

Forschungsbericht BWPLUS

## **Nachhaltige Rechenzentren (EcoRZ)**

von

Peter Radgen, Dirk Turek  
Universität Stuttgart  
Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER)

Stefan Wesner, Florian Held  
Universität Ulm

Wolfram Mollenkopf, Muthalagappan Narayanan  
Hochschule für Technik Stuttgart (HFT)

Jann Binder, Dennis Huschenhöfer  
Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)

Holger Zultner, Michael Schumacher  
ICT Facilities GmbH

Jürgen Heinrich, Steffan Jahnke  
Komm.ONE

Jürgen Meissner, Inga Bause  
Ökocomedia GmbH

Förderkennzeichen: BWN17001  
Laufzeit: 01.04.2017 - 31.03.2020

Die Arbeiten des Baden-Württemberg-Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung (BWPLUS) werden mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert.

Juni 2020

## Kurzbeschreibung

Das in diesem Bericht beschriebene Forschungsvorhaben „Nachhaltige Rechenzentren“ untersucht die Potenziale für einen nachhaltigen Betrieb von Rechenzentren. Hierzu wird sowohl der allgemeine Bestand von Rechenzentren im Bundesland als auch eine Betrachtung der verfügbaren und eingesetzten Technologien in und um Rechenzentren vorgenommen. Es wird eine neue Bewertungsmethodik für die Leistung und den Standort von Rechenzentren entwickelt sowie in verschiedenen Szenarien mögliche Verbesserungsoptionen genauer untersucht. Verbesserungspotenziale werden in Handlungsempfehlungen und Best-Practices sowohl für den konkreten Betrieb als auch das allgemeine Management formuliert.

Die Analyse der Rechenzentrumslandschaft in Baden-Württemberg spiegelt das Gefälle in der Energieeffizienz von Rechenzentren abhängig von Ihrer Größe wieder, welches auch weltweit erkennbar ist. Große Rechenzentren werden tendenziell effizienter betrieben, die Nutzung von Abwärme ist jedoch in allen Größenklassen in Baden-Württemberg derzeit noch unzureichend. Die Nachhaltigkeit rückt für Rechenzentrumsbetreiber allgemein immer mehr in den Fokus was unter anderem an der wachsenden Konkurrenz innerhalb der Branche und schwierige Marktbedingungen in Deutschland liegt. Rechenzentren auf dem freien Markt setzen (primär durch den Preisdruck) Effizienzmaßnahmen schneller um als Rechenzentren der öffentlichen Hand.

Um die Nachhaltigkeit von Rechenzentren zu bestimmen wird ein Indikatorenset vorgestellt welches elf Kennzahlen bestimmt und für eine Selbsteinschätzung verwendet werden kann. Dadurch kann eine Verbesserung der Nachhaltigkeit im Rechenzentrum quantifiziert werden.

Die Untersuchung der Standortnachhaltigkeit wird anhand von relevanten Parametern wie dem Strompreis und der Personalverfügbarkeit durchgeführt und ergibt in der Gesamtbetrachtung vor allem für die Städte Mannheim, Karlsruhe und das Umland von Stuttgart gute Bewertungen. Die höchste Einzelbewertung erhält die Gemeinde Wangen im Landkreis Göppingen. Wird nur die ökologische Nachhaltigkeit betrachtet erzielen die Kreise Ravensburg, Sigmaringen Zollernalbkreis und der Südliche Schwarzwald die höchste Gesamtbewertung als Rechenzentrumsstandort.

Mit dem Ziel den Einfluss verschiedener Technologien und Betriebsweisen auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz von Rechenzentren zu bestimmen, betrachtet die Studie insbesondere verschiedene Formen der Kühlung und Abwärmenutzung. Um Strombedarf für Kompressionskühlung zu vermeiden, ist ein hoher Anteil an freier Kühlung entscheidend, wofür die IT-Komponenten für hohe Einlasstemperaturen der Kühlluft spezifiziert sein müssen. Eine entgegengesetzte Optimierung ist, auf freie Kühlung zu verzichten und stattdessen durch gezielte Abwärmenutzung in einem Wärmenetz eine CO<sub>2</sub> Gutschrift zu erreichen. Hierzu ergibt sich zwar ein zusätzlicher Strombedarf für den Betrieb einer Wärmepumpe, um Temperaturniveaus anzugleichen. Es wird jedoch gezeigt, dass die Nutzung der Abwärme zunehmend wirksamer wird für eine positive CO<sub>2</sub>-Bilanz des Rechenzentrums, da der Strommix schon heute einen hohen Anteil an erneuerbaren Energien besitzt und dieser Anteil weiter ansteigen wird. Die Wirtschaftlichkeit solcher Lösungen ist jedoch stark von der Entgeltsstruktur für Strom, Brennstoffe und CO<sub>2</sub>-Ausstoß abhängig. Mit dem Einsatz eines lokalen Blockheizkraftwerks zur zeitweisen Stromerzeugung kann ein Rechenzentrum einen Beitrag zur Flexibilisierung der Energiesystems liefern. Blockheizkraftwerk und Wärmepumpe sind jedoch Zusatzinvestitionen und müssen durch entsprechende Regulierung oder Anreize einem Rechenzentrumsbetreiber nahegelegt werden.

In einem Praxistransfer wird die Bewertungsmethodik für Standorte auf elf konkrete Fälle angewandt. Als erkennbares Muster zeigt sich, dass ökologische Faktoren gegenüber ökonomischen und sozialen Faktoren momentan eine untergeordnete Rolle zu spielen scheinen. Des Weiteren wurde ein Software-Werkzeug entwickelt, das einem Entwickler die Möglichkeit eröffnet ein ausbalanciertes Energie-Performanz Verhältnis für eine typische Web-Anwendung zu finden. Die Software und der Quelltext sind frei verfügbar und sollen in der Zukunft weiterentwickelt werden.

## Abstract

The research project "Sustainable Data Centres" investigates the potentials for data centres that enable a sustainable operation. For this purpose, both the general landscape of data centres in the federal state of Baden-Württemberg and the available and applied technologies in and around data centres are analysed. A new evaluation methodology for the performance and location of data centres is developed and possible improvement options in various scenarios are examined in more detail. Improvement potentials are formulated in recommendations for action and best practices for both specific operations and general management.

The analysis of the data center landscape in Baden-Württemberg reflects the difference in the energy efficiency of data centers depending on their size, which is also visible worldwide. Large data centers tend to be operated more efficiently, but the use of waste heat is currently still insufficient in all size classes in Baden-Württemberg. Sustainability is becoming more and more important for data center operators in general due to the growing competition within the industry and difficult market conditions in Germany. Data centers on the free market implement efficiency measures faster than public sector data centers (primarily due to price pressure).

In order to determine the sustainability of data centers, a set of indicators is presented which determines 11 key figures and can be used for self-benchmarking. It allows to quantify the improvement of sustainability. The investigation of location sustainability is carried out using location indicators and resulted in good overall ratings for Baden-Württemberg, especially for the cities of Mannheim, Karlsruhe and the surrounding area of Stuttgart. The municipality of Wangen in the district of Göppingen received the highest individual rating. If only ecological sustainability is considered, the districts of Ravensburg, Sigmaringen Zollernalbkreis and the Southern Black Forest received the highest overall rating.

With the aim of determining the influence of different technologies and operating modes on the CO<sub>2</sub> balance of data centers, the study looks in particular at different forms of cooling and waste heat utilization. In order to avoid power consumption for compression cooling, a high proportion of free cooling is crucial, for which the IT components must be specified for high inlet temperatures of the cooling air. The opposite optimization is to dispense with free cooling and instead achieve a CO<sub>2</sub> credit through targeted waste heat utilization in a heating network. This does indeed result in additional power requirements for the operation of a heat pump in order to equalise temperature levels. However, it is shown that the use of waste heat is becoming increasingly effective for a positive CO<sub>2</sub> balance of the data centre, as the electricity mix already has a high proportion of renewable energies and this proportion will continue to increase. However, the cost-effectiveness of such solutions is heavily dependent on the fee structure for electricity, fuels and CO<sub>2</sub> emissions. By using a local combined heat and power unit for temporary power generation, the data center can finally contribute to making the energy system more flexible. However, the combined heat and power unit and heat pump are additional investments and must be targeted to a data center operator by appropriate regulation or incentives.

In a practical transfer, the evaluation methodology for sites is applied to 11 specific cases. As a recognizable pattern, it is found that ecological factors currently seem to play a subordinate role compared to economic and social factors. Furthermore, a software tool is developed that enables a developer to find a balanced energy-performance ratio for a typical web application. The software and source code are freely available and will be further developed in the future.

## Danksagung

Zur Begleitung des Forschungsvorhabens wurde durch das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft ein Projektbeirat eingerichtet. Das Forschungskonsortium bedankt sich für die konstruktiven Beiträge und die hilfreichen Diskussionen im Projektbeirat. Die Mitglieder des Projektbeirates waren:

- Dr. Norbert Conrad (HLRS, Universität Stuttgart)
- Mark Dörbeck (bwcon, Stuttgart)
- Dr. Ralph Hintemann (Borderstep, Berlin)
- Dr. Jürgen Jähnert (bwcon, Stuttgart)
- Dr. Frank Kleiner (FZI, Karlsruhe)
- Dr. Detlef Labrenz (LRZ, München)
- Benjamin Sommer (VKU, Berlin)
- Jan Wiesenberger (FZI, Karlsruhe)
- Prof. Dr. Christoph Wittwer (Fraunhofer ISE, Freiburg)
- Dr. Jan Tomaschek (UMBW, Stuttgart)
- Dr. Ulrike Kugler (UMBW, Stuttgart)
- Lisa Rauscher (UMBW, Stuttgart)
- Harald Höflich (UMBW, Stuttgart)

Des Weiteren bedankt sich das Konsortium bei,

- Den Rechenzentrumsbetreibern die an der Umfrage teilgenommen haben
- Den Behörden und Unternehmen die bei der Datensammlung unterstützt haben

Das Projektvorhaben Nachhaltige Rechenzentren (EcoRZ) wurde vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg im Förderprogramm „Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherheit“ (BWPLUS) beim Projektträger Karlsruhe (Förderkennzeichen BWN17001) gefördert. Das Projektkonsortium bedankt sich für die Bereitstellung der Fördermittel.

## Federführende Partner

Die Bearbeitung des Verbundprojektes erfolgte kooperativ zwischen allen Partnern. Die federführende Bearbeitung der verschiedenen Abschnitte wurde von den im Folgenden genannten Partnern durchgeführt.

