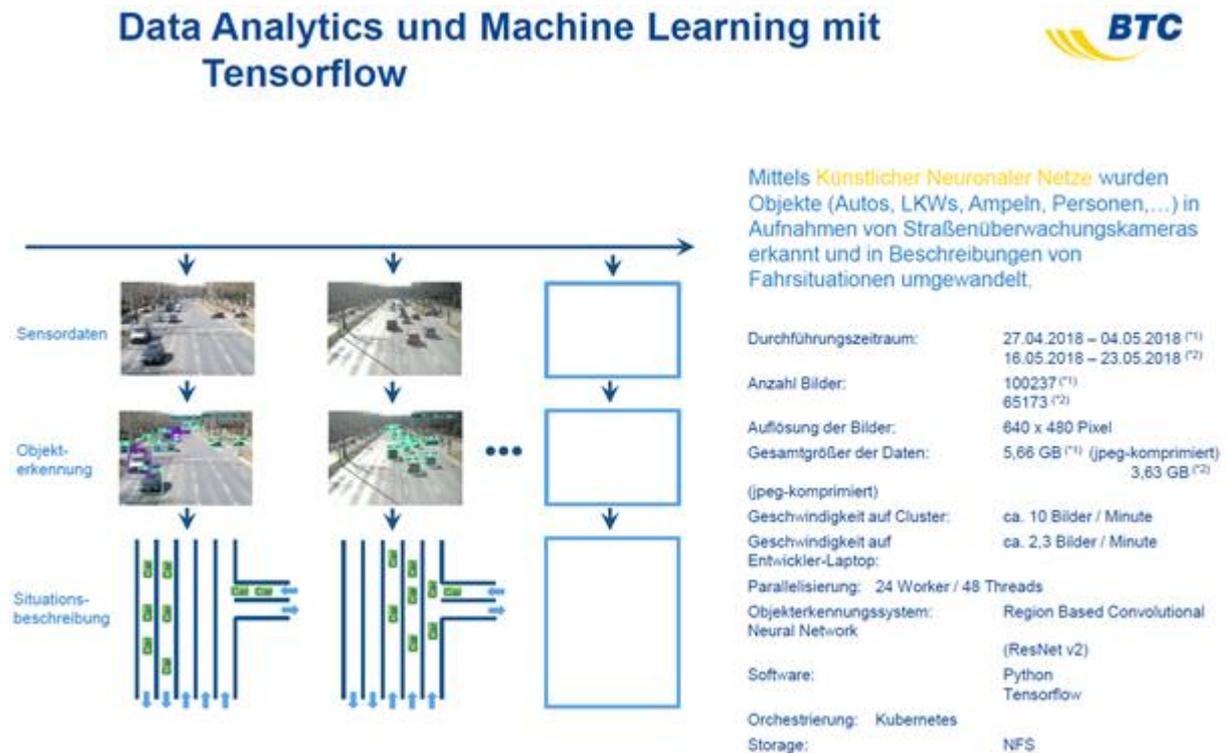


Abbildung 82: Anwendungsszenario „Data Analytics und Machine Learning mit Tensorflow“

Die Lösung, die BTC auf Basis der Container-Technologie (Burns et al. 2016) erforscht und entwickelt hat, erlaubt es, die Nutzungsdichte der Ressourcen im Rechenzentrum signifikant zu erhöhen. Außerdem wird - vor allem in Kombination mit dem Konzept der Microservices (Newman 2015) (Newman, 2015) - die Softwareentwicklung nachhaltig beschleunigt.

Herausforderungen bestehen insbesondere hinsichtlich der dynamischen Skalierbarkeit der Dienste und in der hohen Komplexität der dabei eingesetzten Software-Stacks. Diese hohe Komplexität, sowie das Fehlen von effektiven Management-Lösungen zur Administration von Containern sind die Hauptgründe, warum Unternehmen bisher noch zögern, diese Technologie in größeren produktiven Umgebungen einzusetzen. Stattdessen nutzt man allenfalls verschiedene Container Services von verschiedenen Cloud Anbietern²⁵, um zumindest Erfahrungen mit dieser Technologie zu sammeln. Neue

²⁵ Siehe: Cloud Foundry Container Report 2017: <https://www.cloudfoundry.org/wp-content/uploads/2012/02/Container-Report-2017-1.pdf>.

Lösungen von Anbietern wie Docker Swarm²⁶, Rancher²⁷, Kubernetes²⁸, und DC/OS Mesosphere²⁹ könnten die Administration von hochgradig verteilten Container-Clustern deutlich vereinfachen und damit auch ihren Einsatz in größeren produktiven Umgebungen fördern.

Auf der Testumgebung der BTC (Abbildung 83) wurde ein DC/OS Cluster aufgesetzt, bestehend aus einem Master-Knoten und insgesamt 7 Agent-Knoten. Auf diesem System wurden verschiedene Services implementiert und zwar sowohl Legacy-Services (Datenbanken, Webapplikationen), als auch Anwendungen im Big Data und Data Analytics Bereich (u.a.: Kafka, Cassandra, Spark und Zeppelin).

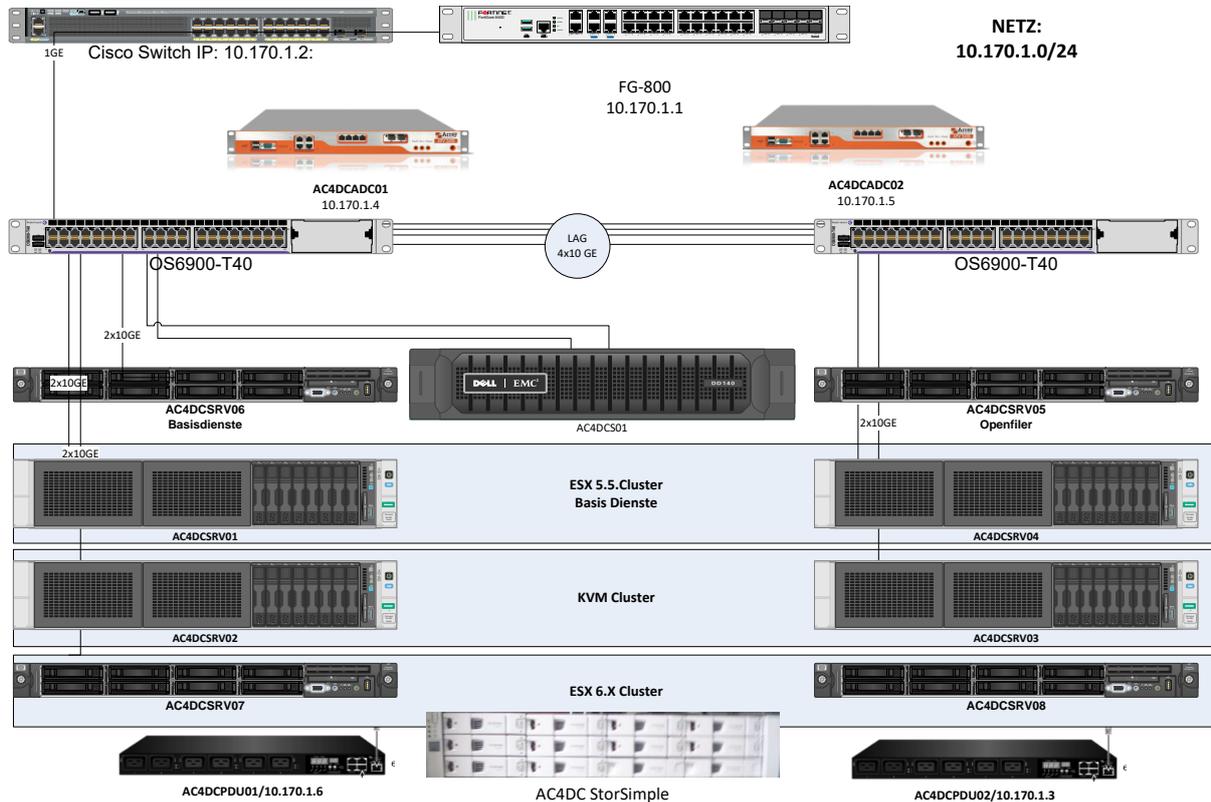


Abbildung 83: Testumgebung bei BTC (112 Cores, 2 TB RAM, 25 TB SSD/Flash, mehr als 1.000 virtuelle CPUs)

Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse von AP 5.2 zu den möglichen Plattformen zur Orchestrierung von Container Clustern, zu Betriebsmodellen, zum Servicedesign, zum Autoscaling und zu den erreichbaren Verbesserungen in der Energie- und Ressourceneffizienz dargestellt.

5.2.2 Orchestrierung von Container Clustern und Microservices

Der Markt der Anbieter von Container-Lösungen entwickelt sich sehr dynamisch. In der Praxis hat sich mittlerweile klar herausgestellt, dass für die Anwendung von Container-Applikationen ein

²⁶ <https://github.com/docker/swarm>

²⁷ <https://rancher.com/>

²⁸ <https://kubernetes.io/>

²⁹ <https://mesosphere.com/>

leistungsfähiger Orchestrierungs-Layer notwendig ist. Die Systeme müssen durch handhabbare und robuste Komponenten verwaltet werden können, wenn sie im produktiven Betrieb eingesetzt werden sollen. Stand 2019 hat sich Kubernetes (K8s) zum de facto Standard der Container-Orchestrierung für skalierbare Container-Cluster entwickelt. Mittlerweile nutzen alle namhaften Hersteller Kubernetes als zentralen Orchestrierer und entwickeln integrierte Lösungen zur Bereitstellung und zum Betrieb von Container-Services³⁰.

Für die praktische Anwendung und die Entwicklung und den Betrieb solcher Umgebungen stellt sich jedoch immer mehr die Herausforderung der in der extrem hohen Komplexität des eingesetzten Container Ökosystems (Abbildung 84). Das heißt, dass die immanente Komplexität der Lösungen mittlerweile ein Niveau erreicht, welches nur noch sehr schwierig umfassend überblickt werden kann. Die Einführung solcher produktiven Systeme im Unternehmen erfordert daher viel Zeit, Fachwissen und Ressourcen sowie eine Vielzahl von unterschiedlichen Technologien, deren Aufbau und Integration nicht selten Monate in Anspruch nehmen können.

Daher wird ein Tool erforderlich, das den kompletten Lifecycle eines Containers managen kann, vom Erstellen der Programme über die CI/CD Pipelines bis zum Deployment auf dem Cluster und dem Betrieb des Gesamtsystems.

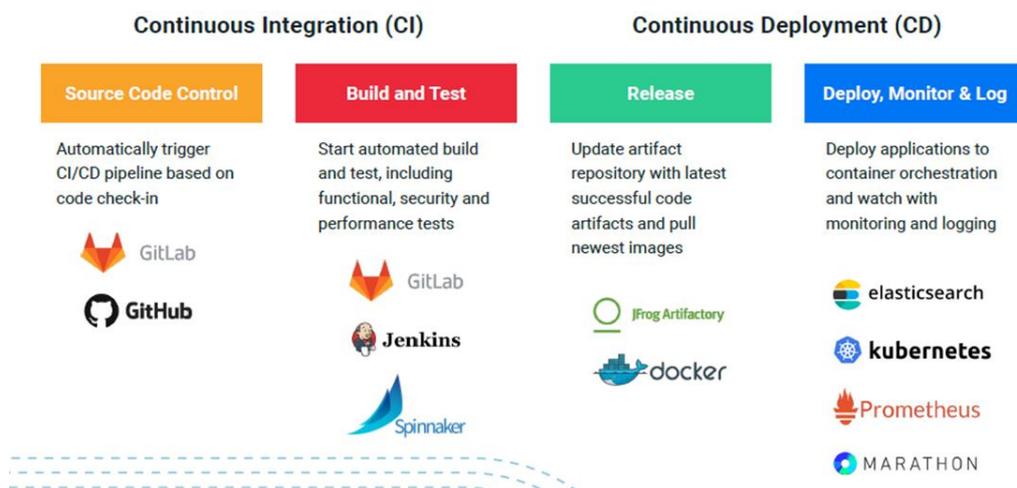


Abbildung 84: Container Ökosystem

Im Rahmen von AP 5.2 wurden verschiedene Orchestrierungslösungen analysiert und bewertet. Folgende drei erfolgversprechende Lösungen wurden im Rahmen von Proof of Concepts detaillierter untersucht:

- DC/OS von Mesosphere
- Rancher von Rancher Labs
- RedHat Openshift

Für jede der Lösungen wurde nach den Dokumentationen der Hersteller jeweils HA(High Availability)-fähige Installationen auf der BTC-TEMPRO-Testumgebung vorgenommen und exemplarisch

³⁰ Siehe die Kubernetes Partnerseite (<https://kubernetes.io/partners/>)

kundenspezifische Kubernetes-Cluster bereitgestellt. Abbildung 85 zeigt den Aufbau des Proof of Concept für die RedHat Openshift-Lösung.