Kapitel	Federführender Partner
Kapitel 1	IER, Universität Stuttgart
Kapitel 2	Universität Ulm
Kapitel 3	IER, Universität Stuttgart
Kapitel 4	Hochschule für Technik
Kapitel 5	Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg
Kapitel 6	Universität Ulm
Kapitel 7	IER, Universität Stuttgart

## Inhaltsverzeichnis

Kurzbeschreibung.....	1
Abstract .....	2
Danksagung .....	3
Abbildungsverzeichnis.....	8
Formelverzeichnis .....	11
Abkürzungsverzeichnis .....	13
1. Einleitung.....	15
1.1 Begriffsdefinitionen .....	15
1.2 Hintergrund des Projektes.....	16
1.3 Wirtschaftliche und klimatische Relevanz des Projektes .....	16
1.4 Zielsetzung und Aufgabe des Projektes.....	16
1.5 Methodik .....	17
2. Analyse der momentanen und zukünftigen RZ-Landschaft in Baden-Württemberg.....	18
2.1 Bestandsaufnahme der RZ-Infrastruktur.....	18
2.1.1 Datenerhebung.....	18
2.1.2 Verteilung der PUE (Power Usage Effectiveness).....	20
2.1.3 Nutzung von Strom aus erneuerbaren Quellen in industriellen Rechenzentren.....	21
2.1.4 Einsatz von Rack-Einhausungen .....	22
2.1.5 Nutzung freier Kühlung .....	23
2.1.6 Anteil an festangestelltem Personal.....	24
2.1.7 Vorhandensein einer redundanten Stromanbindung .....	25
2.1.8 Verteilung der zertifizierten Verfügbarkeitsklassen.....	26
2.1.9 Betrieb einer Netzersatzanlage (NEA).....	27
2.1.10 Allgemein erkennbare Muster .....	28
2.1.11 Diskussion der Ergebnisse .....	28
2.2 Kategorisierung und Mengengerüst der RZ-Landschaft.....	28
2.2.1 Methodik .....	29
2.2.2 Resultate und Verteilung.....	30
2.2.3 Diskussion der Ergebnisse .....	31
2.3 Szenarien zur Entwicklung der Rechenzentrumslandschaft in Baden-Württemberg.....	32
2.3.1 Steigerung der Leistungsdichten in den Serverräumen .....	33
2.3.2 Zentralisierung und Konsolidierung hin zu großen Rechenzentrumsstrukturen .....	35
2.3.3 Aufkommen dezentral verteilter Kleinstrechenzentren .....	35
3. Bewertungsinstrumentarium zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von Rechenzentren und Rechenzentrumsstandorten.....	45
3.1 Kennzahlen zur Nachhaltigkeit – Stand der Wissenschaft .....	46
3.2 Zertifizierungen und Normungsvorhaben zu Leistungskennzahlen.....	46

3.3	Methodik des Bewertungsinstrumentariums .....	47
3.4	Leistungsindikatoren für Rechenzentren .....	48
3.4.1	Ökonomische Leistungsbewertung .....	48
3.4.2	Ökologische Leistungsbewertung.....	49
3.4.3	Soziale Leistungsbewertung .....	51
3.5	Zusammenfassung des Ökonomisches Indikatorenset .....	53
3.5.1	IT-Auslastung (ITEU) .....	53
3.5.2	Infrastruktur (PUE) .....	54
3.5.3	DCIM .....	55
3.5.4	Gewichtung und aggregierter Indikator .....	55
3.6	Zusammenfassung des Ökologisches Indikatorenset.....	56
3.6.1	Abwärmennutzung (ERF).....	56
3.6.2	Erneuerbare Energie (REF) .....	58
3.6.3	Hardwarerecycling (MRR).....	59
3.6.4	Gewichtung und aggregierter Indikator .....	60
3.7	Zusammenfassung des Soziales Indikatorenset .....	61
3.7.1	Weiterbildung (FER) .....	61
3.7.2	Ausbildung (AA) .....	62
3.7.3	Mitarbeiterzufriedenheit (SM) .....	63
3.7.4	Sozialstandards der Hersteller.....	64
3.7.5	Konfliktfreiheit der Rohstoffe.....	65
3.7.6	Gewichtung und aggregierter Indikator .....	65
3.8	Ergebnisse der Leistungsbewertung von Rechenzentren .....	66
3.9	Standortindikatoren für Rechenzentren .....	66
3.10	Überblick der Literatur zu Standortfaktoren.....	66
3.11	Standortkriterien für Rechenzentren in Baden-Württemberg.....	67
3.12	Datenerhebung, Bewertung & Auswertung.....	67
3.12.1	Datenerhebung & Bewertung .....	67
3.12.2	Gewichtung .....	75
3.12.3	Ergebnisse der Auswertung.....	75
4.	Bestandsaufnahme der Technologien.....	79
4.1	RZ-Infrastruktur .....	80
4.1.1	Kälteinfrastruktur .....	80
4.1.2	Strominfrastruktur.....	88
4.1.3	IT Infrastruktur .....	91
4.2	Nachhaltige Energieversorgung .....	98
4.2.1	Energiebereitstellung vor Ort.....	99
4.2.2	Externe Energieversorgung .....	105

4.2.3	Zusammenfassung – Energie Technologie .....	114
4.3	Abwärmenutzung .....	115
4.4	Ergebnisse: Ausgewählte Szenarien für Simulationsstudie.....	121
5.	Technische Simulation und Bewertung der Ergebnisse .....	124
5.1	Auswahl der Simulationen.....	124
5.2	Eingangsdaten der Simulationen.....	125
5.2.1	Wetter .....	125
5.2.2	IT Lastprofil .....	126
5.2.3	System .....	126
5.2.4	PV und Wind PPA.....	128
5.3	Potentialanalysen IT .....	129
5.4	Simulation der Szenarien.....	131
5.4.1	Ergebnisse Referenz RZ: Trockenfreikühler mit Kompressionskältemaschine .....	131
5.4.2	Szenario 1 – PPA plus Abwärmenutzung mittels externem Abnehmer .....	133
5.4.3	Szenario 2 – Bio-Erdgas BHKW mit Absorptionskältemaschine .....	136
5.4.4	Szenario 3 – Wärmeauskopplung mittels Wärmepumpe .....	142
5.4.5	Szenario 4 - Kühlung durch Geothermie .....	144
5.5	Zusammenfassende Erkenntnisse aus den technischen Simulationen.....	147
5.6	Weiterführende Untersuchung der Szenarien mit Fokus minimaler CO <sub>2</sub> -Emissionen .....	149
5.6.1	Effiziente Versorgungstechnik.....	150
5.6.2	Abwärmenutzung – mit Wärmepumpe und optionalen BHKW.....	150
5.7	Wirtschaftliche Analyse der Wärmepumpe .....	153
5.8	Kosten der CO <sub>2</sub> -Vermeidung.....	156
6.	Praxistransfer .....	158
6.1	Analyse von Infrastrukturdaten .....	159
6.1.1	Niedrige Einlasstemperaturen.....	160
6.1.2	Niedriger Automatisierungsgrad beim Software-Deployment .....	161
6.1.3	Niedrige CPU-Auslastungen.....	162
6.2	Anwendung des Standort Bewertungsinstrumentarium auf ausgewählte Fälle .....	162
6.2.1	Resultate.....	162
6.2.2	Evaluation der Resultate .....	163
6.3	Hemmnisse und nachhaltige Optimierungspotenziale im Rechenzentrumsbetrieb .....	164
6.3.1	Hemmnisse und nachhaltige Optimierungspotenziale im IT-Bereich .....	165
6.3.2	Hemmnisse und nachhaltige Optimierungspotenziale im Infrastrukturbereich.....	171
6.4	Gegenüberstellung verschiedener Rechenzentren .....	173
6.4.1	Bestandsrechenzentrum .....	174
6.4.2	Referenz-Rechenzentrum.....	174
6.4.3	Optimiertes Rechenzentrum .....	175

6.5	Werkzeug zur Messung der Leistungsaufnahme eines bestehenden Web-Setups .....	176
6.5.1	Beispielhafter Test-Lauf.....	178
6.5.2	Lizenz und Code-Veröffentlichung .....	181
6.6	Zusammenfassung.....	181
7.	Beispiel-Projekte, Erfolgsfaktoren und Handlungsempfehlungen .....	182
7.1	Beispiel-Projekte.....	182
7.2	Erfolgsfaktoren .....	183
7.3	Handlungsempfehlungen .....	183
7.3.1	Handlungsempfehlungen für Rechenzentrumsplaner .....	184
7.3.2	Handlungsempfehlungen für Rechenzentrumsbetreiber .....	184
7.3.3	Handlungsempfehlungen für Politische Entscheider .....	186
7.4	Leitfaden für Rechenzentrumsbetreiber.....	187
7.5	Website des Projekts.....	187
	Literaturverzeichnis.....	188
	Anhang .....	207
A.	Anhang A: Auswertung des Fragebogens und externer Daten .....	207
B.	Anhang B: Lastabhängige Leistungsaufnahme verschiedener Servermodelle .....	218
C.	Anhang C: Verzeichnis der Leistungsindikatoren / Kennzahlen .....	220
D.	Anhang D: Nicht berücksichtigte Aspekte der Indikatoren .....	223
E.	Anhang E: Liste der Gemeinden mit der höchsten Gesamtbewertung.....	230

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Arbeitspaketstruktur der Projektes .....	17
Abbildung 2: Untersuchte Rechenzentrums Standorte in BW .....	19
Abbildung 3: Verteilung der PUE .....	20
Abbildung 4: Vollständige Verwendung grünen Stroms in industriellen Rechenzentren .....	21
Abbildung 5: Einhausung von Racks (Rackkühlkonzepte ausgeschlossen) .....	22
Abbildung 6: Nutzung freier Kühlung .....	23
Abbildung 7: Prozentualer Anteil an festangestellten Mitarbeitern .....	24
Abbildung 8: Nutzung einer redundanten Stromanbindung .....	25
Abbildung 9: Verteilung der zertifizierten Verfügbarkeitsklassen im industriellen Umfeld .....	26
Abbildung 10: Betrieb einer Netzersatzanlage .....	27
Abbildung 11: $\emptyset$ -Leistungsaufnahme pro Rack .....	33
Abbildung 12: Visualisierung der Stufenbewertung (ITEU) .....	54
Abbildung 13: Visualisierung der Stufenbewertung (PUE) .....	55
Abbildung 14: Box-Plot der Gewichtung ökonomischen Indikatoren (DCIM, ITEU und PUE) .....	56
Abbildung 15: Beispielhafte Auswertung der ökonomischen Nachhaltigkeit .....	56
Abbildung 16: Visualisierung der Stufenbewertung (ERF) .....	58
Abbildung 17: Visualisierung der Stufenbewertung (REF) .....	59
Abbildung 18: Visualisierung der Stufenbewertung (MRR) .....	60
Abbildung 19: Box-Plot der Gewichtung ökologischer Indikatoren .....	60
Abbildung 20: Beispielhafte Auswertung der ökologischen Nachhaltigkeit .....	61
Abbildung 21: Visualisierung der Stufenbewertung (FER) .....	62
Abbildung 22: Visualisierung der Stufenbewertung (AA) .....	63
Abbildung 23: Visualisierung der Stufenbewertung (SM) .....	64
Abbildung 24: Box-Plot der Gewichtung sozialen Indikatoren .....	65
Abbildung 25: Beispielhafte Auswertung der sozialen Nachhaltigkeit .....	66
Abbildung 26: Berücksichtigte Standortkriterien .....	67
Abbildung 27: Falschfarbendarstellung des Strompreisratings [Quadratkilometerebene] .....	68
Abbildung 28: Falschfarbendarstellung des Breitbandratings [Quadratkilometerebene] .....	69
Abbildung 29: Falschfarbendarstellung des Steuerratings [Gemeindeebene] .....	70
Abbildung 30: Falschfarbendarstellung des Temperaturratings [Quadratkilometerebene] .....	71
Abbildung 31: Falschfarbendarstellung des Wärmeabnehmerratings [Quadratkilometerebene] .....	72
Abbildung 32: Links (im UZS): Hydrogeologische Grundwasserergiebigkeit, Flüsse und Grundwasserschutzgebiete; Rechts: Falschfarbendarstellung des Wärmesenkenratings [Quadratkilometerebene] .....	73
Abbildung 33: Falschfarbendarstellung des Fachpersonalratings [Kreisebene] .....	73
Abbildung 34: Links: Straßennetz (rot), Bahnlinien (grün) und Haltestellen (blau); Rechts: Falschfarbendarstellung des Verkehrsanbindungsratings [Quadratkilometerebene] .....	74
Abbildung 35: Falschfarbendarstellung des Kundennäheratings [Gemeindeebene] .....	75
Abbildung 36: Gewichtung der Standortindikatoren für die drei Säulen der Nachhaltigkeit .....	75
Abbildung 37: Falschfarbendarstellung des Absoluten Ökonomischen Ratings im Quadratkilometerraster (links) und des relativen Ökonomischen Ratings auf Gemeindeebene (rechts) .....	76
Abbildung 38: Falschfarbendarstellung des Absoluten Ökologischen Ratings im Quadratkilometerraster (links) und des relativen Ökologischen Ratings auf Gemeindeebene (rechts) .....	77
Abbildung 39: Falschfarbendarstellung des Absoluten Sozialen Ratings im Quadratkilometerraster (links) und des relativen Sozialen Ratings auf Gemeindeebene (rechts) .....	77
Abbildung 40: Falschfarbendarstellung des Absoluten Gesamt Ratings im Quadratkilometerraster (links) und des relativen Gesamt Ratings auf Gemeindeebene (rechts) .....	78