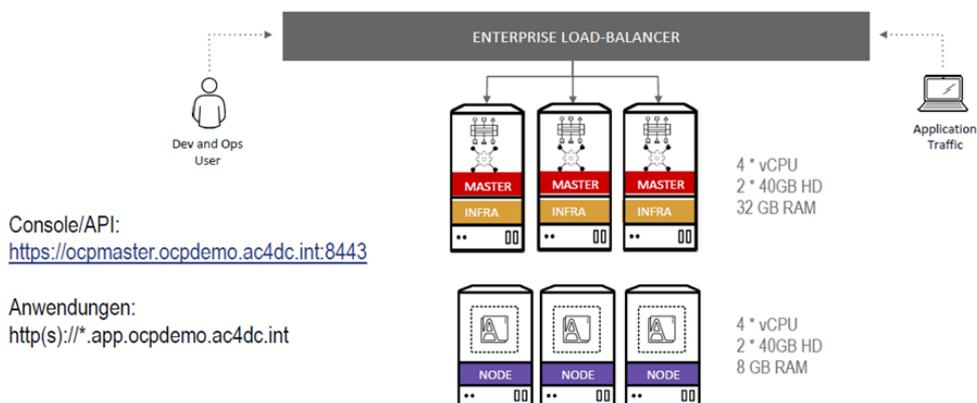


Abbildung 85: Aufbau des Proof of Concept für die RedHat Openshift Lösung

Die allgemeinen und unternehmensspezifischen Anforderungen an die Proof of Concepts und die Ergebnisse wurden dokumentiert und analysiert. Insbesondere die RedHat Openshift Lösung konnte mit dem durchgängigen Konzept sowohl von der Administrationsseite (Installation, Administration, Update, Support), als auch von dem Umfang der gelieferten Features überzeugen. Besonders folgende Vorteile sind aus Sicht von BTC hervorzuheben:

- Das durchgängige Supportmodel von Openshift vs. Community Support (K&S)
- Hotline
- RH Customer Portal
- Software-Support-Lifecycle
- Expertise seitens RH durch aktive Mitarbeit im Kubernetes Projekt
- Aktiv gepflegte Containerimages / Basis-Images / Anwendungs-Images
- Die Vereinfachungen für Entwickler z.B. durch
- S2I – Source-to-Image Prozess
- Pipeline Integration (CI/CD) durch Integrierte Jenkins-Images
- OAuth authentication der integrierten Komponenten
- Umfangreiche Templates im Self-Service-Portal
- Umfangreiche Security-Policies / Secure by default
- Ausgeprägtes RBAC Security Model
- Erhöhte Pod-Sicherheit durch SCCs (Security Context Constraints)
- Einzelkomponenten sind aufeinander abgestimmt und werden als Gesamtpaket seitens RedHat geliefert (Single-Contact)
- Integrierte Image-Registry
- Logging Stack basierend auf EFK (Elasticsearch, Fluentd, Kibana)
- Monitoring basierend auf Grafana/Prometheus
- Jenkins
- RedHat SSO
- Weniger Engineering Aufwand bei Installation und Upgrade des Gesamtpakets notwendig

5.2.3 Betrieb von Container-Clustern

Der Betrieb von Container-Clustern erfordert ein konsequentes Umdenken sowohl im Systemmanagement als auch bei der Softwareentwicklung³¹, herkömmliche ITIL – Konzepte können hier nicht mehr verwendet werden. Vor allem das Monitoring, Alerting und Logging wurden im Rahmen der Analysen als Bereiche identifiziert, die in Bezug auf Container-Cluster komplett neue Anforderungen stellen.

Herkömmliche Tools in diesen Themenfeldern wie Icinga, Nagios oder Zabbix waren ursprünglich für die Überwachung relativ statischer Systeme und Cluster gedacht. Diese sind für die dynamischen Container-Cluster nicht (mehr) geeignet.

Ein häufig genutztes Monitoring und Alerting-Tool für Container Cluster, das auch im Rahmen von AB 5.2 eingesetzt wurde, ist Prometheus³². Prometheus ist ein Nachfahre des Borgmon von Google³³. Das Tool legt – im Gegensatz von vielen herkömmlichen Monitoringsystemen – die Metriken nicht in klassischen SQL-Datenbanken, sondern in einer Time Series Database ab. Dadurch ist das System in der Lage, die gewaltigen Datenmengen (Metriken, Systemzustände), die in den skalierbaren Containerumgebungen entstehen, nahezu in Echtzeit zu verarbeiten.

In der BTC-TEMPRO Testumgebung wurde eine dedizierte Prometheus-Instanz installiert und so konfiguriert, dass sie sämtliche Kubernetes Cluster in der Umgebung

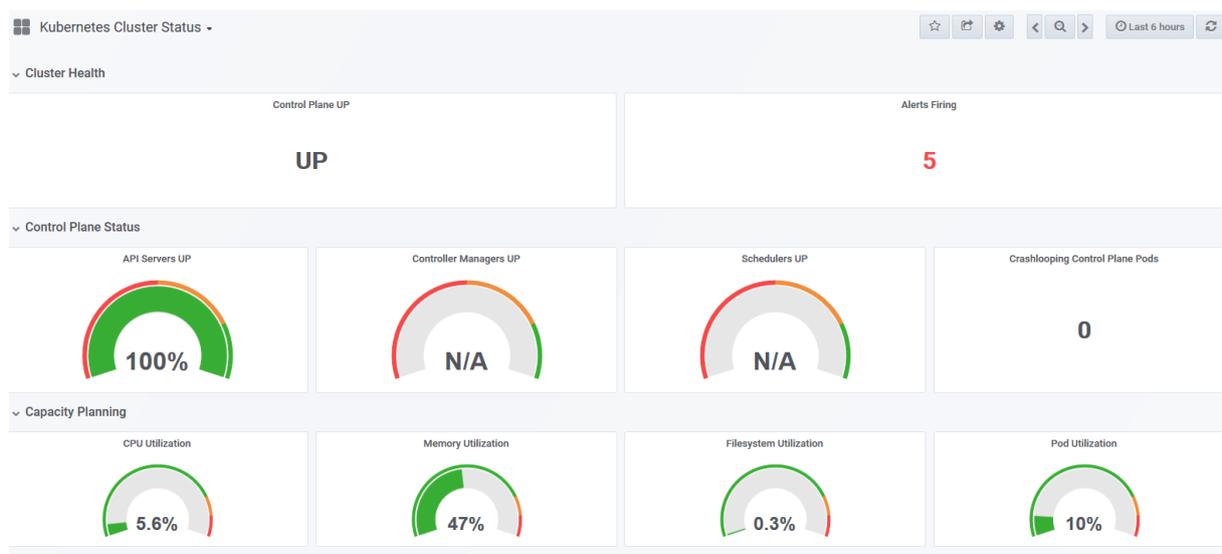


Abbildung 86: Status eines Test-Clusters

³¹ Siehe dazu: B. Beyer, C. Jones, J. Petoff, and N. R. Murphy, *Site Reliability Engineering: How Google Runs Production Systems*, 1st ed. O'Reilly Media, Inc., 2016, sowie: A. Jefferson, *Application Delivery with DC/OS. Building and Running Modern Data-Driven Apps*. O'Reilly Media, Inc, 2017.

³² Siehe: <https://prometheus.io/>

³³ Siehe: [https://en.wikipedia.org/wiki/Prometheus_\(software\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Prometheus_(software))

5.2.4 Servicedesign

Auf der Basis der in AP 5.2 durchgeführten Pilotinstallationen wurde für BTC ein exemplarisches Servicedesign entwickelt werden. Damit sollen die Kalkulation und der Entwurf eines Kundenangebots durchgeführt werden. Die damit gemachten Erfahrungen wurden in einem simulierten Probebetrieb überprüft. Ziel ist es, damit ein Modell zum Servicedesign zur Verfügung zu stellen.

Zur Entwicklung des Servicedesigns wurden mit dem BTC-Dienstleister Computacenter drei umfangreiche Workshops mit folgenden Themen durchgeführt:

Workshop 1: „Kubernetes / Openshift“

- Plattformvergleich Kubernetes und Openshift
 - Mandantenfähigkeit
 - Sicherheit
 - Operations Best Practises (Upgrade, Running)
- Mandantenfähigkeit der unterschiedlichen Ansätze aus Sicht eines Serviceproviders beleuchten
- Microservices Ökosystem
 - Beschreibung eines Container-Infra Ökosystems „Best practices“
 - Monitoring (Metrics & Events)
 - Log-Aggregation (EFK/ELK Stack)
 - Security / Mandantenfähigkeit
 - Backup / Restore / Disaster Recovery
 - Configuration Management (Infrastructure as Code)
 - Networking (SDN / Loadbalancer)
- Integration der Containerservices in den klassischen IT Betrieb
 - Zusammenarbeit für Querschnittsaufgaben
 - Abgrenzung Verantwortlichkeit / Berechtigungen
 - Zusammenspiel Entwicklung / Betrieb
 - Rückwirkung auf typische Betriebsprozesse

Workshop 2: „Cloud-Modelle / CaaS vs. PaaS vs. OnPremise“

- Vergleich OnPremise / Cloud
 - Bereitstellungszeiten
- Cloud-Modell
 - CaaS (Amazon ECS/EKS)
 - vs. PaaS + Kubernetes/Openshift
 - Anbieterbindung (vendor lock-in) in der Cloud beleuchten
 - Koexistenz on Premise und Cloud?
 - Cloud-Security und Datenschutz
- Best Practises / Erfahrungsaustausch mit o.g. Modellen
- Cloud - Kultur Einbringung in das Unternehmen
 - CC Erfahrung / Best practises
 - DevOps / agile Ansätze
- Zertifizierungsmodelle für den Microservices-Betrieb (ISO o.ä.)

Workshop 3: „Abrechnung und SLA Definition“

- Ansätze zur SLA Definition (BTC intern) müssen aufgebaut werden
 - Verfügbarkeiten / Memory Limits / CPUs?
 - Netztraffic / Hits / etc. für KPI Preisfindung möglich?
 - Koexistenz on Premise + Cloud?
- Mögliche Ansätze für ein Preismodell zur Abrechnung der Kundensysteme
 - Laufzeiten
 - CPU
 - Pro VM
 - Traffic / Hits / etc.
- Authentifizierung und Autorisierung / Erfahrungsaustausch
 - Geplant, Pro Kunde ein AD
 - Unix lokale User + SSH-Key falls gefragt

Die Ergebnisse aus den Workshops wurden ausgewertet und in einem finalen internen BTC-Dokument zusammengefasst.

5.2.5 Autoscaling zur Verbesserung der Energieeffizienz

Zur Verbesserung der Energieeffizienz eines Rechenzentrums kann insbesondere die Autoscaling-Funktionalität von Kubernetes genutzt werden.³⁴ Die Funktionalität kann an folgendem Beispiel dokumentiert werden: Nimmt man an, dass ein Cluster mit Microservices 24/7 läuft, aber die Lastanforderungen gewöhnlich je nach Tageszeit deutlich variieren. Tagsüber (etwa zwischen 8 und 18 Uhr) werden zu Spitzenzeiten die vorhandenen Ressourcen nahezu ausgeschöpft. Nachts dagegen geht die Last gewöhnlich herunter, aber der Cluster würde weitelaufen und unnötig Ressourcen (vor allem Strom) verbrauchen. Das Autoscaling prüft mithilfe des oben beschriebenen Monitorings die jeweilige Auslastung und passt die erforderlichen Ressourcen automatisch an.

Auf einem Test-Cluster mit 5 Worker – Nodes wurde in AP 5.2 ein Webdienst (Apache) installiert, der im Normalzustand auf 2 Hosts läuft. Der Autoscaler wurde so konfiguriert, dass er bei Lastspitzen bis zu drei weitere Nodes (also insgesamt 5) hinzuschalten kann (Abbildung 87 und Abbildung 88). Dann wurde mittels eines Benchmarks der Cluster unter hohe Last gesetzt und das System passte sich automatisch in den definierten Grenzwerten an den Workload (Scale Out) an. Nachdem die Last wieder herunterging, wurden die zusätzlich gestarteten Dienste automatisch beendet und der Cluster befand sich wieder korrekt im Grundzustand (Scale Down).

³⁴ Vergl. <https://github.com/kubernetes/autoscaler>

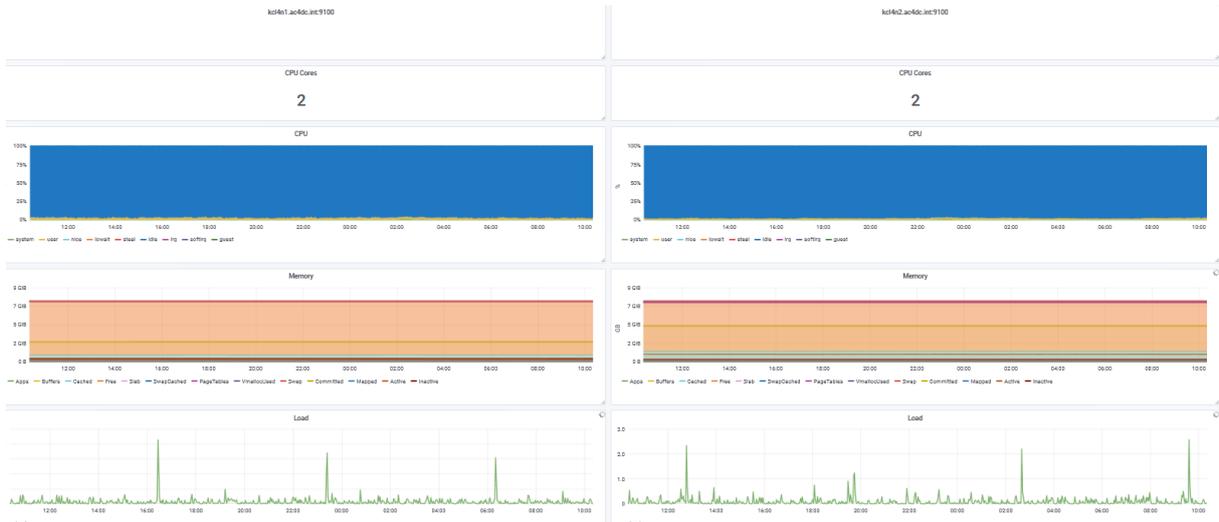


Abbildung 87: System im Normalzustand (2 Nodes aktiv)



Abbildung 88: System unter Last (5 Nodes aktiv)

Im konkreten Beispiel könnten mit Hilfe des Einsatzes der Technologie nach einer Simulation von Borderstep in einem typischen Rechenzentrum – unter der Annahme, dass Autoscaling auf ca. 30% der Serversysteme sinnvoll eingesetzt werden – ca. 10% der Gesamtenergie des Rechenzentrums eingespart werden. Bei Rechenzentren mit höherem Anteil stark lastabhängiger Systeme kann die Energieeinsparung bis zu 40% betragen.

5.2.6 Fazit der Arbeiten in AP5.2 und Potenziale zur Verbesserung der Energie- und Ressourceneffizienz

In AP 5.2 wurde eine Testumgebung für ressourceneffiziente Cloud-Lösungen bei BTC aufgebaut. Auf dieser Umgebung wurden dynamisch skalierbare Dienste zur Prozessverbesserung in verschiedenen Fachbereichen des EWE Konzerns und der BTC prototypisch entwickelt und getestet. Entgegen dem im Projektantrag dargestellten Fokus auf effiziente SSD-basierte Cloud-Speicherlösungen lag der Schwerpunkt der Arbeiten auf Container basierten Cloud Lösungen.

Im Rahmen von AP 5.2. wurde zwar eine SSD-basierte Speicherlösung implementiert, eine weitere Erforschung erwies sich aber als nicht notwendig, da sich solche Lösungen bereits als Stand der Technik etabliert haben. Im Vergleich zu konventionellen HDD-basierten Speicherlösungen können mit SSD-basierten Lösung je nach Anwendungsfall bis über 90% des Energiebedarfs der Speichersysteme eingespart werden. Für ein typisches Rechenzentrum ergeben sich damit mögliche Energieeinsparungen nach Simulationen von Borderstep von etwa 12% des Gesamtenergiebedarfs.

Der Einsatz der in AP 5.2 erforschten Container-Lösungen erfolgt in der Praxis zumeist mit der Motivation des geringeren Bedarfs an IT-Ressourcen, der schnellen Bereitstellung, der Skalierbarkeit, der Erhöhung der Flexibilität. Die Forschungsergebnisse in TEMRRO haben gezeigt, dass die Technologie deutliche Potenziale zur Erhöhung der Energie- und Ressourceneffizienz bietet. Je nach Ausgangssituation im Rechenzentrum sind Energieeinsparungen von 10 bis 40% möglich. Containerlösungen bieten über die bessere Auslastung der IT-Ressourcen auch große Potenziale zur Einsparung von IT-Hardware und damit für die Materialeffizienz der Rechenzentren. Da die Möglichkeit, auf IT-Hardware zu verzichten, sehr deutlich vom konkreten Anwendungsfall, der Anforderungen an die Verfügbarkeit und dem Servicemodell abhängig sind, ist die Quantifizierung der Materialeffizienzpotenziale nur schwer möglich. Nach Analysen von Borderstep könnten grob geschätzt in einem typischen Rechenzentrum zwischen 5 und 20% der IT-Hardware eingespart werden.

AP5.3: Störfall

5.3.1 Überblick

Übergeordnetes Ziel des AP 5.3 war die Entwicklung, Erprobung und prototypischen Umsetzung von automatisierten Mechanismen zur zügigen Systemverlagerung- und Abschaltung bei zu hohen Temperaturen in Rechenzentren. Für dieses übergeordnete Ziel können in folgende Teilziele formuliert werden:

- Erforschung von Managementlösungen von hohen Temperaturen in Rechenzentren
- Entwickeln und Umsetzung von Algorithmen, um den Zeitraum zwischen Störfall und Hardware-Ausfall zu maximieren bzw. Verhinderung eines Ausfalls
- Entwicklung eines Algorithmus und prototypische Implementierung zur
 - automatisierten Abschaltung aller nicht unbedingt benötigten Produktivsysteme, bzw.
 - eine automatisierte Verlagerung der benötigten Produktivsysteme an andere Lokationen oder alternativ
 - das Versetzen der Produktivsysteme in einen „Sparmodus“.

Im Rahmen der Arbeiten von AP 5.3 wurde zunächst nach Produkten recherchiert, die ähnliche Funktionalitäten aufweisen. Die in der Recherche gefundenen Produkte zielen jedoch nur auf Sensorik in Rechenzentren und das Erkennen einer Störung ab. Ein aktives Störfallmanagement ist nicht abgedeckt. Eine mögliche Ursache besteht ggf. darin, dass eine stets ein Customizing vorgenommen werden muss, da Rechenzentren und deren Topologien oftmals einzigartig sind.

Bei KDO wird angestrebt, das neu entwickelte System in möglichst jeder Umgebung einsetzen zu können. Dies geschieht durch eine Modularisierung der Skripte (Abbildung 89), sodass die Strategien im Fehlerfall angepasst werden können, restriktive müssen. Die Strategie als solche wird auf die individuellen Bedürfnisse für das Rechenzentrum der KDO abgestimmt. Eine generelle allgemeingültige Strategie für Rechenzentren ist nicht realisierbar, da sich die Rechenzentren wie bereits erwähnt oftmals in Typologie, Anwendungen und Anforderungen sehr deutlich voneinander unterscheiden.

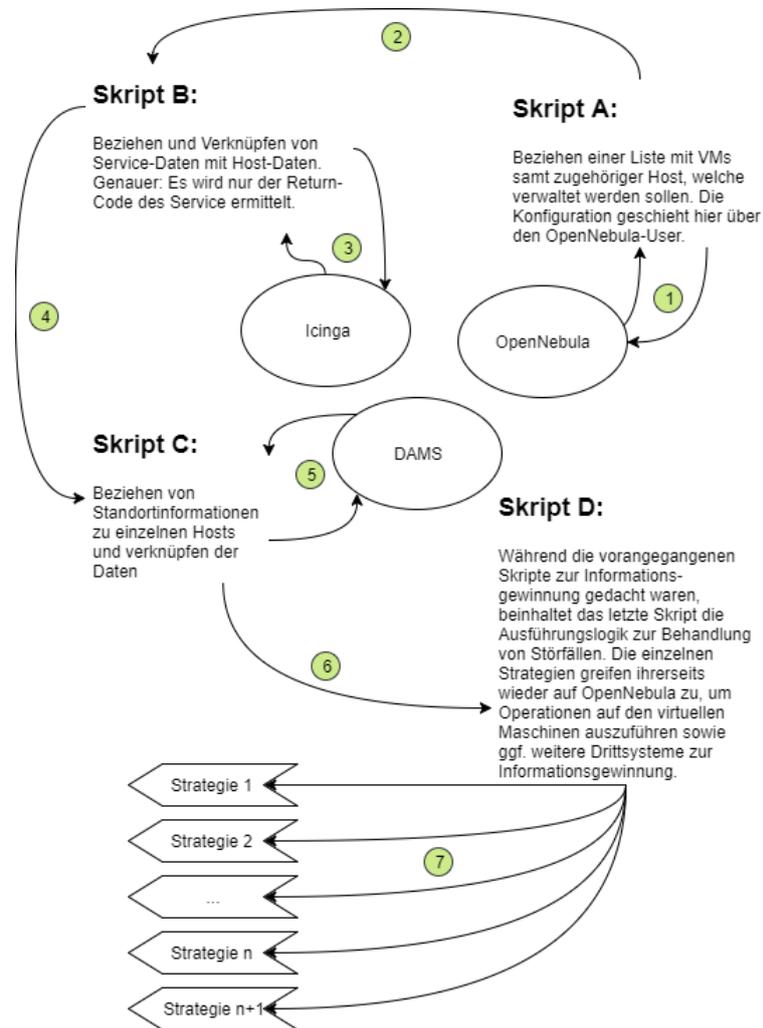


Abbildung 89: Neuer Ansatz eines vollständig modularen IT-Managementsystems bei KDO

Um die Funktionalität des Systems zu erhöhen, wurde die in der KDO vorhandene Sensorik erweitert (Abschnitt 5.3.2). Durch die erweiterte Sensorik ist die Erkennung eines Ausfalls der Klimaanlage früher

und zuverlässiger möglich. Außerdem kann die Art des Ausfalls – Übertemperatur, Pumpenausfall oder Wassermangel – ermittelt werden.

Mit Hilfe des entwickelten Systems können unterschiedliche Strategien für den Umgang mit den Virtuellen Maschinen auf den vom Ausfall betroffenen Servern/Hosts verfolgt werden. Im Rahmen von AP 5.3 wurden folgende unterschiedliche Strategien für den Störfall geprüft:

- VMs auf nicht betroffene Hosts migrieren
- VMs gleichmäßig im RZ verteilen
- VMs in die Nähe der Kühlanlagen verschieben
- Abschaltung von nicht-priorisierten VMs / Hosts

In Abbildung 90 sind beispielhaft die Strategien „VM in die Nähe der Kühlanlagen verschieben“ und „Abschaltung von nicht-priorisierten VM/Hosts“ dargestellt.



Abbildung 90: Beispielhafte Darstellung der Strategien „VMs in die Nähe der Kühlanlagen verschieben“ (links) und „Abschaltung von nicht-priorisierten VMs / Hosts“ (rechts)

5.3.2 Anbindung an die vorhandene Asset-Management-Software

Als Asset-Management-Lösung wird in der KDO die Software „DAMS C“ der speedikon Facility Management AG eingesetzt. Diese Lösung sollte bei der Entwicklung des Prototyps dazu eingesetzt werden, Standort-Daten physischer Server im Rechenzentrum zur Verfügung zu stellen. Leider funktioniert aber die Bereitstellung der entsprechenden API nicht und damit konnte die geplante Lösung nicht eingesetzt werden. Für die Entwicklung des Prototyps hat entschieden man sich ersatzweise für eine Übergangslösung, bei der das mit einem Koordinatensystem überlagert wurde (Abbildung 91). Mit Hilfe dieses Koordinatensystems konnte der Abstand von einem physischen Server bzw. Rack zu den Kühlanlagen rechnerisch ermittelt werden.



Abbildung 91: Schematische Darstellung Rechenzentrum KDO mit Koordinatensystem

Um den Abstand von den Kühlanlagen zu ermitteln wurde in der eingesetzten Monitoring-Software Icinga der Datensatz der jeweiligen physikalischen Hosts um die Felder X-Koordinate und Y-Koordinate erweitert. Die Daten für die Kühlanlagen wurden fix im Quellcode hinterlegt, da diese bisher nicht in Icinga erfasst worden sind. Dies erlaubt denselben Funktionsumfang nachzustellen, als wäre die API von „DAMS C“ zugänglich. Für einen ernsthaften Betrieb ist diese Lösung nicht erstrebenswert, da hier der Grundsatz „Single Source of Truth“ verletzt wird. Man müsste die Daten (bspw. bei Umbau eines Servers) an zwei unterschiedlichen Stellen (DAMS C, Icinga) pflegen.

5.3.3 Erweiterung der Sensorik

Im Rahmen von AP 5.3 wurde eine Sensorik zum frühzeitigen Erkennen einer Störung der Kühlanlage konzipiert, entworfen und umgesetzt. Bei der Umsetzung mussten einige Anpassungen bezüglich der angedachten Architektur vorgenommen werden.

Die Kühlanlagen wurden um drei Sensoren erweitert, welche eine frühzeitige Störungserkennung sowie eine Erkennung der Art der Störung zulassen. Diese drei Sensoren haben jeweils einen potentialfreien Kontakt über den die Störung ausgelesen werden kann. Zum Auslesen der Störungen wird auf eine Eigenentwicklung gesetzt.

Geplant war die Umsetzung mittels einer NodeMCU³⁵. Es war jedoch nicht möglich die NodeMCU mit dem WLAN der KDO zu verbinden, da es keine bzw. nur unzureichende Dokumentationen/Bibliotheken hinsichtlich der Verwendung von „WPA2 Enterprise“-Netzwerken gab. Bei genauerer Betrachtung wich man jedoch ohnehin von dem Vorhaben ab, eine wichtige Sensorik-Komponente über WLAN anzubinden.

³⁵ kostengünstiger und mit geringen Leistungsbedarf ausgeführter 32-Bit-Mikrocontroller (Quelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/ESP8266>)

Folglich wurde die Eigenentwicklung mit einem Raspberry Pi 3 realisiert (Abbildung 92). Auf dessen Kontaktstiften laufen die potentialfreien Kontakte der Sensoren zusammen und können über diesen auch abgefragt werden. Darauf aufbauen wurde ein Nagios-Modul entwickelt, sodass sich die Abfrage in das bestehende Monitoring (Icinga 2) der KDO integrieren lässt.

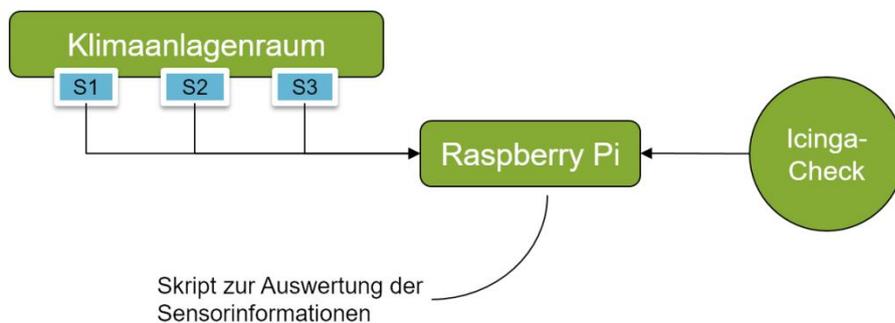


Abbildung 92: Sensorerweiterung

Dieses Modul ist der Einstiegspunkt für die Algorithmen zur Systemverlagerung bzw. Abschaltung. Erst im Falle eines vorliegenden Fehlers, werden Maßnahmen vorgenommen.