Abbildung 41: Einzelne Bereiche der Rechenzentrum-Infrastruktur und mögliche Maßnahmen zur Effizienzsteigerung.....	79
Abbildung 42: Unterschiedliche Ansätze zur Kühlungsoptimierung bei Rechenzentren.....	81
Abbildung 43: Zusammenfassung verschiedener Konfigurationen für die RZ Kühlung.....	82
Abbildung 44: Versorgungsoptionen für Server und andere IT-Infrastruktur in Rechenzentren .....	88
Abbildung 45: Prinzipdarstellung Doppelwandler-USV.....	89
Abbildung 46: Überblick über die Integrationsmöglichkeiten erneuerbarer Energien bei Rechenzentren .....	99
Abbildung 47: Überblick über die verschiedenen Möglichkeiten der natürlichen Kälteerzeugung ...	100
Abbildung 48: Übersicht der verschiedenen gebräuchlichen Kälteerzeugungsverfahren.....	102
Abbildung 49: Übersicht über die verschiedenen Stromerzeugungsverfahren.....	104
Abbildung 50: Überblick über die verschiedenen Möglichkeiten zur Flexibilisierung in Rechenzentrum.....	109
Abbildung 51: Schematische Darstellung eines PPA nach (Guttek).....	112
Abbildung 52: Grünstrom Marktmodell im Rahmen des EEG 2014 Gesetzes mit EE Direktvermarktung (Meunier 2014).....	113
Abbildung 53: Typische Temperaturen verschiedener Komponenten und Prozesse in Rechenzentren (Davies et al. 2016) .....	116
Abbildung 54: Klassifikation von Rechenzentren nach RenewIT (van der Ha und Nagtegaal 2014). .	117
Abbildung 55: SWOT Analyse von Abwärmenutzung aus RZ-Betreibersicht.....	118
Abbildung 56: Überblick über Abwärmenutzungsmöglichkeiten bei RZ .....	120
Abbildung 57: Überblick über Abwärmenutzungsmöglichkeiten mit verschiedenen Kühlmedien und Temperaturen .....	120
Abbildung 58: Energie System Szenarien für Simulationsstudie in AP4 .....	122
Abbildung 59: Histogramm der Außenlufttemperatur (trocken) - Stuttgart entsprechend Daten von Meteonorm.....	125
Abbildung 60: IT Leistungsprofil des BW-Cloud-RZ an der Universität Ulm (von 23 kW auf 200kW hochgerechnet).....	126
Abbildung 61: IT Leistungsprofil einer Woche eines RZ aus Baden-Württemberg (max. IT-Leistung von 200 kW).....	126
Abbildung 62: Erzeugungsprofile der simulierten PPA-Anlagen (jeweils 500 kW <sub>p</sub> ).....	129
Abbildung 63: Monatlicher Beitrag von Wind- und Sonnenenergie als direkte und indirekte PPA zur Deckung des RZ-Strombedarfs (jeweils 500 kW <sub>p</sub> ) .....	129
Abbildung 64: Übertragungstest innerhalb des BelWü-Netzwerks von Ulm nach Freiburg (orange markiert) .....	130
Abbildung 65: Energieflussschema des Referenz RZ Szenarios .....	131
Abbildung 66: Anteil thermischer Energie und Betriebsstunden pro Jahr im jeweiligen Betriebsmodus im Referenz RZ.....	132
Abbildung 67: Betriebsstunden pro Monat je Betriebsmodus der Kälteerzeugung in Referenz RZ...	132
Abbildung 68: Jährlicher Strombedarf des Referenzrechenzentrum aufgeteilt nach Anlagenart.....	133
Abbildung 69: Szenario 1 Energieflussschema .....	134
Abbildung 70: Jährlicher Gesamtwärmebedarf des Schwimmbads und die vom RZ gelieferte Wärme .....	135
Abbildung 71: Thermische Energiemenge und Betriebsstunden pro Jahr der jeweiligen Kühlbetriebsmodi in Szenario 1 .....	135
Abbildung 72: Jährlicher Gesamtstromverbrauch in Szenario 1.....	136
Abbildung 73: Energieflussschema des Szenario 2 .....	137
Abbildung 74: Aufteilung nach Typgebäude im Quartier Stöckach (Wärmenetz nach (Hochschule für Technik Stuttgart 2018) simuliert).....	138
Abbildung 75: Wärmeverbrauch in dem simulierten Wärmenetz des Quartiers Stöckach.....	138
Abbildung 76: Energiemenge und Stundenzahl pro Jahr in jeweilige Betriebsmodus in Szenario 2a	139

Abbildung 77: Jährliche Stromverbrauch der einzelnen Bereich des Rechenzentrums in Szenario 2a .....	139
Abbildung 78: Blockdiagramm von Szenario 2b (Wassergekühlte Servern) mit Komplexität in Realisierung von der Simulation .....	141
Abbildung 79: Szenario 3 Energieflussschema .....	142
Abbildung 80: Jährlicher Stromverbrauch des RZ in Szenario 3.....	143
Abbildung 81: Szenario 4 Energieflussschema .....	145
Abbildung 82: Konfiguration der Agrarfläche zur oberflächennähen Geothermie in Wüstenrot Quartier (Gemeinde Wüstenrot 2020).....	145
Abbildung 83: Thermische-Energiemenge und Stundenzahl pro Jahr in jeweilige Betriebsmodus in Szenario 4.....	146
Abbildung 84: Stunden pro Monat in je Betriebsmodus der Kälteerzeugung in Szenario 4.....	146
Abbildung 85: Jährlicher Stromverbrauch in RZ in Szenario 4 .....	147
Abbildung 86: Gegenüberstellung der ermittelten Kennzahlen der verschiedenen Szenarien.....	149
Abbildung 87: Einsatz von effizienten Versorgungstechnologien in Rechenzentren (rechts) gegenüber ineffizienten (links) .....	150
Abbildung 88: Ergebnisse der Simulationen zur Verbesserung der Versorgungstechniken bzgl. Strombedarf (links) und der CO <sub>2</sub> -Emissionen (rechts) .....	150
Abbildung 89: RZ-Abwärmenutzung mittels Wärmepumpe.....	151
Abbildung 90: Stromversorgung des RZ durch BHKW sowie RZ-Abwärmenutzung mittels Wärmepumpe .....	151
Abbildung 91: Jährliche CO <sub>2</sub> -Emissionen der untersuchten Simulationen .....	152
Abbildung 92: Vergleich CO <sub>2</sub> -Emissionen bei heutigem gegenüber zukünftigen Strommix (474 g/kWh vs. 300 g/kWh) .....	152
Abbildung 93: Vergleich KKM+fK Kühlung mit WP Kühlung.....	154
Abbildung 94: Vergleich der Einsparungen für verschiedene Vergütungsmodelle des Szenario 3 (WP Kühlung) gegenüber dem Referenz RZ (KKM+fK). .....	157
Abbildung 95: Vorlauftemperatur bei rea door cooling.....	161
Abbildung 96: El. Leistung und Performanz-Leistungs-Verhältnis bezogen auf die Last eines Server Modells nach (SPEC 2019) .....	168
Abbildung 97: Aufbau der Software-Architektur und des Test Setups .....	178
Abbildung 98: Visualisierte Performanz Resultate des Testlaufs.....	180
Abbildung 99: El. Leistungsaufnahme einer CPU .....	181

## Formelverzeichnis

Formel 1: Durchschnittliche el. Leistungsaufnahme pro Server .....	29
Formel 2: Anschlussleistung als Grundlage für Definition der Kategorien .....	30
Formel 3: Äquivalenzrelation zwischen benachbarten Kategorien .....	30
Formel 4: Gesamte in RZ in Baden-Württemberg verbrauchte Energie, Prognose für 2025 .....	36
Formel 5: Edge-RZ Dichte entlang Autobahnen .....	36
Formel 6: Gesamtlänge der Autobahnen in Baden-Württemberg .....	37
Formel 7: Abschätzung des Abstands zw. 5G Masten.....	37
Formel 8: Geschätzter Energieaufwand pro Liter Heizöl .....	37
Formel 9: Geschätzter Heizölverbrauch pro Haushalt .....	37
Formel 10: Durchschn. el. Leistungsaufnahme eines Edge-RZ im "Autonomen Fahren" Bereich .....	37
Formel 11: Durchschn. el. Leistungsaufnahme eines Edge-RZ im "Smart City" Bereich.....	38
Formel 12: Durchschn. Laufleistung eines ePkw in Deutschland .....	38
Formel 13: Durchschn. Energieverbrauch eines ePkw in Deutschland.....	38
Formel 14: Anzahl zugelassener ePkw in Baden-Württemberg, Stand 01.01.2020 .....	38
Formel 15: Edge-RZ Dichte an Autobahnen in Baden-Württemberg.....	38
Formel 16: Gesamte Energieaufnahme in den Edge-RZ .....	39
Formel 17: Gesamte Energieaufnahme in den Edge-RZ an Autobahnen.....	39
Formel 18: Gesamte Energieaufnahme in den Edge-RZ in den Städten .....	39
Formel 19: Prozentuale Gesamtenergieaufnahme in den Edge-RZ .....	39
Formel 20: Anzahl installierter 5G Masten .....	40
Formel 21: Potenziell mit Abwärme versorgte Wohnungen.....	40
Formel 22: Berechnung der äquivalenten ePkw Anzahl .....	40
Formel 23: Berechnung der ITEU zum Messzeitpunkt .....	53
Formel 24: Stufenformel der ITEU .....	53
Formel 25: Berechnung des PUE .....	54
Formel 26: Stufenformel der PUE .....	54
Formel 27: Stufenformel des DCIM.....	55
Formel 28: Berechnung des ERF.....	57
Formel 29: Stufenformel des ERF.....	57
Formel 30: Berechnung des REF.....	58
Formel 31: Stufenformel des REF.....	58
Formel 32: Berechnung der FER.....	61
Formel 33: Stufenformel der FER.....	62
Formel 34: Berechnung der AA .....	62
Formel 35: Stufenformel der AA .....	63
Formel 36: Berechnung der SM .....	63
Formel 37: Stufenformel der SM.....	64
Formel 38: Berechnung der Einhaltung von Sozialstandards.....	64
Formel 39: Allgemeine Formel zur Berechnung des Leistungsfaktors (nach (Müller 2008; Chwieduk 2016; Zetzsche 2012) .....	131
Formel 40: Berechnung des Leistungsfaktors für das Referenzrechenzentrum .....	133
Formel 41: Berechnung des Leistungsfaktors für das Szenario 1.....	136
Formel 42: Berechnung des Leistungsfaktors für das Szenario 2.....	140
Formel 43: Berechnung des Leistungsfaktors für das Szenario 3.....	143
Formel 44: Berechnung des Leistungsfaktors Jahresarbeitszahl für das Szenario 4.....	147
Formel 45: Berechnung der CO <sub>2</sub> -Vermeidungskosten in €/t <sub>CO2</sub> .....	158
Formel 46: Definition des Energy-Delay-Products .....	164
Formel 47: Vergleich variabler Serverenergieverbräuche für verschiedene Lasten.....	167
Formel 48: Vergleich des relativen Anteils der Grundlast am Gesamtenergieverbrauch eines Servers für verschiedene Lasten.....	167