5.3.4 Durchführen und Auswertung von Messungen im Rechenzentrum von KDO

Die konzeptionellen und theoretischen Arbeiten in AP 5.3 wurden durch Messungen im Rechenzentrum von KDO unterstützt. Dabei standen insbesondere folgende Fragen im Fokus:

- Wie viel Reaktionszeit ist im Falle einer Störung der Kühlanlage vorhanden?
- Ist eine Evaluation der Algorithmen mit der zur Verfügung stehenden Hardware sinnvoll?

Ein simulierter Ausfall der Kühlung, welcher das gesamte Rechenzentrum der KDO betreffen würde, kann aus Gründen der Betriebssicherheit nicht durchgeführt werden. Daher wurde der simulierte Ausfall auf ein einzelnes Serverrack beschränkt. Dies ist möglich, da die Serverracks innerhalb der KDO über einen Unterboden mit Kaltluft versorgt werden (Abbildung 93). Der Ausfall der Kühlung kann somit über das Abdichten des Zugangs zu diesem Unterboden simuliert werden.



Abbildung 93: Serverrack mit Unterbodenbelüftung in der KDO

Das Abdichten des Luftzugangs wurde auf mehrere unterschiedlichen Arten realisiert. Der simpelste Versuch war der, den Lüftungsschacht mittels aufgelegten Brettes zu schließen (Abbildung 94). Da jedoch die Intensität des Luftstroms zu hoch war, konnte sich die Luft am Brett vorbeipressen, sodass der gewünschte Effekt ausblieb. Im darauffolgenden Versuch wurde das Brett zusätzlich mit einer zugeschnittenen Schaumstoffummantelung versehen, welche sich der Form des Racks anpassen sollte. Dies gelang auch, jedoch konnte auch dadurch der Luftstrom nicht vollends unterbunden werden. Im dritten und letzten Versuch wurde die Konstruktion zusätzlich durch Gewichte erschwert, um damit die Kühlung der Hardware-Komponenten vollständig zu unterbinden.



Abbildung 94: Abdichtungsversuche mit (v. l. n. r) Brett, Brett mit Schaumstoffummantelung, Brett mit Schaumstoffummantelung und zusätzlich erschwert

Für die Messung selbst wurde von KDO ein Lastgenerator entwickelt, mit dem die CPU sowie der Speicher in einen gewünschten Grad ausgelastet werden kann. Dadurch sollte eine realistische Last auf den Servern simuliert werden.

Bei der Messung wurden kontinuierlich drei Temperatursensoren überprüft:

- 1) Ambient: Sensor an der Vorderseite des Servers
- 2) CPU: Prozessor-Temperatur
- 3) Systemboard: Sensor auf dem Mainboard zur Temperaturüberwachung

Die Messergebnisse zeigte einen Temperaturanstieg nach Unterbindung der Kühlung (Abbildung 95). Der Temperaturanstieg war jedoch nicht so stark wie zu erwarten. Die messtechnischen Auswertungen zeigten, dass selbst mit Gewichten auf dem Brett eine Restkühlung im Rack erfolgte.

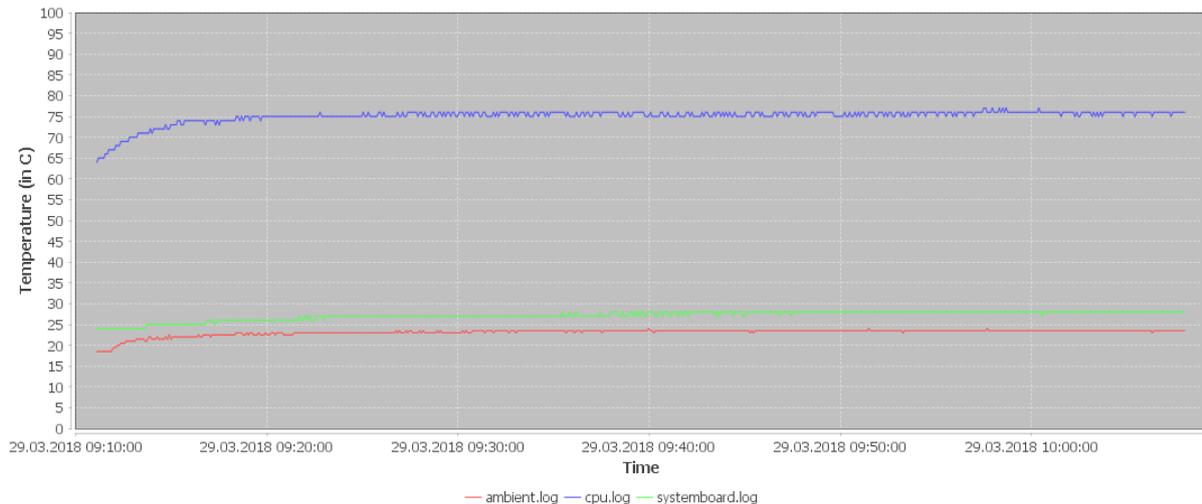


Abbildung 95: Exemplarische Messauswertung

Begründet ist das beobachtete Verhalten dadurch, dass die Racks selbst viele Leckagen bieten, durch die Luft nebenstehender Racks eindringt. Außerdem stehen zu wenig Testserver zur Verfügung, sodass keine Skaleneffekte durch eine Wechselwirkung der Server untereinander entstehen können.

Dies führt zur Erkenntnisgewinnung, dass keine Evaluation der Algorithmen innerhalb der KDO-eigenen Testumgebung stattfinden kann. Auch ist eine Aussage über die zur Verfügung stehende Reaktionszeit nicht möglich. Diese Messung wäre jedoch ohnehin nur auf die KDO bezogen und nicht allgemein gültig.

Als alternative Möglichkeit, die erarbeiteten Störfallstrategien bzgl. -Algorithmen zu evaluieren, wurde die Nutzung des Testrechenzentrums von dc-ce in Erwägung gezogen. Hierzu wurde gemeinsam mit dem Projektpartner dc-ce ein Innovationsworkshop durchgeführt. Vorrangiges Ziel des Workshops war es zu prüfen, inwieweit eine Kooperation zwischen dc-ce und KDO sinnvoll ist, um zum Beispiel im Testrechenzentrum von dc-ce am Hermann-Rietschel-Institut der TU Berlin die erarbeiteten Lösungen von KDO testen und validieren zu können. Weiterer Gegenstand des Workshops war der Einsatz von Algorithmen, um Rechenzentren bei höheren Temperaturen zu betreiben und in diesem Kontext Störfälle automatisiert zu managen.

Am Workshop teilgenommen haben neben den Vertretern von Borderstep und KDO daher auch Herr Fridjof Chwoyka (dc-ce), Herr Karsten Tawackolian (TU-Berlin) und Herr Ken Lindenberg (TU-Berlin). Auf dem Workshop wurden zunächst reale Ausfallszenarien diskutiert und systematisiert. Auf den zum

Zeitpunkt des Workshops im dc-ce Testrechenzentrum installierten Systemen waren die für die Messungen in AP 5.3 notwendigen Voraussetzungen zum Zeitpunkt des Workshops nicht erfüllt. Insbesondere war es nicht möglich, die Lastsimulation auf den Servern zu installieren. Ob zu einem späteren Zeitpunkt nach einem geplanten Umbau des Testrechenzentrums noch innerhalb der Laufzeit von TEMPRO die Messungen durchgeführt werden können, war zu damaligen Zeitpunkt noch nicht abzusehen. Die nach dem Umbau des dc-ce Testrechenzentrums verbleibende Zeit reichte aber leider nicht mehr aus, eine zur Evaluierung und Erweiterung der Algorithmen in AP 5.3 messtechnisch zu unterstützen.

5.3.5 Implementierung der Strategien

Die im Rahmen von AP 5.3 implementierten Störfall-Strategien sind das temperatur-basierte Verschieben von virtuellen Maschinen, die Abschaltung von nicht priorisierten virtuellen Maschinen zwecks Ressourcenschonung sowie das Verschieben von virtuellen Maschinen in Richtung der Kühlanlagen.

Das gewählte Klassendesign erlaubt es ein schnelles Erstellen und Verknüpfen von Strategien, sodass aus einzelnen Strategien in Kombination wieder neue Entstehen können.

Beim temperatur-basierten Verschieben wird vorab ein Temperatur-Limit (bspw. Für die Temperatur an der Vorderseite: 25 Grad Celsius) gesetzt. Dies ist die Vorbedingung zum Verschieben. Sollte ein Host diesen Wert überschreiten, so werden die auf ihm vorhandenen virtuellen Maschinen auf einen physischen Host verschoben der diesen Wert noch nicht erreicht/überschritten hat. Dabei wird über alle verfügbaren physischen Host-Systeme iteriert. Der Prozess ist abgeschlossen, wenn sich keine virtuellen Maschinen mehr auf physikalischen Hosts befinden, welche das Temperaturlimit überschritten haben, oder wenn keine potenziellen physischen Hosts mehr zur Verschiebung zur Verfügung stehen. Im letzten Fall ließe sich die Strategie bspw. gut mit einer Prozedur kombinieren, welche vorsieht, dass eine gleichmäßige Lastverteilung angestrebt wird.

Bei der priorisierten Abschaltung werden die Prioritäten vorab im Icinga gesetzt. Dabei wird sukzessive eine Abschaltung von virtuellen Maschinen vorgenommen, wobei kontinuierlich der Zustand im Rechenzentrum betrachtet wird. Die Prioritätensetzung erfolgt mittels numerischer Wertung. Der Wert Null gibt dabei an, dass eine virtuelle Maschine nicht abgeschaltet werden darf. Die Iterationen laufen demnach von der höchsten Wertung an rückwärts bis exklusive Null. Beispielsweise beträgt der höchste gefundene Wert 99, dann werden erst alle Maschinen mit der Wertung 99 abgeschaltet. Im Anschluss wird der Temperatur-Zustand im Rechenzentrum überprüft. Ist dieser noch über der Norm, werden im Anschluss die Maschinen mit der nächsten niedrigeren Wertung (bspw. 98) abgeschaltet. Eine weitere Möglichkeit wäre das Abschalten der physischen Hosts, sobald diese keine virtuellen Maschinen hosten. Dies ist derzeit jedoch noch nicht implementiert.

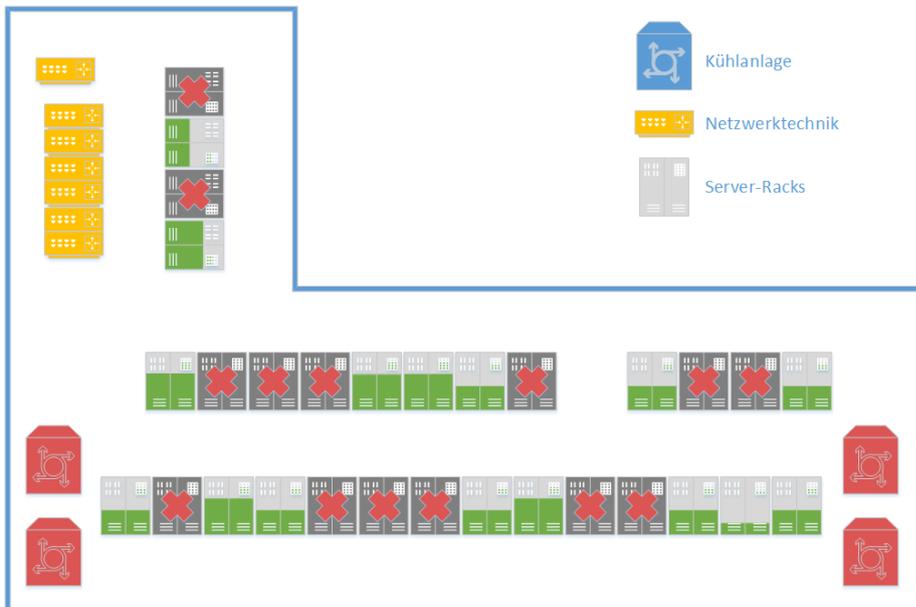


Abbildung 96: Schematische Darstellung der priorisierten Abschaltung

Beim Verschieben von virtuellen Maschinen in Richtung Kühlanlage wird jeweils der Abstand zwischen einem physikalischen Host und den jeweiligen Kühlanlagen ermittelt. Die virtuellen Maschinen werden dann auf einen Host verschoben, dessen Abstand zu einer Kühlanlage geringer ist als das aktuelle Host-System.

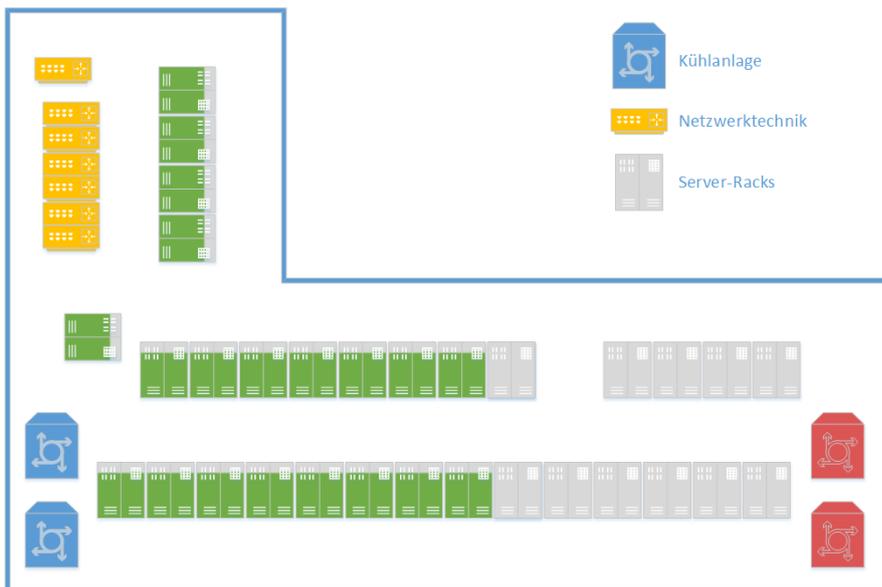


Abbildung 97: Schematische Darstellung der Verschiebung in Richtung intakter Kühlung

5.3.6 Recovery-Funktionalität

Bei Durchlauf einer oder mehrerer Strategien wird ein IST-Zustand, basierend auf einem Zustand einer virtuellen Maschine sowie der Information über das aktuelle Host-System, gespeichert. Diese Informationen werden, nach Durchlauf einer Strategie sowie der Herstellung der Funktionsfähigkeit der Kühlanlage, dazu verwendet den hergestellten Soll-Zustand bei einem Notfall wieder in den Ur-Zustand zu überführen (Abbildung 98).