Formel 49: Zielgröße zur Konfiguration des optimierten RZ.....	173
Formel 50: Berechnung des APDEX.....	180

## Abkürzungsverzeichnis

5G	5th Generation (mobile radio)
AA	Apprenticeship Availability
APDEX	Application Performance Index
AWGN	Amtliches Digitales Wasserwirtschaftliches Gewässernetz
BHKW	Blockheizkraftwerk
BImSch	Bundes-Immissionsschutz
BITKOM	Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien
BNetA	Bundesnetzagentur
BSI	Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik
BWCloud	Baden-Württemberg Cloud
BWIHK	Baden-Württembergischer Industrie- und Handelskammertag
CDC	Climate Data Center
CFSP	Conflict-Free Smelter Programm
COP	Coefficient of Performance
CPU	Central Processing Unit
CRAH	Computer Room Air Handler
DCIM	Data Center Infrastructure Management
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
DSGVO	Datenschutzgrundverordnung
DWD	Deutscher Wetterdienst
EDV	Elektronische Daten Verarbeitung
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
EER	Energy Efficiency Ratio
ERE	Energy Reuse Efficiency
ERF	Energy Reuse Factor
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe
FER	Further Education Ratio
ffK	feuchte freie Kühlung
fK	freie Kühlung
FKW	Fluorkohlenwasserstoffe
GIPC	Green IT Promotion Council
GO	Guarantee of Origin
GPU	Graphics Processing Unit
GWP	Global Warming Potential
HFKW	teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe
HPC	High-Performance Computing
http	hypertext transfer protocol
IIoT	Industrial Internet of Things
IP	Internet Protocol
IT	Informationstechnologie
ITEE	IT Equipment Efficiency
ITEU	IT Equipment Utilization
JAZ	Jahresarbeitszahl

KKM	Kompressionskältemaschine
LCA	Life Cycle Assessment
M&E	Machinery and Equipment
MIMO	Multiple-Input-Multiple-Output
NEA	Netzersatzanlage
ODP	Ozon Depletion Potential
OSM	Open Street Map
PDU	Power Distribution Unit (Stromverteilung)
PPA	Power Purchase Agreement
PUE	Power Usage Effectiveness
PV	Photovoltaik
RAM	Random access memory
REF	Renewable Energy Factor
REST	Representational State Transfer
RL	Rücklauf
RZ	Rechenzentrum
SLA	Service Level Agreement
SM	Staff Moral
TCO	Total Cost of Ownership
TEWI	Total Equivalent Warming Impact
tFK	trockene freie Kühlung
TGG	The Green Grid
THG	Treibhausgas
TRNSYS	Transient Systems Simulation
TWW	Trinkwarmwasser
USGBC	U.S. Green Building Council
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
UUID	Universally unique identifier
UZS	Uhrzeigersinn
VL	Vorlauf
VR	Virtual Reality
WAN	Wide Area Network
W-Netz	Wärmenetz
WP	Wärmepumpe

## 1. Einleitung

### 1.1 Begriffsdefinitionen

Um die im Bericht verwendeten Begriffe eindeutig verwenden zu können, werden zunächst die wesentlichen Begriffe definiert. Begriffe die nur für einzelne Kapitel relevant sind, werden in diesen separat definiert.

Der Begriff **Rechenzentrum** war, basierend auf einer Definition aus den 1990er Jahren an eine bestimmte Größe eines Gebäudes bzw. einer Räumlichkeit zur Erbringung/Unterbringung von zentraler Rechentechnik gebunden. Es wurde eine Abgrenzung zwischen einem Serverraum und einem Rechenzentrum getroffen. Diese alte Definition stößt angesichts der sich konstant ändernden IT-Landschaft an die Grenzen seiner Anwendbarkeit. Seit Einführung der DIN EN 50600 wird der Begriff Rechenzentrum weiter gefasst und bewusst an Funktionalitäten statt an der Ausführungsform oder Größe ausgerichtet. Im Rahmen dieser Arbeit werden Räumlichkeiten jeder Größe zur Unterbringung von zentraler Rechen- Netzwerk- oder Speichertechnik als Rechenzentrum betrachtet. Dies schließt Serverräume ebenfalls mit ein.

Der Begriff **Nachhaltigkeit** wurde bereits 1713 als der „*verantwortungsbewussten Umgang mit einer Ressource*“ (Ulrich Grober 2013) beschrieben. Seitdem wurden viele Aspekte aus Wirtschaft, Sozialwesen und Ökologie mit in das Verständnis des Wortes Nachhaltigkeit aufgenommen. Die Bundesregierung bezeichnet Nachhaltigkeit in Ihrer Nachhaltigkeitsstrategie als eine „*wirtschaftlich leistungsfähige, sozial ausgewogene und ökologisch verträgliche Entwicklung*“ und konkretisiert diese in 63 einzelnen Zielstellungen (BK-Amt 2016). In Anlehnung an diese Zielstellungen und Definition wird der Begriff der Nachhaltigkeit im Kontext von EcoRZ als das *dreiteilige Zusammenwirken von Ökonomie, Ökologie und Sozialem* wahrgenommen.

Als technische Infrastruktur wird der Umwelt- und Klimaeinfluss durch den Ressourcenverbrauch von Rechenzentren besonders hervorgehoben. Zur **ökologischen Nachhaltigkeit** gehören primär die Auswirkungen in der Betriebsphase (CO<sub>2</sub>-Ausstoß), da diese den größten Einfluss für Baden-Württemberg und die globale Perspektive haben (Vergleich: (Whitehead et al. 2015)). Ausgewählte Einflüsse aus der Produktions- und EOL-Phase werden im Leitfaden mit konkreten Empfehlungen thematisiert oder durch ihre geringe Bedeutung im gesamten Lebenszyklus als vernachlässigbar eingestuft. Umwelteinflüsse werden nur im lokalen Umfeld des Rechenzentrums berücksichtigt. Maßnahmen die zum Erreichen der Klimaziele beitragen, werden über die Grenzen des Rechenzentrums berücksichtigt. Dazu gehören u.a. Maßnahmen die Ressourceneinsparungen in anderen Bereichen ermöglichen.

Im Rahmen des Projektes EcoRZ wurde die **ökonomische Nachhaltigkeit** von Rechenzentren und Ihre Verschränkung mit dem allgemeinen Wirtschaftswachstum der lokalen und globalen Industrie berücksichtigt. Der Bereich der Ökonomie umfasst auch die ökonomischen Aspekte der angrenzenden Infrastrukturen, da diese einen Beitrag zur ökonomischen Nachhaltigkeit leisten können. Beispielsweise können Rechenzentren einen ökonomischen Vorteil erzielen, wenn diese ihre Abwärme an Abnehmer in der Umgebung verkaufen. Die ökonomische Realisierbarkeit von Maßnahmen steht dabei oft im Spannungsfeld mit ökologischen Zielen. Eine sinnvolle Abwägung der verschiedenen Dimensionen kann dabei je nach Betrachtungswinkel und Interessenlagen durchaus unterschiedlich ausfallen.

Der Begriff der **sozialen Nachhaltigkeit** beschränkt sich im Kontext dieses Berichts im Wesentlichen auf den Sozialbeitrag eines Wirtschaftsunternehmens zur ganzen Gesellschaft und die Notwendigkeit das gesellschaftliche und soziale Umfeld für Mitarbeiter und Gesellschaft zu verbessern und zu sichern. Internationale soziale Nachhaltigkeit wird in den Bereichen Rohstoffgewinnung und Komponentenherstellung berücksichtigt. Die meist auch im Bereich soziale Nachhaltigkeit verankerten Aspekte Gender-Pay-Gap, Diversity, Inklusion und Ungleichverteilung wurden im Kontext der Nachhaltigkeit von Rechenzentren nicht berücksichtigt.

Der Begriff **Grünstrom** wird in diesem Bericht für Strom verwendet welcher aus erneuerbaren Quellen erzeugt wurde. Hierzu zählen unter anderem Photovoltaik, Solarthermie, Wasserkraft, Geothermie, Biogas Windenergie.

## 1.2 Hintergrund des Projektes

Das Land Baden-Württemberg hat sich, im 2013 beschlossenen „Gesetz zur Förderung des Klimaschutzes in Baden-Württemberg“ zu ambitionierte Klimaschutzziele verpflichtet. Die Primärziele des Landes sind eine Reduktion des Energieverbrauchs um 50 % gegenüber 2010, 80 % Deckungsgrad durch erneuerbare Energien und eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 90 % gegenüber 1990. Diese ambitionierten Ziele lassen sich nur durch eine ganzheitliche Optimierung und einer Vielzahl an Aktivitäten zur Optimierung des Energie- und Ressourcenverbrauchs im Bundesland erreichen. Als weiter Punkt wurde im Juli 2017 von der Landesregierung Baden-Württemberg die Digitalisierungsstrategie digital@bw beschlossen um die Digitalisierung als Teil einer Nachhaltigen Entwicklung zu verankern. Ein Aspekt dieser Optimierung sind die IT Systeme welche in fast jedem Unternehmen, jeder Behörde und jeder Organisation benötigt werden. Herzstück dieser Systeme sind Rechenzentren, welche als zentrale Datenverarbeitungspunkte einen Großteil des Energieverbrauchs in sich vereinen.

## 1.3 Wirtschaftliche und klimatische Relevanz des Projektes

Sowohl die Digitalisierung als auch der Klimawandel sind reale Herausforderungen vor dem die Gesellschaft und das Land-Baden-Württemberg stehen. Der Klimawandel als globale Herausforderung betrifft alle Akteure und muss den Nachhaltigkeitsgedanken zum Kernpunkt unseres zukünftigen handeln machen. Rechenzentren sind heute für ca. 1 % des globalen Stromverbrauchs verantwortlich (Lannoo et al. 2013; van Heddeghem et al. 2014; Bertoldi 2019) und tragen somit in relevanter Dimension zum Klimawandel bei. Die besondere Relevanz des Themas wird deutlich wenn der Energieanteil historisch betrachtet wird. Dieser war vor der Kommerzialisierung des Internets in den 90er Jahren vernachlässigbar. Die Vorzüge der Digitalisierung werden jedoch auch in Zukunft weiter Energieverbräuche in Rechenzentren verlagern und somit die Klimaverträglichkeit von Rechenzentren nachhaltig zu einem relevanten Thema machen. Aus wirtschaftlicher Sicht sind Rechenzentren ebenfalls nicht mehr wegzudenken, da Sie die zentrale Infrastruktur moderner Unternehmen sind um Produktionen zu steuern, Forschung und Entwicklung zu betreiben und Verwaltungs- und Planungsvorgänge zu organisieren. Rechenzentren sichern dabei 200.000 Arbeitsplätze in Deutschland und sind Teil der Wertschöpfungskette in Baden-Württemberg. Die Digitalisierung macht Rechenzentren wirtschaftlich immer relevanter da analoge Prozesse in immer mehr Bereichen digitalisiert und optimiert werden was die Nachfrage nach Rechenkapazität weiter steigert.

## 1.4 Zielsetzung und Aufgabe des Projektes

Ziel des Forschungsvorhabens war es ausgehend von einer Technologieanalyse die Potenziale der Steigerung der Energieeffizienz und der Bereitstellung von Flexibilität im Bereich Rechenzentren für Baden-Württemberg zu bestimmen. Dabei wurden Elektrizität, Wärme und Kälte integriert und über die Grenzen des Rechenzentrums hinaus betrachtet. Rechenzentren bilden zunehmend die infrastrukturelle Basis für Wirtschaftstätigkeit in nahezu allen Branchen.