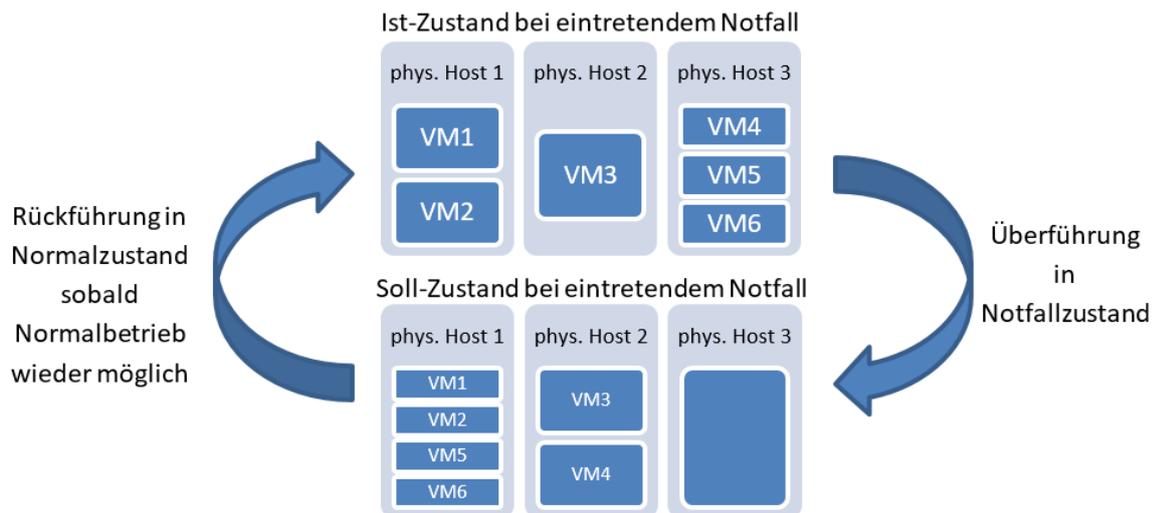


Abbildung 98: Recovery-Verfahren

Dabei werden nicht nur die Zustände der virtuellen Maschinen (running, suspending, shut-down, usw.), sondern auch Informationen über ihr ursprüngliches Host-System (ID, Name des Host-Systems) gespeichert, sodass alle virtuellen Maschinen im Anschluss wieder auf den ursprünglichen physikalischen Servern betrieben werden können.

5.3.7 Abschaltung physischer Server

Nach der Einarbeitung in den bestehenden Quellcode wurde an einer Möglichkeit gearbeitet, physische Server abzuschalten. Dies ermöglicht, im Zusammenspiel mit bisherigen Strategien, weitere Temperaturvermeidung. Sind alle virtuellen Maschinen von einem Host_{alt} auf einen anderen Host_{neu} migriert worden, so kann Host_{alt} vollständig abgeschaltet werden.

Innerhalb der KDO werden zu einem markanten Teil Server des Herstellers Fujitsu eingesetzt. Diese werden mit einer „integrated Remote Management Controller“ (iRMC) ausgeliefert, welcher einen remote Zugriff zwecks Konfiguration, Steuerung und Wartung der Server zulässt. iRMC ist dabei eine Implementierung der standardisierten Schnittstelle „Intelligent Platform Management Interface“, welche es ermöglicht, Server unabhängig von ihrem Zustand, auf Hardwareebene zu überwachen und zu verwalten. Sie stellt damit eine Realisierungsform von Lights-Out-Management (LOM) dar.

Die Implementierung im Rahmen von TEMPRO wurde unter Zuhilfenahme von dem weit verbreitetem „ipmitool“ (<https://github.com/ipmitool/ipmitool>) von Duncan Laurie realisiert. Dieses Tool ermöglicht das Absetzen von IPMI-Befehlen auf Shell-Ebene. Diese Befehle wurden in einer eigenen

Python-Klasse abstrahiert, sodass in den jeweiligen Strategien eine einfache Wiederverwendbarkeit gewährleistet ist.

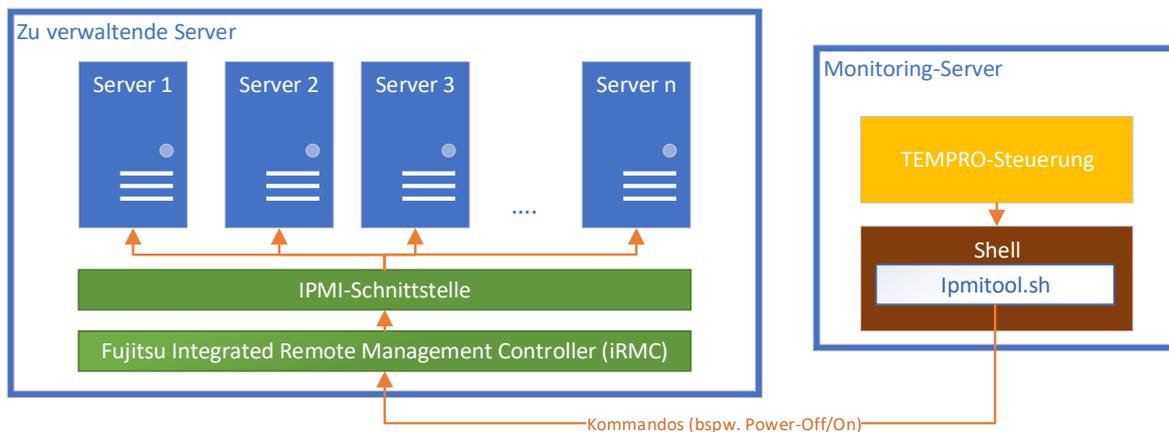


Abbildung 99: schematische Darstellung IPMI-Anbindung

Die Verwendung dieser Lösung zum Abschalten der Server ist aber mit Herausforderungen verbunden, die im Rahmen von TEMPRO nicht bewältigt werden konnten. IPMI-Schnittstellen müssen gute gegen unberechtigte Zugriffe abgesichert sein, da hier ein weitreichender Zugriff auf Hardwareebene gegeben ist. Daher sind zur Verwendung der Schnittstelle Nutzerkonten inklusive Passwörter für die einzelnen zu steuernden Systeme notwendig, welche neben dem Skript abgelegt werden müssten. Dies wird als in der Praxis als nicht hinnehmbares Sicherheitsrisiko bewertet, so dass im Rahmen von TEMPRO diese Option zwar aufgezeigt wird, jedoch im Rechenzentrum von KDO als nicht einsetzbar klassifiziert wird.

Eine Lösung für diese Problematik wäre das Ablegen von Objekten (Host, IP, Nutzernamen, Passwort) in einer verschlüsselten Datei, welche zum Zeitpunkt des Zugriffs wieder entschlüsselt wird. Diese Lösung erfordert jedoch eine Pflege der IPMI-Zugangsdaten in einer separaten Datei und einem zusätzlich erhöhten Wartungsaufwand. Der erwartete zusätzliche Aufwand ist dabei abhängig von der jeweiligen Unternehmensrichtlinie bzgl. der Passwortrichtlinien und den damit zusammenhängenden Häufigkeiten von vorzunehmenden Passwortänderungen auf Systemen. Im Rahmen von TEMPRO hat sich auch diese Lösung nicht als im Rechenzentrum von KDO einsetzbar gezeigt.

5.3.8 Fazit und Potenziale zur Energieeinsparung

Im Rahmen von AP 5.3 sollte Prototyp einer Softwarelösung zum Notfallmanagement von IT-Lasten auf Basis von OpenNebula entwickelt und erprobt werden. Dieses Ziel wurde erreicht. Es wurden unterschiedliche Störfallstrategien entwickelt und getestet, mit denen im Fall des (teilweisen) Ausfalls einer Klimaanlage die Lasten im Rechenzentrum verteilt werden können. Damit ist der Betrieb des Rechenzentrums (bzw. der unbedingt notwendigen Systeme) weiterhin möglich oder es wird die Zeit bis zum vollständigen Ausfall der Systeme verlängert. Damit die Lösung in der Praxis eingesetzt werden kann, sind noch Funktionstests in einer möglichst realen Testumgebung und im Anschluss daran in einem Rechenzentrum mit niedrigen Anforderungen an die Verfügbarkeit notwendig.

Die entwickelte Lösung führt nicht nur einer Verbesserung der Ausfallsicherheit des Rechenzentrums, sie ermöglicht auch die Erhöhung der Temperaturen im Rechenzentrum. Bisher werden in vielen Rechenzentren Temperaturen realisiert, die deutlich unter den technischen Notwendigkeiten und den Empfehlungen für einen effizienten Betrieb liegen (Rüdiger & Ostler, 2019). Die niedrigen Temperaturen werden oft mit den dadurch längeren Reaktionszeiten bei potenziellen Störfällen an der Kühlung begründet. Mit der in AP 5.3 entwickelten Lösung ist es möglich, die Temperatur im Rechenzentrum zu erhöhen. Zum einen ermöglicht die entwickelte Sensorik eine schnellere und genauere Identifikation möglicher Störfälle in der Klimatisierung. Zum anderen kann der Betrieb des Rechenzentrums trotz Ausfall der Kühlung aufrechterhalten oder zumindest deutlich verlängert werden. Eine Erhöhung der Temperatur im Rechenzentrum um 5°C bis 7 °C ermöglicht eine Energieeinsparungen von ca. 20% bei der Kühlung des Rechenzentrums (Clausen & Fichter, 2009).

Literaturverzeichnis

- Alffen, G. (2019): Cloud-Repatriation - Warum migrieren Unternehmen aus der Public Cloud zurück? Online verfügbar unter www.silicon.de/experten-tipp/cloud-repatriation-warum-migrieren-unternehmen-aus-der-public-cloud-zuruec.
- Andrae, Anders; Edler, Tomas (2015): On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030. In: *Challenges* 6 (1), S. 117–157. DOI: 10.3390/challe6010117.
- Andrae, Anders S. G. (2019): Projecting the chiaroscuro of the electricity use of communication and computing from 2018 to 2030. DOI: 10.13140/RG.2.2.25103.02724.
- Baumgärtner, Stefan; Becker, Christian; Frank, Karin; Müller, Birgit; Quaas, Martin (2008): Relating the philosophy and practice of ecological economics. The role of concepts, models, and case studies in inter- and transdisciplinary sustainability research. Leipzig: UFZ (UFZ-Diskussionspapiere, 2/2008).
- Behörde für Umwelt und Energie Hamburg (2019): Effiziente Rechenzentren in Unternehmen. Online verfügbar unter www.hamburg.de/ressourcenschutz/2009028/serverraumcheck, zuletzt geprüft am 29.04.2020.
- Belkhir, Lotfi; Elmeligi, Ahmed (2018): Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations. In: *Journal of Cleaner Production* 177, S. 448–463. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.12.239.
- Biglari Recycling: Aktuelle Preise für Elektronik-Schrott. Online verfügbar unter <http://www.biglari-recycling.de/>, zuletzt geprüft am 08.08.2017.
- Bigum, Marianne; Brogaard, Line; Christensen, Thomas H. (2012): Metal recovery from high-grade WEEE: A life cycle assessment. In: *Journal of Hazardous Materials* 207-208, S. 8–14. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2011.10.001.
- Bizo, D. (2019): The Carbon Reduction Opportunity of Moving to Amazon Web Services. Online verfügbar unter <https://d39w7f4ix9f5s9.cloudfront.net/e3/79/42bf75c94c279c67d777f002051f/carbon-reduction-opportunity-of-moving-to-aws.pdf>, zuletzt geprüft am 29.04.2020.