Vor diesem Hintergrund wurde ein Instrumentarium zur Standortanalyse ausgearbeitet, das sowohl seitens der Rechenzentrumsbetreiber zur Standortentscheidung als auch seitens der Politik zur Identifikation von Handlungsbedarfen eingesetzt werden kann. Kern dieser Standortanalyse war die Festlegung eines Sets an Nachhaltigkeitsindikatoren, welches harte und weiche Standortfaktoren erfasst. Mittels einer Technologieanalyse wurden Differenzierungsmerkmale für Rechenzentren abgeleitet, welche zur Definition von Rechenzentrumsleistungsklassen herangezogen werden. Es wurden die Potenziale zur Steigerung der Energieeffizienz und der Bereitstellung von Flexibilität für Baden-Württemberg untersucht und außerdem Potenziale - z. B. im Hinblick auf verminderte Treibhausgasemissionen, Arbeitsplätze (inkl. Multiplikatoreffekte), Energieeinsparung quantifiziert. Es wurde sowohl durch eine begleitende Kommunikation als auch die Anwendung des ausgearbeiteten

Analyse-Instrumentariums auf konkrete Rechenzentren sichergestellt, dass die Ergebnisse in die Praxis transferiert werden können.

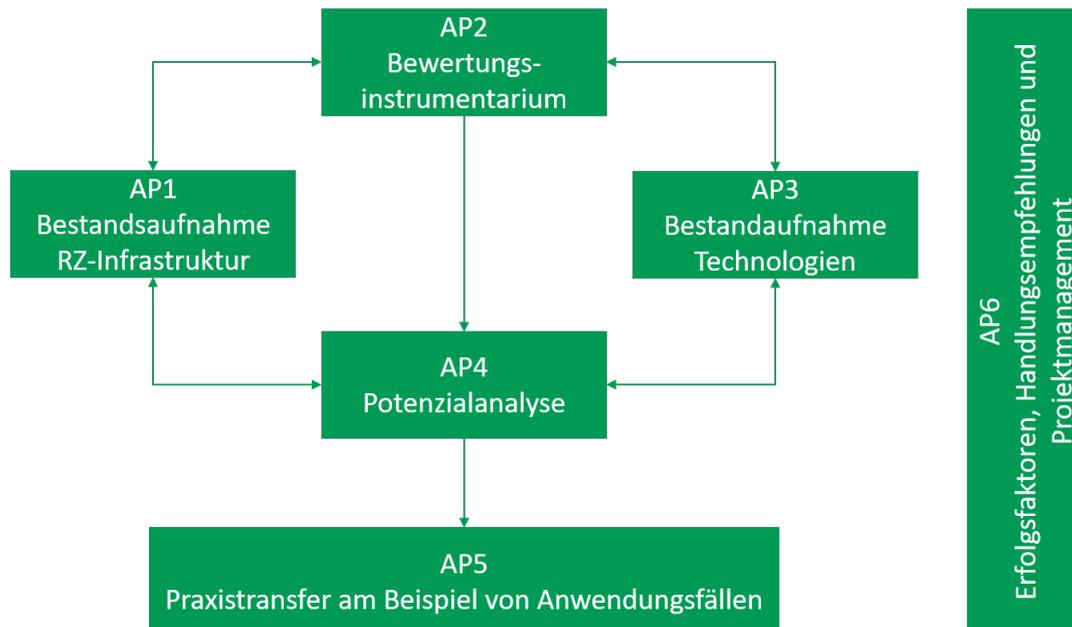


Abbildung 1: Arbeitspaketstruktur der Projektes

## 1.5 Methodik

Im Rahmen des Projektes kamen verschiedene wissenschaftliche Methoden zum Einsatz:

- **Literaturrecherche**  
Bei der Bearbeitung der Literaturrecherche erfolgte eine systematische Analyse der verfügbaren Quellen (Fachliteratur, Datenbanken, Statistiken oder Internetseiten). Dies diente vor allem dem Ermitteln des wissenschaftlichen Status Quo und der Abgrenzung zu anderen Forschungsarbeiten.
- **Fragebögen**  
Um detaillierte Informationen zu den technischen Anlagen und Betriebsmodellen von Rechenzentren zu erhalten wurden Daten über einen eigenen Fragebogen erhoben und ausgewertet.
- **Experteninterviews/Stakeholderdialog**  
Das spezielle Fachwissen und Erfahrungswerte aus der Branche zu gewinnen wurden mit verschiedenen Experten zusätzliche Interviews durchgeführt. Zusätzlich wurden verschiedene Stakeholder im Rahmen eines Workshops eingeladen um zum Thema Rechenzentrum zu diskutieren.
- **Fallstudien**  
Die im Projekt durchgeführten Fallstudien dienten der Plausibilisierung der Forschungsergebnisse und Ermittlung von Hemmnissen. Zusätzlich wurde bei Vor-Ort-Besichtigungen verschiedener Rechenzentren der technische Ist-Stand analysiert.
- **Modellbildung/Simulation**  
Zur Simulation und Modellierungen von verschiedenen Technologien und Betriebskonzepten wurden verschiedene Softwarelösungen eingesetzt.
- **Projektbeirat**  
Um auf die Expertise von Vertreter aus Forschung, Wirtschaft, Politik und Kommunalen Einrichtungen zurückgreifen zu können wurde ein interdisziplinärer Beirat gebildet. Dieser unterstützte das Projekt bei regelmäßigen Treffen mit detailliertem Fachwissen und Branchenerfahrungen.

## 2. Analyse der momentanen und zukünftigen RZ-Landschaft in Baden-Württemberg

Um einen möglichst detaillierten Einblick in den Status Quo der Rechenzentrumslandschaft in Baden-Württemberg zu erhalten, wird in diesem Kapitel, der Rechenzentrumsbestand sowie dessen Energieflüsse (über die Systemgrenze) erfasst und kategorisiert. Um den inhärenten Unsicherheiten in Bezug auf Zukunftsprognosen zu begegnen, werden Szenarien entwickelt, welche den zukünftigen Bedarf an Rechenzentren und deren Bedarf an Energie beinhalten und abschätzen.

### 2.1 Bestandsaufnahme der RZ-Infrastruktur

Zur Erfassung des Rechenzentrumsbestands und zur Analyse der Energieflüsse werden zunächst Daten über verwendete IT-Technik, Infrastruktur und Verwaltung gesammelt, um dadurch sowohl den Ist-Zustand als auch Trends und Potenziale insbesondere hinsichtlich der Nachhaltigkeit und der Energieeffizienz aufzuzeigen.

Im Vorfeld der Datenerhebung ist es aus Gründen der Verständlichkeit angebracht, mehrere im Folgenden verwendete, aber nicht näher erläuterte Begriffe vorab zu definieren:

**Cloud Anbieter:** Ein Cloud Anbieter ist ein Dienstleister (kommerziell, akademisch, staatlich), der Dienste aus dem Bereich des Cloud-Computing (Mell und Grance 2011) bereitstellt. Cloud Computing ist ein Modell für den überall verfügbaren, einfachen „On-Demand“ Netzwerkzugriff auf einen gemeinsam genutzten Pool konfigurierbarer Rechenressourcen (e.g. Netzwerk, Server, Speicher, Anwendungen und Dienste), die mit minimalem Verwaltungsaufwand schnell bereitgestellt und freigegeben werden können. Es wird dabei meist differenziert zwischen:

- *Private Cloud:* Die Cloud-Infrastruktur wird für die ausschließliche Verwendung durch eine einzelne Organisation mit mehreren Verbrauchern bereitgestellt.
- *Public Cloud:* Die Cloud-Infrastruktur wird für eine öffentliche Nutzung bereitgestellt.
- *Hybrid Cloud:* Die Cloud-Infrastruktur besteht aus zwei oder mehr unterschiedlichen Cloud-Infrastrukturen (e.g. private, public).

**Colocation:** Colocation ist eine Rechenzentrumsform, die nach (EcoDataCenter 2018) wie folgt definiert ist: Ein Colocation-Rechenzentrum ist eine Einrichtung, in der Organisationen, Unternehmen und Behörden Unterbringungsfläche für ihre Server und andere IT-Geräte mieten können. Das Colocation-Rechenzentrum stellt das Gebäude, die Netzwerkanbindung, die Stromversorgung und die Kühlung für die Server sowie die physische Sicherheit bereit.

**SLA:** Nach (Reply System 2014) ist ein Service Level Agreement (SLA) ein ausgehandeltes Abkommen zwischen zwei Parteien, wobei einer der Kunde und der andere der Dienstleister ist.

#### 2.1.1 Datenerhebung

Die Erfassung der Daten erfolgt auf drei Arten. Der Hauptfokus liegt auf der Verteilung selbst erstellter Fragebögen (Anhang A) an unterschiedliche Rechenzentrumsbetreiber. Unterstützt wurde dies durch eine Recherche veröffentlichter Daten. Beispielsweise wurden Informationen aus Fachzeitschriften und insbesondere aus Online Auftritten verschiedener Rechenzentrumsbetreiber meist aus dem industriellen Umfeld gewonnen. Die dritte Quelle der Informationsgewinnung stellte die Studie „Green IT Inventar Baden-Württemberg“ dar (Gröger 2017).



Abbildung 2: Untersuchte Rechenzentrums Standorte in BW

Mit Hilfe der Fragebögen konnten Daten von sechs Hochschul-Rechenzentren, einem industriellen und zwei kommunalen Rechenzentren gesammelt werden. Zusätzlich konnten zwei ausgefüllte Fragebögen von Rechenzentrumsbetreibern aus dem industriellen Colocation Umfeld im Großraum Frankfurt am Main akquiriert werden. Mit Hilfe der anderen Referenzen konnten diese Zahlen auf insgesamt neun Hochschul-, zwei kommunale, zwölf industrielle und vier Rechenzentren auf Landesebene Baden-Württemberg erweitert werden. Somit standen insgesamt Daten aus 27 verschiedenen Rechenzentren zur Verfügung. Die verschiedenen Standorte sind in Abbildung 2 dargestellt.

An dieser Stelle muss jedoch auf die wichtige Einschränkung hingewiesen werden, dass die Daten aus inhomogenen Quellen stammen. Folglich sind die Daten nicht immer deckungsgleich. Zum Beispiel kann ein Rechenzentrumsbetreiber einen Power Usage Effectiveness (PUE) Wert angegeben haben, ein anderer nicht.

Den Zahlen aus (Hintemann 2012) folgend, wurde die Anzahl an kleinen Serverschränken in Baden-Württemberg auf 1000-2000 Stück geschätzt. Im Projekt EcoRZ wurden „Rechenzentren“ dieser Art vernachlässigt, da zum einen solche Einrichtungen keine Rechenzentren im allgemeinen Sinne sind (e.g. Anwaltskanzleien, Medienagenturen) und die IT-Komponenten, wenn überhaupt in einem Schrank bzw. Rack untergebracht, oft kein Kühlgerät benötigen. Zum Anderen lagern immer mehr solcher kleinen Unternehmen und Mittelständler ihre IT-Infrastruktur in größere Rechenzentren aus (Mittelstandagentur Cloud: 4.0 2018) (Hintemann 2012). Auf Grundlage der Daten aus (Hintemann 2012) dürfte die für das Projekt relevante Anzahl an Rechenzentren, bezogen auf das Studienjahr 2012, im hohen dreistelligen Bereich in Baden-Württemberg liegen. Aufgrund der noch stärker fortschreitenden Migrations- und Konsolidierungstrends der letzten Jahre, Stichwort Migration in die Cloud, dürfte sich diese Zahl stark verringert haben und könnte heute im niedrigen dreistelligen Bereich liegen. Das in der Analyse der deutschlandweiten Rechenzentrumslandschaft durchaus als führend angesehene *Borderstep Institut* führte in der Studie (Hintemann 2017a) eine bundesweite Datenerhebung aus dem Betrieb verschiedenster Rechenzentrumsbetreiber durch, welche auf einem

Volumen im Bereich von 75 Rückmeldungen fußte. In der Studie wurden im Allgemeinen sehr große Betreiber untersucht, die in der Regel mehrere Rechenzentren betreiben. Heruntergebrochen auf die Einwohnerzahl Baden-Württembergs ist dieses Stichproben Volumen vergleichbar mit dem aus dem Projekt EcoRZ. Zusammengefasst lässt sich über die Datenqualität folgende Aussage treffen:

**Die statistische Signifikanz der erhobenen Daten im Projekt ist auf einem Niveau vergleichbarer anderer Studien. Die erhobenen Daten aus den Rechenzentrumsbetrieben stellen eine Teilmenge der statistischen Grundgesamtheit dar, was eine mit jedem statistischen Schätzer (e.g. Mittelwert) verknüpfte Ungenauigkeit zur Folge hat.**

Die im Folgenden vorgestellten Ergebnisse sind somit als Trends und Muster und nicht als vollständige Statistik zu interpretieren. Rückmeldungen im Rahmen von Konsortiums- und Beirats-Sitzungen innerhalb der Projektlaufzeit und Vergleiche mit anderen Studien (Hintemann 2018) legen den Schluss nahe, dass die Datenmuster die Verhältnisse der Realität widerspiegeln und somit als wichtiger Grundbaustein zur Ist-Aufnahme der Rechenzentrumslandschaft in Baden-Württemberg gewertet werden können.