- Brandt, Patric; Ernst, Anna; Gralla, Fabienne; Lüderitz, Christopher; Lang, Daniel; Newig, Jens et al. (2013): A review of transdisciplinary research in sustainability science. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2013.04.008>.
- Bräuninger, G. (2015): Rohstoff- Energie- und CO₂-Einsparungen durch das Recycling von Sicherungseinsätzen. Online verfügbar unter <http://www.nh-hh-recycling.de/files/swissy/Downloads/Abholfax%20und%20Umweltreport/Rohstoff-%20Energie-%20und%20CO2Einsparungen%20durch%20das%20Recycling%20von%20Sicherungseinsaetzen.pd>, zuletzt geprüft am 29.04.2020.
- Burns, Brendan; Grant, Brian; Oppenheimer, David; Brewer, Eric; Wilkes, John (2016): Borg, Omega, and Kubernetes. In: *Queue* 14 (1), S. 70–93. DOI: 10.1145/2898442.2898444.
- CBECI (2019): Methodology - Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (CBECI). In: Mason Willrich (Hg.): *Modernizing America's Electricity Infrastructure: The MIT Press*. Online verfügbar unter www.cbeci.org/methodology.
- CBRE (2017): European Data Centres Market Review. Q4 2016. London. Online verfügbar unter www.cbre.de/de-de/research/European-Data-Centres-MarketView-Q4-201, zuletzt geprüft am 10.06.2017.
- CBRE (2018): Nachgefragte Leistung europäischer Rechenzentren übersteigt erneut 100 MW-Wert. Nachgefragte Leistung europäischer Rechenzentren übersteigt erneut 100 MW-Wert. Online verfügbar unter <http://news.cbre.de/nachgefragte-leistung-europaischer-rechenzentren-ubersteigt-erneut-100-mw-wer>, zuletzt geprüft am 04.04.2018.
- CBRE (2020): Europe Data Centres Q4 2019. Online verfügbar unter www.cbre.de/en/global/research-and-reports/featured-reports-global/featured-reports-eme.
- Cisco (2015): Cisco Global Cloud Index: Forecast and Methodology 2014-2019. Online verfügbar unter http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/global-cloud-index-gci/Cloud_Index_White_Paper.pdf.
- Cisco (2016): Cisco Global Cloud Index: Forecast and Methodology 2015-2020. Online verfügbar unter www.cisco.com/c/dam/en/us/solutions/collateral/service-provider/global-cloud-index-gci/white-paper-c11-738085.pdf, zuletzt geprüft am 10.10.2017.
- Comet-Trade (2017): Platinen Ankauf | Preise für Schrott | Computer Ankauf. Comet-Trade. Online verfügbar unter http://www.comet-trade.de/preise_e.htm, zuletzt geprüft am 27.10.2017.
- Daim, Tugrul; Justice, Jay; Krampits, Mark; Letts, Matthew; Subramanian, Ganesh; Thirumalai, Mukundan (2009): Data center metrics. In: *Management of Env Quality* 20 (6), S. 712–731. DOI: 10.1108/14777830910990870.
- DataCenter Insider (2017): Neue Stromversorgungsarchitekturen drücken die Datacenter-Kosten. Online verfügbar unter www.datacenter-insider.de/neue-stromversorgungsarchitekturen-druecken-die-datacenter-kosten-a-590569, zuletzt geprüft am 25.10.2017.

- Deloitte; Fraunhofer IZM (2016): Ecodesign Preparatory Study on Enterprise Servers and Data Equipment. Brussels. Online verfügbar unter <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/6ec8bbe6-b8f7-11e5-8d3c-01aa75ed71a1>, zuletzt geprüft am 22.01.2018.
- Digiconomist (2019): Bitcoin Energy Consumption Index. Online verfügbar unter <https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption>, zuletzt geprüft am 29.04.2020.
- DIN EN (2016): VDE DIN EN 50600-4-3; VDE 0801-600-4-3, 2016: Informationstechnik- Einrichtungen und Infrastruktur von Rechenzentren - Teil 4-3: Anteil erneuerbarer Energien. Deutsche Fassung FprEN 50600-4-3:2016. DIN EN.
- EITO (2014): EITO Customized Report for Borderstep. EITO. Berlin.
- electronicspecifier.com (2017): On the road to software defined power architecture. Online verfügbar unter <http://www.electronicspecifier.com/power/on-the-road-to-software-defined-power-architectur>, zuletzt geprüft am 25.10.2017.
- Elzinga, A. (2008): Participation. Handbook of transdisciplinary research: Springer.
- Erek, Koray; Drenkelfort, Gregor; Pröhl, Thorsten (2013): Energiemonitoring von IKT-Systemen. State-of-the-Art von Energiemonitoringsystemen. Hg. v. Rüdiger Zarnekow. Berlin: Universitätsverlag der TU Berlin (Projektberichte IKM, 2).
- Eschrott-Service UG (2017): eschrott-service.de | Ankauf Elektroschrott - Ankaufpreise. Online verfügbar unter <http://eschrott-service.de/ankaufpreise.html>, zuletzt geprüft am 27.10.2017.
- ESG Edelmetall-Service GmbH & Co. KG (2017): Ankaufpreise und Sortierkriterien für Elektroschrott / E-Schrott. Online verfügbar unter www.scheideanstalt.de/elektroschrott-preise-und-sortierkriterien/, zuletzt geprüft am 27.10.2017.
- European Commission (2010): ILCD Handbook - General guide on LCA - Detailed guidance. European Union. Luxembourg. Online verfügbar unter http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC48157/ilcd_handbook-general_guide_for_lca-detailed_guidance_12march2010_isbn_fin.pdf, zuletzt geprüft am 29.04.2020.
- European Commission (2017a): Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions on the 2017 List of Critical Raw Materials for the EU. COM(2017). Brussels. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52017DC0490&from=EN>, zuletzt geprüft am 25.06.2019.
- European Commission (2017b): Critical Raw Materials - Growth. European Commission. Online verfügbar unter <http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical/>, zuletzt geprüft am 13.12.2017.
- European Commission (2017c): Study on the review of the list of critical raw materials. Critical raw materials factsheets. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

- Fichter, Klaus; Hintemann, Ralph (2014): Beyond Energy: Material Stocks in Data Centers, Taking Resource Efficiency into account in Green IT Strategies for Data Centers. In: *Journal of Industrial Ecology* 18 (6), S. 846–858. DOI: 10.1111/jiec.12155.
- Funtowicz, S.; Ravetz, J. (2003): International Society for Ecological Economics (ed.), Online Encyclopedia of Ecological Economics (ed.), Online Encyclopedia of Ecological Economics. Online verfügbar unter <http://www.ecoeco.org/publica/encyc.html>.
- Gartner (2019): Gartner Says Worldwide Server Revenue Grew 17.8 Percent in the Fourth Quarter of 2018, While Shipments Increased 8.5 Percent. Online verfügbar unter www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2019-03-18-gartner-says-worldwide-server-revenue-grew-17-8-per-.
- Giegrich, J.; Liebich, A.; Lauwigi, C.; Reinhardt, J. (2012): Indikatoren / Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion. Unter Mitarbeit von ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH im Auftrag des Umweltbundesamtes. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4237.pdf, zuletzt geprüft am 29.04.2020.
- golem.de (2016): Cloud: Amazons AWS sucht 130 Beschäftigte in Deutschland. Online verfügbar unter www.golem.de/news/cloud-amazons-aws-sucht-130-beschaefigte-in-deutschland-1605-121000.htm.
- Gotzler, M. (2017): Preise für Elektronik-Schrott / Computerplatinen, RAM, Mainboard. Online verfügbar unter <http://www.computerplatinen.de/elektronik-recycling-preise/schrott-computer-platinen.php>, zuletzt geprüft am 11.11.2017.
- Greenpeace; North China Electric Power University (2019): Powering the Cloud: How China's Internet Industry Can Shift to Renewable Energy (Summary). Online verfügbar unter https://secured-static.greenpeace.org/eastasia/PageFiles/299371/Powering%20the%20Cloud%20_%20English%20Briefing.pdf?_ga=2.134490865.1643020916.1584627591-1230699852.1584179778, zuletzt geprüft am 29.04.2020.
- Gröger, Jens; Köhn, Marina (2016): Produkte und Dienstleistungen für Rechenzentren und Serverräume. Leitfaden zur umweltfreundlichen öffentlichen Beschaffung : Ratgeber. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, Fachgebiet III 1.3 (Ratgeber / Umweltbundesamt). Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/leitfaden-zur-umweltfreundlichen-oeffentlichen-1>.
- Hadorn, G. H.; Biber-Klemm, S.; Grossenbacher-Mansuy, W.; Hoffmann-Riem, H.; Joye, D.; Pohl, C. et al. (2008): The emergence of transdisciplinarity as a form of research. Handbook of transdisciplinary research.
- Hagelüken, C.; Meskers, C. E. M. (2009): Complex Life Cycles of Precious and Special Metals. In: Thomas E. Graedel und Ester van der Voet (Hg.): Linkages of Sustainability: The MIT Press.
- Hao, K. (2019): Training a single AI model can emit as much carbon as five cars in their lifetimes - MIT Technology Review. Online verfügbar unter www.technologyreview.com/s/613630/training-a-

single-ai-model-can-emit-as-much-carbon-as-five-cars-in-their-lifetimes, zuletzt geprüft am 29.04.2020.

Hauschild, Michael Zwicky; José Potting (2004): Spatial differentiation in life cycle impact assessment - the EDIP-2003 methodology. Guidelines from the Danish EPA: Miljøstyrelsen.

Hintemann, R. (2016): Trotz verbesserter Energieeffizienz steigt der Energiebedarf der deutschen Rechenzentren im Jahr 2016. Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit. Berlin. Online verfügbar unter www.borderstep.de/wp-content/uploads/2017/03/Borderstep_Rechenzentren_2016.pd.

Hintemann, R. (2017a): Energieeffizienz und Rechenzentren in Deutschland – weltweit führend oder längst abgehängt? Netzwerk energieeffiziente Rechenzentren. Berlin. Online verfügbar unter www.borderstep.de/wp-content/uploads/2017/07/NeRZ-Studie-Rechenzentrumsmarkt-30-06-2017.pd, zuletzt geprüft am 25.10.2017.

Hintemann, R. (2017b): Trotz verbesserter Energieeffizienz steigt der Energiebedarf der deutschen Rechenzentren im Jahr 2016. Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit. Berlin.

Hintemann, R. (2018a): Boom führt zu deutlich steigendem Energiebedarf der Rechenzentren in Deutschland im Jahr 2017. Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit. Berlin.

Hintemann, R. (2018b): Rechenzentren 2017. Boom führt zu deutlich steigendem Energiebedarf der Rechenzentren in Deutschland im Jahr 2017. Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit. Berlin. Online verfügbar unter www.borderstep.de/wp-content/uploads/2018/12/Borderstep-Rechenzentren-2017-final-Stand-Dez_2018n.pd, zuletzt geprüft am 29.04.2020.

Hintemann, R. (2019a): Energiebedarf der Rechenzentren in Deutschland steigt weiter an. Online verfügbar unter www.datacenter-insider.de/energiebedarf-der-rechenzentren-in-deutschland-steigt-weiter-an-a-886887, zuletzt geprüft am 29.04.2020.

Hintemann, R. (2019b): Energy demand of cloud computing, development and trends: Data center energy demand. Gehalten auf der Workshop on research and technological development (R&TD) of energy efficiency in cloud computing. Online verfügbar unter www.cloudefficiency.eu/workshop, zuletzt geprüft am 29.04.2020.

Hintemann, R.; Clausen, J. (2018a): Bedeutung digitaler Infrastrukturen in Deutschland. Sozioökonomische Chancen und Herausforderungen für Rechenzentren im internationalen Wettbewerb. Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit. Berlin. Online verfügbar unter www.eco.de/wp-content/uploads/dlm_uploads/2018/06/DI_Studie.pd.

Hintemann, R.; Clausen, J. (2018b): Potenzial von Energieeffizienztechnologien bei Colocation Rechenzentren in Hessen. Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit. Berlin. Online verfügbar unter www.digitalstrategie-hessen.de/rechenzentre, zuletzt geprüft am 29.04.2020.

Hintemann, R.; Fichter, K.; Schlitt, D. (2014): Adaptive computing and server virtualization in German data centers - Potentials for increasing energy efficiency today and in 2020. In Marx Gómez, Sonnenschein, Vogel, Winter, Rapp & Giesen (Hrsg.), Proceedings of the 28th Conference on Environmental Informatics - Informatics for Environmental Protection, Sustainable Development and Risk Management (S. 477–484). Gehalten auf der EnviroInfo 2014 - ICT for Energy Efficiency,

- Oldenburg: BIS. Online verfügbar unter <http://enviroinfo.eu/sites/default/files/pdfs/vol8514/0477.pd>, zuletzt geprüft am 25.01.2015.
- Hintemann, R.; Fichter, K.; Stobbe, L. (2010): Materialbestand der Rechenzentren in Deutschland : eine Bestandsaufnahme zur Ermittlung von Ressourcen- und Energieeinsatz. Studie im Rahmen des UFO-Plan-Vorhabens "Produktbezogene Ansätze in der Informations- und Kommunikationstechnik" (Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4037.pdf>, zuletzt geprüft am 29.04.2020.
- Hintemann, R.; Hinterholzer, S.: Energy Consumption of Data Centers Worldwide - How will the Internet become Green? Gehalten auf der ICT4S. Lappeenranta, Finland. Online verfügbar unter http://ceur-ws.org/Vol-2382/ICT4S2019_paper_16.pd, zuletzt geprüft am 29.04.2020.
- Hintemann, R.; Hinterholzer, S. (2019): Energy Consumption of Data Centers Worldwide - How will the Internet become Green Gehalten auf der ICT4S, Lappeenranta, Finland. Online verfügbar unter http://ceur-ws.org/Vol-2382/ICT4S2019_paper_16.pdf.
- Hintemann, Ralph (2015): Consolidation, Colocation, Virtualization, and Cloud Computing: The Impact of the Changing Structure of Data Centers on Total Electricity Demand. In: Lorenz M. Hilty und Bernard Aebischer (Hg.): ICT Innovations for Sustainability, Bd. 310. Cham: Springer International Publishing (Advances in Intelligent Systems and Computing), S. 125–136.
- Hintemann, Ralph; Clausen, Jens (2016): Green Cloud? The current and future development of energy consumption by data centers, networks and end-user devices. In: ICT for Sustainability. Amsterdam, the Netherlands. Online verfügbar unter <http://www.atlantispress.com/php/pub.php?publication=ict4s-1>.
- Hintemann, Ralph; Hinterholzer, Simon (2018a): Innovation alliances for sustainable ICT - Good practices and success factors, using the example of initiatives to improve the energy efficiency of data centers. In: EasyChair (Hg.): 5th International Conference on Information and Communication Technology for Sustainability. ICT4S2018. 5th International Conference on Information and Communication Technology for Sustainability: EasyChair (EPiC Series in Computing), 125-112.
- Hintemann, Ralph; Hinterholzer, Simon (2018b): Technology radars for energy-efficient data centers: A transdisciplinary approach to technology identification, analysis and evaluation. In: Sustainable Technologies. World Congress.
- Hobohm, J.; Wasserberg, S.; Kuchta, K. (2014): Repro: Weiterentwicklung der abfallwirtschaftlichen Produktverantwortung unter Ressourcenschutzaspekten am Beispiel von Elektro- und Elektronikgeräten. Arbeitspaket 3 "Behandlung" - Analytik zu den Versuchen Teil 1: Variation der Inputkonzentration. UFOPlan-Vorhaben FKZ 3711 95 318. Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft. Hamburg, Germany.
- Howard-Healy, M. (2018): Co-location Market Quarterly (CMQ). Vortrag auf dem BroadGroup's Knowledge Brunch in Frankfurt. Broadgroup.

- HTF (2018): Micro Mobile Data Center Market to reach \$10.26 billion by 2023 growing at a CAGR of 23.3% – Facts Week. Online verfügbar unter <https://factsweek.com/301451/micro-mobile-data-center-market-to-reach-10-26-billion-by-2023-growing-at-a-cagr-of-23-3/>.
- IDC (2018): Server Market and Enterprise Storage Systems By Country 2014-2017.
- IDC (2020): Worldwide Server Market Revenue Grew 7.5% Year Over Year in the Fourth Quarter of 2019, According to IDC. IDC. Online verfügbar unter www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS4613242, zuletzt geprüft am 29.04.2020.
- IEA (2017): Digitalization & Energy. Online verfügbar unter www.iea.org/reports/digitalisation-and-energy, zuletzt geprüft am 20.01.2019.
- Jetzke, T.; Richter, S.; Ferdinand, J.-P.; Schaaf, S. (2019): Künstliche Intelligenz im Umweltbereich: Anwendungsbeispiele und Zukunftsperspektiven im Sinne der Nachhaltigkeit. Online verfügbar unter www.umweltbundesamt.de/publikationen/kuenstliche-intelligenz-im-umweltbereich, zuletzt geprüft am 29.04.2020.
- Kalenda, F. (2014): Salesforce eröffnet 2015 Rechenzentrum in Deutschland. Online verfügbar unter <http://www.zdnet.de/88185967/salesforce-eroeffnet-2015-rechenzentrum-deutschland>, zuletzt geprüft am 20.10.2014.
- Kamiya, G. (2019): Bitcoin energy use: mined the gap. Online verfügbar unter www.iea.org/newsroom/news/2019/july/bitcoin-energy-use-mined-the-gap.htm.
- Klinglmair, Manfred; Sala, Serenella; Brandão, Miguel (2014): Assessing resource depletion in LCA: a review of methods and methodological issues. In: *Int J Life Cycle Assess* 19 (3), S. 580–592. DOI: 10.1007/s11367-013-0650-9.
- Knight, W. (2018): Intel wants to move beyond today's architecture, with brain-inspired and quantum chips. MIT Technology Review. Online verfügbar unter www.technologyreview.com/s/609909/intels-new-chips-are-more-brain-like-than-ever.
- Koomey, J. & Taylor, J. (2015): New data supports finding that 30 percent of servers are 'Comatose', indicating that nearly a third of capital in enterprise data centers is wasted. Online verfügbar unter http://anthesisgroup.com/wp-content/uploads/2015/06/Case-Study_DataSupports30PercentComatoseEstimate-FINAL_06032015.pdf.
- Kroker, M. (2018): Microsoft eröffnet zwei Cloud-Rechenzentren in Deutschland. Online verfügbar unter www.wiwo.de/unternehmen/it/dreistelliges-millionen-investment-microsoft-eroeffnet-zwei-cloud-rechenzentren-in-deutschland/21061858.htm.
- Kuplent, F. (2014): VMWare baut für Cloud-Angebote neues Rechenzentrum in Deutschland. Online verfügbar unter <http://www.onlinekosten.de/news/artikel/59830/0/VMWare-baut-fuer-Cloud-Angebote-neues-Rechenzentrum-in-Deutschland>, zuletzt geprüft am 20.10.2014.
- Lang, Daniel J.; Wiek, Arnim; Bergmann, Matthias; Stauffacher, Michael; Martens, Pim; Moll, Peter et al. (2012): Transdisciplinary research in sustainability science – practice, principles, and challenges. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/s11625-011-0149-x>.

- Liu, Liang; Wang, Hao; Liu, Xue; Jin, Xing; He, Wen Bo; Wang, Qing Bo; Chen, Ying (2009): GreenCloud. In: Michael Nunez: Proceedings of the 6th International Conference Industry Session on Autonomic Computing and Communications Industry Session. Hg. v. Michael Nunez. [Place of publication not identified]: Association for Computing Machinery, S. 29.
- Lucas, R.; Wilts, H. (2011): Weltweite Wiedergewinnung von Platingruppenmetallen (PGM) : Meilensteinbericht des Arbeitspakets 2.2 des Projekts "Materialeffizienz und Ressourcenschonung" (MaRes). Online verfügbar unter http://ressourcen.wupperinst.org/downloads/MaRes_AP2_3.pdf, zuletzt geprüft am 29.04.2020.
- Masanet, Eric; Shehabi, Arman; Lei, Nuo; Smith, Sarah; Koomey, Jonathan (2020): Recalibrating global data center energy-use estimates. In: *Science (New York, N.Y.)* 367 (6481), S. 984–986. DOI: 10.1126/science.aba3758.
- Nanz, Patrizia; Renn, Ortwin; Lawrence, Mark (2017): Der transdisziplinäre Ansatz des Institute for Advanced Sustainability Studies (IASS): Konzept und Umsetzung. In: *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society* 26 (3), S. 293–296. DOI: 10.14512/gaia.26.3.19.
- Newman, Sam (2015): Building microservices. First edition. Beijing, Cambridge, Farnham, Köln, Sebastopol, Tokyo: O'Reilly.
- Nuss, Philip; Eckelman, Matthew J. (2014): Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis. In: *PLoS one* 9 (7), e101298. DOI: 10.1371/journal.pone.0101298.
- Ormazabal, Marta; Jaca, Carmen; Puga-Leal, Rogério (2014): Analysis and Comparison of Life Cycle Assessment and Carbon Footprint Software. In: Jiuping Xu (Hg.): Proceedings of the eighth International Conference on Management Science and Engineering Management. Focused on computing and engineering management, Bd. 281. Heidelberg: Springer (Advances in Intelligent Systems and Computing, 281), S. 1521–1530.
- Osterwalder, A.; Pigneur, Y.; Bernarda, G.; Smith, A.; Papadacos, T. (2015): Value Proposition Design. Entwickeln Sie Produkte und Services, die Ihre Kunden wirklich wollen. Unter Mitarbeit von Trish Papadacos. Frankfurt am Main: Campus-Verl.
- Osterwalder, Alexander; Pigneur, Yves (2011): Business model generation. Ein Handbuch für Visionäre, Spielveränderer und Herausforderer; [entwickelt in Zusammenarbeit mit 470 überwältigenden Profis aus 45 Ländern]. Frankfurt am Main [u.a.]: Campus.
- Peñaherrera, F.; Szczepaniak, K.; Hobohm, J. (2018): LCA of Energy and Material Demands in Professional Data Centers. Case Study of a Server. In Technische Universität Braunschweig (Ed.). Progress in Life Cycle Assessment.
- Pohl, Christian; Hadorn, Gertrude (2007): Principles for designing transdisciplinary research. 1st ed. München: Oekom.
- Prakash, Siddharth; Baron, Yifaat; Liua, Ran; Proske, Marina; Schlösser, Alexander (2014): Study on the practical application of the new framework methodology for measuring the environmental impact of ICT - cost/benefit analysis. Executive summary. Luxembourg: Publications Office.

- Rauchs, Michel; Blandin, Apolline; Klein, Kristina; Pieters, Gina C.; Recanatini, Martino; Zhang, Bryan Zheng (2018): 2nd Global Cryptoasset Benchmarking Study. In: *SSRN Journal*. DOI: 10.2139/ssrn.3306125.
- Reinsel, D.; Gantz, J.; Rydning, J. (2018): The Digitization of the World. From Edge to Core. IDC.
- Rohrbeck, R.; Heuer, J.; Arnold, H. (2006): The Technology Radar - an Instrument of Technology Intelligence and Innovation Strategy. In: 2006 IEEE International Conference on Management of Innovation and Technology. Singapore, China, S. 978–983.
- Sander, K.; Schilling, S.; Marscheider-Weidemann, F.; Wilts, H.; Gries, N. von; Hobohm, J. (2012): Forschungskennzahl (UFOPLAN) FKZ 3711 95 318: Abfallwirtschaftliche Produktverantwortung unter Ressourcenschutzaspekten. Meilensteinbericht August 2012. Unter Mitarbeit von Ökopol GmbH, Fraunhofer Gesellschaft ISI, TU Darmstadt und TU Hamburg-Harburg. Hg. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter http://www.oekopol.de/archiv/material/603_RePro_Meilensteinbericht_1.pdf, zuletzt geprüft am 29.04.2020.
- SBWire (2018): Global Micro Data Center Market: Savvy Players Strive to Enhance Service Capabilities to Expand Customer Base - Press Release - Digital Journal. Online verfügbar unter <http://www.digitaljournal.com/pr/370997>.
- Schmidt, R. R.; Cruz, E. E.; Iyengar, M. (2005): Challenges of data center thermal management. In: *IBM J. Res. & Dev.* 49 (4.5), S. 709–723. DOI: 10.1147/rd.494.0709.
- Schneider, Julia; Ziyal, Lena Kadriye (2019): We Need to Talk, AI. A Comic Essay on Artificial Intelligence. 6. Auflage. Berlin: epubli.
- 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. In: *Int J Life Cycle Assess* 20 (5), S. 709–721. DOI: 10.1007/s11367-015-0864-0.
- Schödwell, B.; Zarnekow, R.; Gröger, J.; Liu, R.; Wilkens, M. (2018): Kennzahlen und Indikatoren für die Beurteilung der Ressourceneffizienz von Rechenzentren und Prüfung der praktischen Anwendbarkeit. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter www.umweltbundesamt.de/publikationen/kennzahlen-indikatoren-fuer-die-beurteilung-de, zuletzt geprüft am 29.04.2020.
- Shehabi, A.; Smith, S.; Sartor, D.; Brown, R.; Herrlin, M.; Koomey, J. (2016): United States Data Center Energy Usage Report. No. LBNL-1005775. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. Berkeley, CA. Online verfügbar unter https://eta.lbl.gov/sites/all/files/publications/lbnl-1005775_v2.pdf, zuletzt geprüft am 29.04.2020.
- Shehabi, Arman; Smith, Sarah J.; Masanet, Eric; Koomey, Jonathan (2018): Data center growth in the United States: decoupling the demand for services from electricity use. In: *Environ. Res. Lett.* 13 (12), S. 124030. DOI: 10.1088/1748-9326/aac9c.
- Smart City Cluster Colaboration (2014): Existing Data Centres energy metrics - Task 1. Online verfügbar unter <http://www.dolphin-fp7.eu/wp-content/uploads/2014/01/Task-1-List-of-DC-Energy-Related-Metrics-Final.pdf>, zuletzt geprüft am 11.08.2015.

- Stobbe, L.; Hintemann, R.; Proske, M.; Clausen, J., Zedel, H. & Beucker, S. (2015): Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland - Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Fraunhofer IZM; Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit. Berlin. Online verfügbar unter <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/entwicklung-des-ikt-bedingten-strombedarfs-in-deutschland-abschlussbericht,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>, zuletzt geprüft am 29.04.2020.
- Stobbe, L.; Proske, M.; Schlösser, A.; Scheiber, S.; Rohde, C., Leimbach, T. (2014): Green IT Dossier - IT2 Green. Berlin. Online verfügbar unter http://www.it2green.de/documents/GreenIT-Dossier_V01.pdf, zuletzt geprüft am 24.09.2014.
- Strubell, Emma; Ganesh, Ananya; McCallum, Andrew (2019): Energy and Policy Considerations for Deep Learning in NLP. In: Anna Korhonen, David Traum und Lluís Màrquez (Hg.): Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. Florence, Italy, S. 3645–3650.
- Szczepaniak, K. (2018): Das Rohstoffpotenzial von Rechenzentren: Quantifizierung kritischer Rohstoffe im Rechenzentrumsinventar zur Ermittlung des Grauen-Energie-Verbrauchs. Masterarbeit. Technische Universität Hamburg. Hamburg, Germany.
- Szczepaniak, K.; Hobohm, J. (2017): Quantifizierung kritischer Rohstoffe in Rechenzentren als ressourcenrelevanter Bezug zur Grauen Energie. Technische Universität Hamburg. Hamburg, Germany.
- Tawackolian, K.; Lindenberg, K. J.; Kaiser, H.; Kriegel, M. (2020): Data centre floor tiles influence on server fan power consumption. In: *Energy and Buildings* 216, S. 109943. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.109943.
- Techconsult (2014): Daten des analyzers. Online verfügbar unter www.eanalyzer.biz, zuletzt geprüft am 29.04.2020.
- The Green Grid (2011): Data Center Efficiency Metrics: mPUE, partial PUE, ERE, DCcE. Online verfügbar unter http://www.thegreengrid.org/~media/TechForumPresentations2011/Data_Center_Efficiency_Metrics_2011.pdf, zuletzt geprüft am 29.04.2020.
- The Green Grid (2015): Library and Tools. Online verfügbar unter <http://www.thegreengrid.org/en/library-and-tools.aspx?category=MetricsAndMeasurements&range=EntireArchive&type=All&lang=en&paging=All>.
- The Shift Project (2019): LEAN ICT- Towards digital sobriety. Online verfügbar unter <https://theshiftproject.org/en/article/lean-ict-our-new-report/>, zuletzt geprüft am 29.04.2020.
- Tytgat, J. (2009): Li-ion and NiMH battery recycling at Umicore. Strategic choices. Umicore AG & Co. Online verfügbar unter <http://www.smart-systems-integration.org/public/electric-vehicle/battery-workshop-documents/presentations/Jan%20Tytgat%20Umicore.pdf>, zuletzt geprüft am 29.04.2020.
- UBA (2019): ProBas+ Datenbank. Dessau-Roßlau: UBA.