Die sich aus den Datensätzen ergebenden Größen und dazugehörige Werte lassen sich einzeln statistisch auswerten (e.g. Mittelwert, Standardabweichung des PUE) oder kombiniert (e.g. Kreuzkorrelationskoeffizient aus ‚Ist eine redundante Stromanbindung vorhanden‘ und ‚Ist eine redundante Datenanbindung vorhanden‘). Da nicht zu jeder Größe oder Merkmal dieselbe Informationsmenge vorlag und es damit folglich erschwert wurde, Größen kombiniert auszuwerten, wurde sich auf die Auswertung folgender statistischer Größen konzentriert: Mittelwert, Standardabweichung, Median. Um den Rahmen nicht zu sprengen, wurde sich außerdem auf die Bereiche Energieeffizienz, soziale Nachhaltigkeit und Verfügbarkeit konzentriert. Insgesamt werden im Folgenden acht Merkmale aus den Datensätzen der analysierten Rechenzentren ausgewertet.

### 2.1.2 Verteilung der PUE (Power Usage Effectiveness)

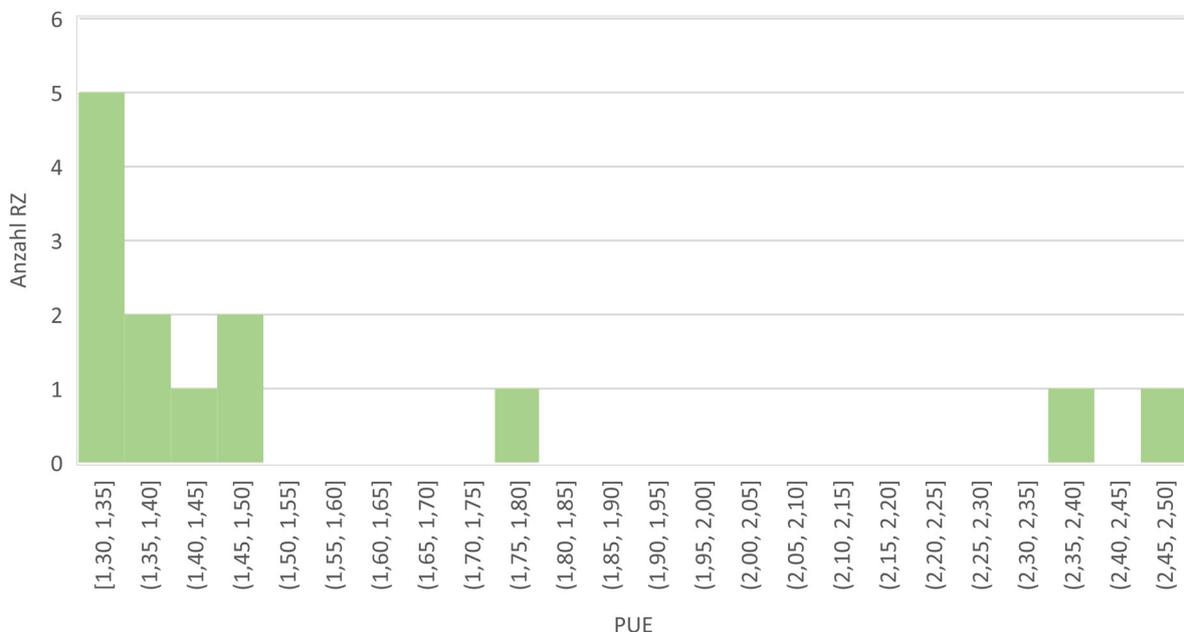


Abbildung 3: Verteilung der PUE

Mit der Power Usage Effectiveness (PUE) wird die Energie-Effizienz der Infrastruktur des Rechenzentrumsbetriebes gemessen. Nach (Belady 2007a) ist die PUE definiert als Quotient aus der vom Rechenzentrum aufgenommenen elektrischen Gesamtleistung und der von der IT-Infrastruktur aufgenommenen elektrischen Leistung. Je näher dieser Wert an eins liegt, desto energieeffizienter arbeitet die (Nicht-IT-) Infrastruktur. Über die Effizienz der IT-Infrastruktur macht die PUE nicht notwendigerweise korrekte Aussagen. Eine hypothetisch gleiche elektrische Leistungsaufnahme einer

Komponente im Leerlauf Zustand und einer Komponente, welche an der Abarbeitung einer geschäftskritischen Applikation beteiligt ist, geht gleichgewichtet in die PUE Berechnung ein.

Insgesamt lagen PUE Angaben von 13 Rechenzentrumsbetreibern vor. Für den Mittelwert ergab sich 1,56 und für die Standardabweichung 0,41. Aus Diskussionen mit dem Konsortiums-Partner ‚ICT Facilities‘ und aus (Hintemann 2018) ging hervor, dass neugebaute Rechenzentren heutzutage eine PUE im Bereich 1,3 besitzen. Der Median der Verteilung der PUE liegt mit 1,47 etwas über diesem Wert. Dies liegt nahe, dass die ermittelte Statistik die aktuelle Lage akkurat abbildet. Des Weiteren ist von einem der „Ausreißer“ bei 2,45 bekannt, dass dieser keine freie Kühlung benutzt, was eine ineffiziente Kühlung und damit einen schlechten PUE Wert impliziert. Es sei angemerkt, dass bei den Befragungen nicht nach der genauen Messmethodik gefragt wurde und die Rechenzentrumsbetreiber somit mit großer Wahrscheinlichkeit die über einen gewissen Zeitraum gemessene Gesamtenergieaufnahme mit der über den gleichen Zeitraum gemessenen Energieaufnahme der IT-Komponenten in Verhältnis gesetzt haben. Als Muster lässt sich erkennen, dass PUE Werte von Rechenzentren aus dem industriellen Umfeld immer unterhalb des Median lagen.

Abschließend sei erwähnt, dass manche neugebauten Rechenzentren heutzutage einen PUE im Bereich 1,1 erzielen können. Dies bedeutet eine Abnahme von nochmal 0,2 im Vergleich zu den genannten heute üblichen Werten von 1,3. Beispiele finden sich meist in den Größt-Rechenzentren bekannter Unternehmen wie Google (Google Inc. 2019). Gründe hierfür liegen in einer maßgeschneiderten Anpassung aller Rechenzentrenbereiche, wie einer komplexen und detaillierten Überwachungsinfrastruktur, einer höchsteffizienten Kühlung (e.g. direkte freie Kühlung) und individuell angepasster IT-Komponenten (e.g. abgestimmte USV und Server-Netzteile bei Google) (Barroso et al. 2018).

### 2.1.3 Nutzung von Strom aus erneuerbaren Quellen in industriellen Rechenzentren

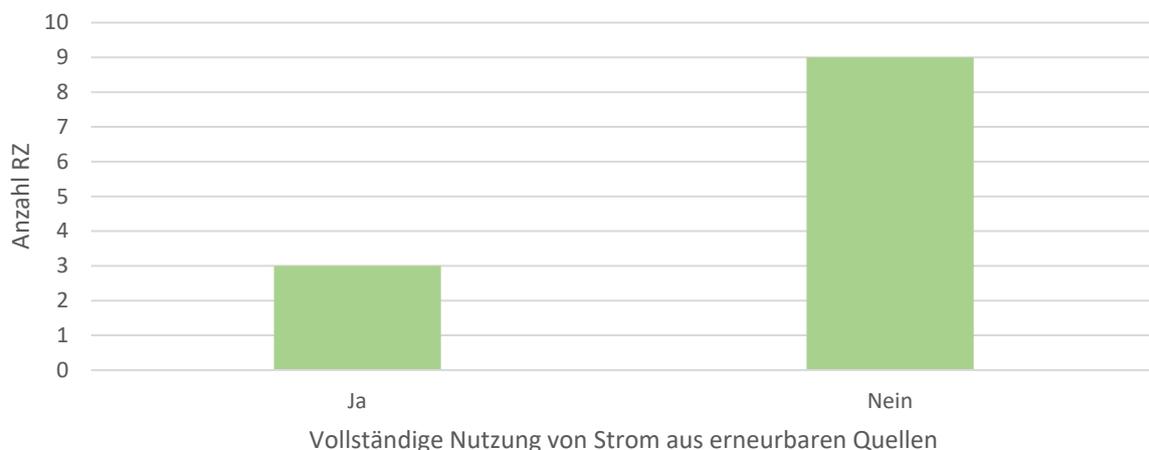


Abbildung 4: Vollständige Verwendung grünen Stroms in industriellen Rechenzentren

In diesem Abschnitt soll untersucht werden, ob eine Bereitschaft im industriellen Umfeld vorhanden ist, Strom aus erneuerbaren Quellen zu beziehen. Dabei müssen zwei Punkte beachtet werden. Alle Betreiber aus dem industriellen Umfeld gaben, falls erneuerbare Quellen in ihrem Strommix vorhanden waren, entweder den Wert 100 % oder keinen Wert an. Verneinten die Unternehmen das Vorhandensein erneuerbarer Quellen in ihrem Strommix oder machten sie keine Angaben, wurde dies als „Nein“ gewertet. Wurde der Wert 100 % angegeben wurde dies mit „Ja“ gewertet.

Insgesamt gaben 25 % der untersuchten industriellen Rechenzentren an, ihren Strom zu 100 % aus erneuerbaren Quellen zu beziehen. Dies liegt die Schlussfolgerung nahe, dass bereits jetzt schon die Bereitschaft vorhanden ist, Strom aus erneuerbaren Quellen zu beschaffen. Natürlich steht am Ende des Tages, vor allem im industriellen Umfeld, immer die Rentabilität einer Investition im Vordergrund. Im Rahmen der Energiewende und des damit verbundenen Erneuerbare-Energien-Gesetz (Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz 2017) werden erneuerbare Energieträger

zukünftig noch stärker wirtschaftlich gefördert und stärker gewichtet in den Gesamtstrommix auf Bundesebene eingehen. Folglich wird sich der Trend der Nachfrage nach Strom aus erneuerbaren Quellen in Zukunft weiter steigern.

Es sei erwähnt, dass keine Angaben über die Art des Bezugs gemacht wurden. Man kann jedoch davon ausgehen, dass sich der Bezug auf sogenannte GO (Guarantee of Origin) Zertifikate fokussiert, da der alternative Bezug über PPAs (Power Purchase Agreements) eher für Größt-Rechenzentren in Frage kommt, welche Erneuerbare Energien direkt vom Erzeuger beziehen.

Es muss also geschlussfolgert werden, dass auf der einen Seite zwar eine Bereitschaft zum Bezug erkennbar ist, auf der anderen Seite jedoch dieser Bezug im Moment noch über ein intransparentes Zertifikatssystem abgewickelt wird.