- VansonBourne (2019): Nutanix Enterprise Cloud Index - Application requirements to drive hybrid cloud growth. Online verfügbar unter www.nutanix.com/enterprise-cloud-index?utm_source=sprout&utm_medium=socia, zuletzt geprüft am 29.04.2020.
- Walsh, T. (2018): *Machines that Think: The future of artificial intelligence*. [First edition]. Amenia, New York: Grey House Publishing (The reference shelf, volume 90, number 4).
- Wang, Lizhe; Khan, Samee U. (2013): Review of performance metrics for green data centers: a taxonomy study. In: *J Supercomput* 63 (3), S. 639–656. DOI: 10.1007/s11227-011-0704-3.
- Wernet, Gregor; Bauer, Christian; Steubing, Bernhard; Reinhard, Jürgen; Moreno-Ruiz, Emilia; Weidema, Bo (2016): Theecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. In: *Int J Life Cycle Assess* 21 (9), S. 1218–1230. DOI: 10.1007/s11367-016-1087-8.
- Wilkens, Marc; Drenkelfort, Gregor; Dittmar, Lars (2012): *Bewertung von Kennzahlen und Kennzahlensystemen zur Beschreibung der Energieeffizienz von Rechenzentren*. Berlin: Universitätsbibliothek Technische Universität Berlin (Schriftenreihe Innovationszentrum Energie, 3). Online verfügbar unter http://www.opus4.kobv.de/opus4-tuberlin/frontdoor/deliver/index/docId/3363/file/IZE_3_wilkens.pdf.

2. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Eine Förderung des Projektes TEMPRO „Total Energy Management for professional data centers - Ganzheitliches Energiemanagement in professionellen Rechenzentren“ war notwendig und alle Arbeiten waren angemessen, da die Beherrschung der Energieeffizienz in Rechenzentren bislang noch sehr ungenügend ist. Durch dieses gemeinsame Projekt mit mehreren Rechenzentren und deren wissenschaftlicher Begleitung erzielte wir einen hohen Erkenntnisgewinn, der bundesweit auf andere (bzw. alle) Rechenzentren übertragbar ist. Unser Erstbewertungstoll Erbet ist beispielsweise für alle Nutzer kostenlos zu nutzen und wäre ohne Förderung nicht möglich gewesen. Das Risiko zu den richtigen energieeffizienten Maßnahmen zu gelangen ist dabei immer noch sehr hoch und würde nie in diesem Maßstab ohne Förderung durchgeführt werden können

3. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Das Umweltbundesamt hat ein Vorhaben zu Kennzahlen für Rechenzentren abgeschlossen (KPI4DCE) und die Ergebnisse veröffentlicht. Der Ansatz in diesem Vorhaben zu Effizienzmessung eines Rechenzentrums und zur Berücksichtigung von Herstellenergie und Ressourcenbedarf sind mit Ansätzen von TEMPRO vergleichbar. Die Ergebnisse liefern einen zusätzlichen wertvollen Input für TEMPRO, insbesondere für die Arbeitspakete 1, 2 und 3. Die in AP 3 noch durchzuführende Evaluierungsmessung nimmt explizit auch Bezug zu den Ergebnissen des Projektes KPI4DCE. Aus dem vom BMWi geförderten ZIM-Netzwerk „Netzwerk energieeffiziente Rechenzentren“ liegen detaillierte Umfrageergebnisse von Rechenzentrumsbetreibern zum Thema Energieeffizienz vor. Diese Ergebnisse konnten für die Berechnungen in AP 1 und die Trendanalysen in AP 4 und AP 5 genutzt werden. Außerdem kann eine im ersten Quartal 2019 durchzuführende Befragung von Rechenzentrumsbetreibern, die im Rahmen von AP 1 durchgeführt wird, auf den Ergebnissen der NeRZ-Befragung aufsetzen.

Zum Thema Energiebedarf und CO₂-Footprint von Rechenzentren weltweit wurden in jüngerer Vergangenheit einige Publikationen veröffentlicht, deren Ergebnisse in AP 1 eingeflossen sind. Zu nennen sind insbesondere:

- Andrae, A. S. (2019). Prediction Studies of Electricity Use of Global Computing in 2030.
- Andrae, A. S. G. (2019a). Predictions on the way to 2030 of internet's electricity use. ResearchGate. Zugriff am 11.3.2019. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/331564853_Predictions_on_the_way_to_2030_of_internet's_electricity_use
- Andrae, A. S. G. (2019b). Projecting the chiaroscuro of the electricity use of communication and computing from 2018 to 2030.
- Belkhir, L. & Elmeligi, A. (2018). Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations. *Journal of Cleaner Production*, 177, 448–463.
- Malmodin, J. & Lundén, D. (2018). The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010–2015. *Sustainability*, 10(9), 3027.
- Shehabi, A., Smith, S. J., Masanet, E. & Koomey, J. G. (2018). Data center growth in the United States: decoupling the demand for services from electricity use. *Environmental Research Letters*, 13(12).
- The shift project. (2019). LEAN ICT- Towards digital sobriety. Zugriff am 18.4.2019. Verfügbar unter: <https://theshiftproject.org/en/article/lean-ict-our-new-report/>

4. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

- Gizli, Volkan; Faasch, H.; Marx Gómez, Jorge (2019a): Use Case based Efficiency Identification and Assessment of Data Centers by the Framework ProDC. CINDUS, Cayos de Villa Clara.
- Gizli, Volkan; Marx Gómez, Jorge (2017): Nutzung individuell bestimmbarer KPIs im Incident Management. ERP Management.
- Gizli, Volkan; Marx Gómez, Jorge (2018a): Ein Framework für präferenzorientierte Handlungsempfehlungen zur Effizienzsteigerung von Rechenzentren. In: MKWI. Lüneburg.
- Gizli, Volkan; Marx Gómez, Jorge (2019): Präferenzorientierte Stärken- und Schwächenidentifizierung von Effizienzausprägungen in Rechenzentren. In: EnviroInfo.
- Gizli, Volkan; Marx Gómez, Jorge; and Faasch, H. (2018): Preference-oriented Optimization of Data Centers by the Framework ProDC. In: EnviroInfo. München.
- Gizli, Volkan; Marx Gómez, Jorge (2018b): A Framework for Optimizing Energy Efficiency in Data Centers. In: Benoît Otjacques, Patrik Hitzelberger, Stefan Naumann und Volker Wohlgemuth (Hg.): From Science to Society. Cham: Springer International Publishing (Progress in IS), S. 275–282.
- Gizli, Volkan; Marx Gómez, Jorge (2018c): A Framework for Optimizing Energy Efficiency in Data Centers. In: Benoît Otjacques, Patrik Hitzelberger, Stefan Naumann und Volker Wohlgemuth (Hg.): From Science to Society. Cham: Springer International Publishing (Progress in IS), S. 275–282.
- Gizli, Volkan; Marx Gómez, Jorge (2018d): A Framework to Optimize Energy Efficiency in Data Centers Based on Certified KPIs. In: Technologies 6 (3), S. 87. DOI: 10.3390/technologies6030087.
- Gizli, Volkan; Marx Gómez, Jorge (2018e): Ein Framework zur ganzheitlichen Steigerung der Energieeffizienz in Rechenzentren durch eine Konformitätsprüfung zertifizierter Kennzahlen. In: Hans-Knud Arndt, Jorge Marx Gómez, Volker Wohlgemuth, Stefanie Lehmann und Roksolana Pleshkanovska (Hg.): Nachhaltige Betriebliche Umweltinformationssysteme. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 3–8.
- Gizli, Volkan; Rösler, Ole-Christian; Marx Gómez, Jorge (2019b): Umsetzung eines Systems zur Darstellung und Steigerung der Energieeffizienz von Rechenzentren. In: Jorge Marx Gómez, Andreas Solsbach, Thomas Klenke und Volker Wohlgemuth (Hg.): Smart Cities/Smart Regions – Technische, wirtschaftliche und gesellschaftliche Innovationen. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 625–636.
- Gizli, Volkan; Rösler, Ole-Christian; Marx Gómez, Jorge (2019c): Umsetzung eines Systems zur Darstellung und Steigerung der Energieeffizienz von Rechenzentren. In: Jorge Marx Gómez, Andreas Solsbach, Thomas Klenke und Volker Wohlgemuth (Hg.): Smart Cities/Smart Regions – Technische, wirtschaftliche und gesellschaftliche Innovationen. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 625–636.
- Hintemann, R. (2016): Trotz verbesserter Energieeffizienz steigt der Energiebedarf der deutschen Rechenzentren im Jahr 2016. Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit. Berlin. Online

verfügbar unter www.borderstep.de/wp-content/uploads/2017/03/Borderstep_Rechenzentren_2016.pd.

Hintemann, R. (2017): Trotz verbesserter Energieeffizienz steigt der Energiebedarf der deutschen Rechenzentren im Jahr 2016. Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit. Berlin.

Hintemann, R. (2018a): Boom führt zu deutlich steigendem Energiebedarf der Rechenzentren in Deutschland im Jahr 2017. Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit. Berlin.

Hintemann, R. (2018b): Nachhaltige Rechenzentren: Viel mehr als nur Energieeffizienz (Professional Datacenter).

Hintemann, R. (2019): Energiebedarf der Rechenzentren in Deutschland steigt weiter an. Online verfügbar unter www.datacenter-insider.de/energiebedarf-der-rechenzentren-in-deutschland-steigt-weiter-an-a-886887, zuletzt geprüft am 29.04.2020.

Hintemann, R. (2020): Rechenzentren 2018. Effizienzgewinne reichen nicht aus: Energiebedarf der Rechenzentren steigt weiter deutlich an. : Borderstep Institut. Berlin. Online verfügbar unter www.borderstep.de/wp-content/uploads/2020/03/Borderstep-Rechenzentren-2018-20200324rev.pd, zuletzt geprüft am 29.04.2020.

Hintemann, R.; Hinterholzer, S. (2019): Energy Consumption of Data Centers Worldwide - How will the Internet become Green Gehalten auf der ICT4S, Lappeenranta, Finland. Online verfügbar unter http://ceur-ws.org/Vol-2382/ICT4S2019_paper_16.pdf.

Hintemann, Ralph; Hinterholzer, Simon (2018a): Innovation alliances for sustainable ICT - Good practices and success factors, using the example of initiatives to improve the energy efficiency of data centers. In: EasyChair (Hg.): 5th International Conference on Information and Communication Technology for Sustainability. ICT4S2018. 5th International Conference on Information and Communication Technology for Sustainability: EasyChair (EPIC Series in Computing), 125-112.

Hintemann, Ralph; Hinterholzer, Simon (2018b): Technology radars for energy-efficient data centers: A transdisciplinary approach to technology identification, analysis and evaluation. In: Sustainable Technologies. World Congress.

Koch, Björn; Peñaherrera, Fernando; Pehlken, Alexandra (2019): Criticality and LCA – Building comparison values to show the impact of criticality on LCA (Work in progress). In: European Center of Sustainable Development (Hg.): 7th International Conference on Sustainable Development, Bd. 2019. Rome, Italy.

Peñaherrera, Fernando (2019): Proposal of an architecture for automation of development of LCA models and calculation of impacts (Work in progress). In: Fraunhofer IBP (Hg.): Ökobilanzwerkstatt 2019. Stuttgart, Germany.

Peñaherrera, Fernando; Hobohm, Julia; Szczepaniak, Katharina (2019): Life Cycle Assessment of Energy and Material Demands in Professional Data Centers: Case Study of a Server. In: Liselotte Schebek, Christoph Herrmann und Felipe Cerdas (Hg.): Progress in Life Cycle Assessment, Bd. 21. Cham: Springer International Publishing (Sustainable Production, Life Cycle Engineering and Management), S. 79–88.

- Peñaherrera, Fernando; Pehlken, Alexandra (2019a): Evaluation of Material Consumption and Recycling Scenarios of Professional Data Center Components (Work in Progress). In: Poznan University of Technology (Hg.): 9th International Conference on Life Cycle Management. Poznan, Poland.
- Peñaherrera, Fernando; Pehlken, Alexandra (2019b): Evaluation of Resource Savings through Material Recovery of Professional Data Center Components (Work in Progress). In: *EnviroInfo*.
- Peñaherrera, Fernando; Szczepaniak, Katharina (2019): Development and Application of Metrics for Evaluation of Cumulative Energy Efficiency for IT Devices in Data Centers. In: Alexandra Pehlken, Matthias Kalverkamp und Rikka Wittstock (Hg.): *Cascade Use in Technologies 2018. Internationale Konferenz zur Kaskadennutzung und Kreislaufwirtschaft - Oldenburg 2018*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 142–153.
- Rapp, B.; Solsbach, A.; Gizli, V.; Janßen, C. (2017): Teaching ICT-based Sustainability Reporting by Using a Research-oriented Teaching Concept. *Dialogue on Sustainability and Environmental Management*. Accra.
- Szczepaniak, K. (2018): *Das Rohstoffpotenzial von Rechenzentren: Quantifizierung kritischer Rohstoffe im Rechenzentrumsinventar zur Ermittlung des Grauen-Energie-Verbrauchs*. Masterarbeit. Technische Universität Hamburg. Hamburg, Germany.
- Szczepaniak, K.; Hobohm, J. (2017): *Quantifizierung kritischer Rohstoffe in Rechenzentren als ressourcenrelevanter Bezug zur Grauen Energie*. Technische Universität Hamburg. Hamburg, Germany.