#### 2.1.4 Einsatz von Rack-Einhausungen

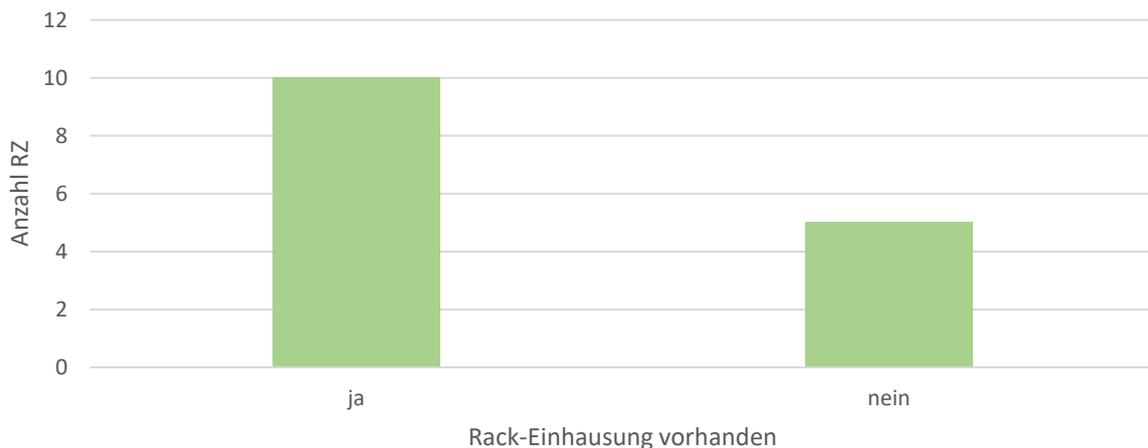


Abbildung 5: Einhausung von Racks (Rackkühlkonzepte ausgeschlossen)

In diesem Abschnitt soll diskutiert werden, wie viele der untersuchten Rechenzentren eine Einhausung ihrer Racks verwenden. Ausgeschlossen wurden dabei Rechenzentren, die auf Rackkühlkonzepte setzen, da in diesem Fall die Einhausung zu keinem Effizienzvorteil führt. Vorteile einer Einhausung liegen darin begründet, dass die Warm- und Kaltluftströme voneinander getrennt werden. Dies führt u.A. zu einem höheren Wirkungsgrad der Kühlkomponenten wie der Kältemaschine und deren Ventilatoren und zu optimalen Betriebstemperaturen für die Server-Zuluft, da die von den Klimageräten abgegebene kalte Zuluft praktisch unverändert an die IT-Komponenten weitergeführt werden kann. Expertenbefragungen ergaben, dass es heutzutage bereits state-of-the-art ist, ab einer Rackanzahl von 3 eine Einhausung vorzunehmen.

Die Auswertung ergab, dass 33 % der untersuchten Rechenzentren keine Einhausung verwenden. Hier war als Muster zu erkennen, dass dies vor allem kleine Hochschul-Rechenzentren und ein Rechenzentrum aus der Industrie, dessen Erbauung schon einige Jahre zurückliegt, betrifft.

Die Ergebnisse legen den Trend nahe, dass der prozentuale Anteil an Rechenzentren mit Rackeinhausungen und ohne direkte Komponentenkühlung steigen wird. Diese Prognose wird durch (Capozzoli und Primiceri 2015) bekräftigt, welche besagen, dass eine Temperaturerhöhung von 2°C Energieeinsparungen von bis zu 8,5 % implizieren.

Es sei angemerkt, dass in der Auswertung das Vorhandensein einer Rackeinhausung sowohl den Fall einer Kaltgang- als auch einer Warmgangeinhausung einschloss.

### 2.1.5 Nutzung freier Kühlung

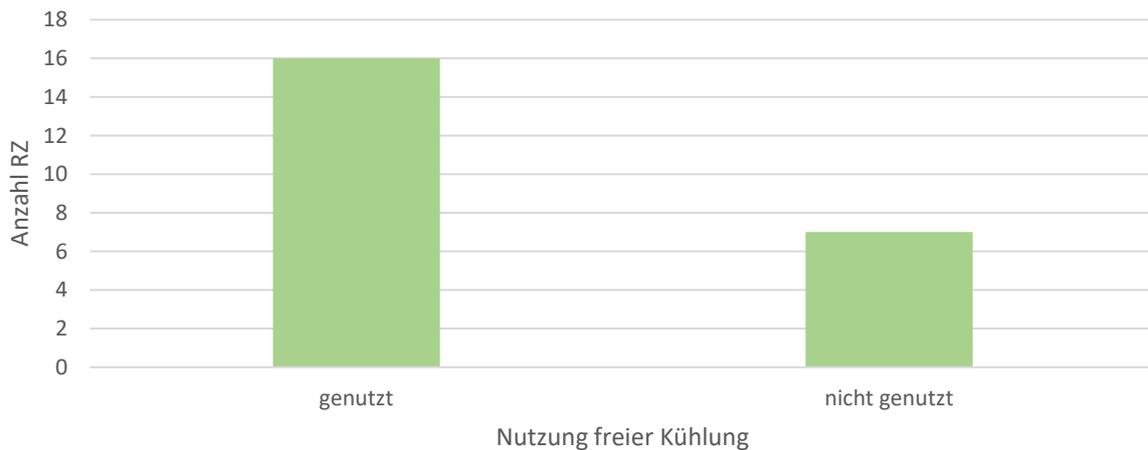


Abbildung 6: Nutzung freier Kühlung

Die folgende Auswertung beschäftigt sich auf die Nutzung freier Kühlung im Rechenzentrumsbetrieb. Hauptvorteil der freien Kühlung ist, dass während ihrer Einsatzzeit auf den Betrieb der energiehungrigen Kältemaschinen verzichtet werden kann. Der Einsatz freier Kühlung und somit die Höhe der Einsparung ist zum einen abhängig von der jährlichen Nutzungszeit und damit von der geographischen Lage des Rechenzentrums und zum anderen von der benötigten Kühlwassertemperatur.

Die Auswertung ergab, dass 70 % der untersuchten Rechenzentren freie Kühlung benutzen. Rechenzentren, die (noch) nicht auf freie Kühlung setzen, fanden sich fast ausschließlich im Bereich kleiner Hochschul-Rechenzentren und Rechenzentren auf Landesebene Baden-Württemberg. Gründe dafür könnten in den eher klein und nicht notwendigerweise auf hohe wirtschaftliche Rentabilität ausgelegten Rechenzentren liegen.

Nichtsdestotrotz nutzt der weit überwiegende Teil der untersuchten Rechenzentren bereits freie Kühlung und befindet sich damit in puncto Energieeffizienz auf dem Stand der Zeit. Es sei angemerkt, dass man die freie Kühlung noch feingranularer nach der Form, direkt oder indirekt, und nach der Art, d.h. trocken, besprüht, adiabatisch etc. unterscheiden kann. Dies wurde hier aber nicht ausgewertet, da dies die Datensätze aus quantitativer Hinsicht nicht hergaben und da der Hauptfokus auf dem Vorhandensein der Technologie an sich lag.

Des Weiteren ergab sich aus Expertenbefragungen, dass ab einer gesamten elektrischen Leistungsaufnahme der IT-Komponenten im Bereich von 40 kW sich die Installation einer indirekten Freie Kühlung lohnt, wenn eine „Total Cost of Ownership“ (TCO) Betrachtung vorgenommen wird. Außerdem begünstigt eine Warmgangeinhausung das Potenzial zur Erhöhung von Freikühlstunden pro Jahr aufgrund erhöhter Rücklauftemperaturen. Dieser Vorteil wird jedoch mit wesentlich kürzeren Notfall Reaktionszeiten im Falle eines Ausfalls der Rechenzentrums Kühlung erkauft.

### 2.1.6 Anteil an festangestelltem Personal

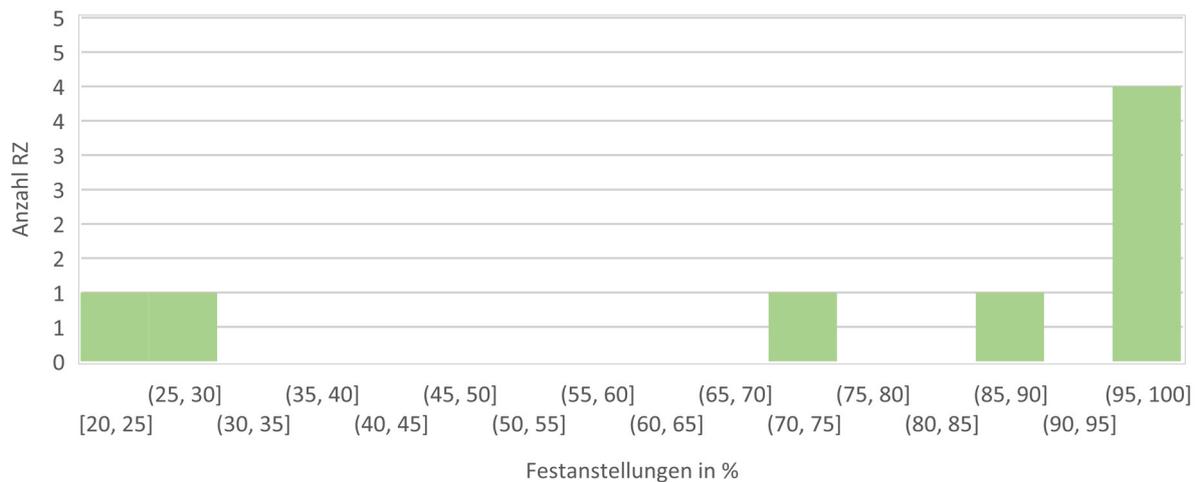


Abbildung 7: Prozentualer Anteil an festangestellten Mitarbeitern

Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit der Art des Angestelltenverhältnisses des Personals in den Rechenzentren und fällt somit in den Bereich der Auswertung sozialer Nachhaltigkeitsaspekte. Dabei wurde erfragt, wie viele Mitarbeiter in dem jeweiligen Rechenzentrum festangestellt sind (in Prozent). Ziel dieser Auswertung war, ein Bild über die Arbeitsverhältnisse der Angestellten zu erhalten. Laut (Böhnke et al. 2016) wirkt sich eine Befristung des Arbeitsverhältnis auf einen Zeitraum von weniger als zwei Jahren negativ auf Arbeitsmoral und Psyche des Arbeitnehmers aus. Ebenso sind weitere atypische Beschäftigungsformen wie Teilzeit oder Zeitarbeit ebenfalls als nicht nachhaltig einzustufen. Im Koalitionsvertrag der neuen Bundesregierung wird deswegen beispielsweise versucht, der ersten Problematik entgegenzuwirken, indem die sachgrundlose Befristung in Unternehmen mit mehr als 75 Beschäftigten zukünftig eingeschränkt werden soll (Hohendanner 2018).

Die Stichprobe fiel für diese Auswertung mit einer Größe von 8 relativ klein aus. Aus diesem Grund dürften auch die Schätzer für den Mittelwert (75,5 %), Standardabweichung (35,5 %) und Median (94,5 %) stärker fehlerbehaftet sein. Dennoch lassen sich einige Rückschlüsse ziehen. Im kommunalen Bereich lag die Quote der Festanstellungen in beiden untersuchten Fällen bei über 90 %. Im Hochschul-Bereich war eine große Bandbreite mit Werten von 25 %, 71 % und 100 % vorhanden. Im Bereich industrieller Rechenzentren konnten für Baden-Württemberg für diese Fragestellung keine repräsentativen Daten erhoben werden. Jedoch ergab die Auswertung für zwei Rechenzentren aus dem Colocation Bereich aus Frankfurt am Main ebenfalls ein geteiltes Bild mit Werten von 25 % und 100 %.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Prozentsatz an festangestelltem Personal vor allem im Hochschul-Umfeld stark zu schwanken, im kommunalen Umfeld hingegen auf einem konstant hohen Niveau zu sein scheint. Ein Vergleich mit Daten vom Statistischen Landesamt Baden-Württemberg für das Jahr 2018 (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2018) ergab folgendes Bild. Definiert man Nicht-Festangestellte als Menge aller befristeten Arbeitskräfte, Zeitarbeiter und Geringfügig Angestellten, kommt das statistische Landesamt auf einen Wert von 9 %, was einer Feststellungsquote von 91 % entspricht. Inkludiert man noch Teilzeitbeschäftigte (bis 20 Wochenstunden) in die Berechnung, sinkt die Feststellungsquote auf 74,7 %. In diesem Fall weicht der Schätzer für den Mittelwert für die untersuchten Rechenzentren von genanntem Wert um lediglich 0,8 % ab.

### 2.1.7 Vorhandensein einer redundanten Stromanbindung

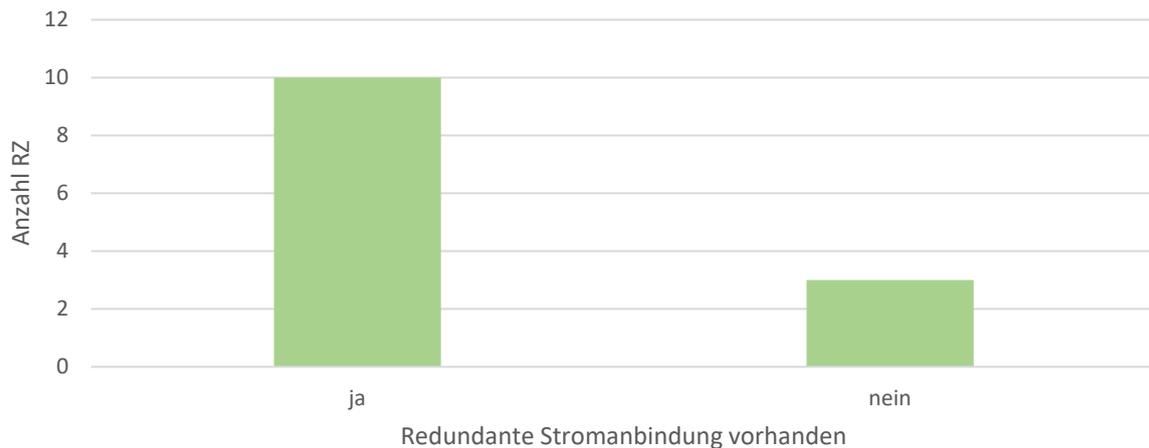


Abbildung 8: Nutzung einer redundanten Stromanbindung

Im Folgenden soll betrachtet werden, wie viele der untersuchten Rechenzentren über eine redundante Stromanbindung verfügen. Ein Ausfall kann zwar in vielen Fällen durch Vorhandensein von USV im Minutenbereich und Notstromaggregaten im zweistelligen Stundenbereich überbrückt werden, ist die Stromanbindung jedoch gekappt, kann dies fatale Konsequenzen für den Betrieb haben. Als Beispiel sei hier der Fall von British Airways genannt, bei dem durch einen Stromausfall im Rechenzentrum des Dienstleisters CBRE der Flugbetrieb über zwei Tage nicht mehr abgewickelt werden konnte, was zu einem Gesamtschaden im Bereich von 74.6 Millionen \$ für die Betreibergesellschaft führte (Smolaks 2019). Dieser Extremfall verdeutlicht, dass besonders im Falle eines auf wirtschaftlicher Rentabilität und/oder Einhaltung hoher Anforderungen aus SLAs (Service Level Agreements) ausgelegten Rechenzentrums redundante Stromverbindungen unerlässlich sind um das Risiko langer Ausfallzeiten zu minimieren.

Die Auswertung ergab, dass 77 % aller untersuchten Rechenzentren eine redundante Stromanbindung besitzen. Die Rechenzentren ohne redundante Stromanbindung fanden sich ausschließlich im Hochschul-Umfeld wieder, wo die Hochverfügbarkeit nicht, das alles Entscheidende Kriterium darstellt.

Die Ergebnisse stehen im absoluten Einklang mit der Erkenntnis, dass für Rechenzentren aus dem industriellen Umfeld eine unterbrechungsfreie Stromversorgung überlebenswichtig ist. Es sei angemerkt, dass man eine redundante Stromanbindung noch feingranularer, nach der Anzahl der Versorgungspfade, unterscheiden kann. Dies wurde hier aber nicht ausgewertet, da dies die Datensätze aus quantitativer Hinsicht nicht hergaben und da der Hauptfokus auf dem Vorhandensein der Redundanz lag.

### 2.1.8 Verteilung der zertifizierten Verfügbarkeitsklassen

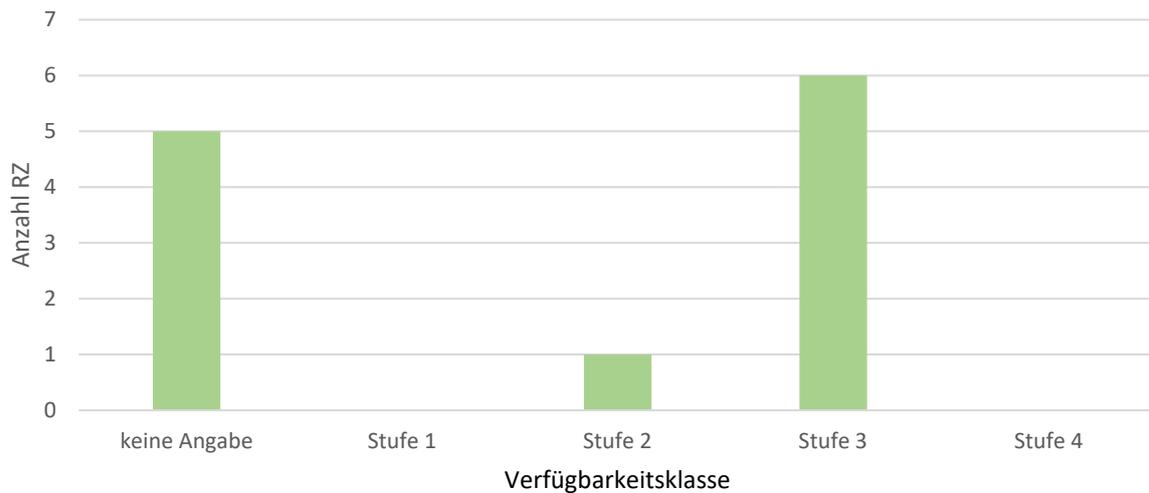


Abbildung 9: Verteilung der zertifizierten Verfügbarkeitsklassen im industriellen Umfeld

Im Folgenden wurde ausgewertet, wie sich die zertifizierten Verfügbarkeitsklassen auf die untersuchten Rechenzentren verteilten. An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass aus dem kommunalen und Hochschul-Umfeld kein Betreiber Angaben über eine Zertifizierung der Verfügbarkeit gemacht hat, weswegen sich ausschließlich auf industrielle Rechenzentren konzentriert wurde. Die Zertifizierung mit einer Verfügbarkeitsklasse garantiert sowohl dem Kunden als auch dem Rechenzentrumsbetreiber eine mit der Klasse ansteigende hohe Verfügbarkeit des Betriebs. Wie bereits erwähnt, ist eine hohe Verfügbarkeit, vor allem aus ökonomischen Gründen, eine unerlässliche Anforderung an Rechenzentren vor Allem aus dem industriellen Umfeld.

Die Auswertung ergab, dass, sofern Angaben über eine mögliche Zertifizierung gemacht wurden, sich die untersuchten Rechenzentren ausschließlich nach den Verfügbarkeitsklassen des Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, BSI (Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik 2013) und nach TÜV-Süd (TÜV Süd 2020), z.B. mit der DIN-EN50600 (VDE 0801-600-2-1) Norm, zertifizieren ließen. Geht man von den garantierten Verfügbarkeitsintervallen in Prozent der jeweiligen Klassen aus, sind diese für beide Zertifizierungen nahezu deckungsgleich. Für die BSI Zertifizierung gibt es mit der Verfügbarkeitsklasse 0 und 5 noch zwei weitere Klassen, die jedoch von keinem Rechenzentrum zertifiziert wurden. Aus diesem Grund, und um die Auswertung zu vereinfachen, wurden Rechenzentren, die in der gleichen Verfügbarkeitsklasse, jedoch in einem Fall nach BSI und im anderen Fall nach DIN-EN50600 zertifiziert wurden, in ein und derselben Verfügbarkeitsklasse ausgewertet. Außerdem gaben aus dem Umfeld der Rechenzentren auf Landesebene BW zwei davon an, die Verfügbarkeitsklasse 2 zu besitzen. Jedoch wurde keine Angabe darüber gemacht, nach welchem Standard bzw. Norm zertifiziert wurde, weswegen diese beiden Kandidaten nicht in dem Histogramm in Abbildung 9 aufgenommen wurden.

Um bestimmte Verfügbarkeitsklassen nach BSI zu erreichen, müssen meist Vorgaben, die nach dem IT-Grundschutz für bestimmte IT-Komponenten mit wesentlichem Einfluss auf den Grundwert Verfügbarkeit gelten und in empfohlenen Maßnahmenkatalogen festgehalten werden, erfüllt sein (Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik 2017). Daraus werden dann, bezogen auf die jeweiligen Klassen, bestimmte Verfügbarkeitsintervalle definiert. Um beispielsweise der Verfügbarkeitsklasse 3 anzugehören, muss ein Rechenzentrum zwischen 99,99 % und 99,999 % der Zeit des Jahres verfügbar sein. Im Falle einer Zertifizierung über die EN50600 des TÜV wird die Kategorisierung über erfüllte Anforderungen bezüglich der Redundanz von sowohl Strom- und WAN-Anbindung (Wide Area Network) als auch Kühlinfrastruktur gebildet (VDE 2018). Parallel dazu findet eine Prüfung nach TIA942 - Anhang G:2010 statt (TIA 2017), welche sich an den

Verfügbarkeitsintervallen des Uptime Instituts orientiert (BITKOM 2013). In der folgenden Tabelle sind die Intervalle der beiden Zertifizierungen dargestellt.

Tabelle 1: Verfügbarkeitsintervalle nach BSI und TÜV

	VK 0	VK 1	VK 2	VK 3	VK 4	VK 5
BSI	ca. 95%	> 98,97 %	> 99,90 %	> 99,99 %	>99,999 %	(100 %)
TÜV, EN-50600, (Uptime Institut)	-	> 99,67 %	> 99,75 %	> 99,98 %	> 99,99 %	-

58 % der untersuchten industriellen Rechenzentren gaben an, bezüglich der Verfügbarkeit zertifiziert zu sein. 15 % davon gaben an nach Verfügbarkeitsklasse 2 und 85 % davon gaben an nach Verfügbarkeitsklasse 3 zertifiziert zu sein.

Diese Auswertung lässt den Schluss zu, dass für Rechenzentren aus dem industriellen Umfeld, die gewillt sind eine Zertifizierung bezüglich Verfügbarkeit vorzunehmen, Verfügbarkeitsklasse 3 die beste Option darstellt. Offensichtlich bietet diese Klasse für die Betreiber die beste Balance aus garantierter Verfügbarkeit, zusätzlichem Invest und energetischem Mehraufwand durch redundante Infrastrukturauslegung. Für nicht-industrielle Rechenzentren hingegen scheint Verfügbarkeitsklasse 2 in vielen Fällen den Anforderungen zu genügen.

### 2.1.9 Betrieb einer Netzersatzanlage (NEA)

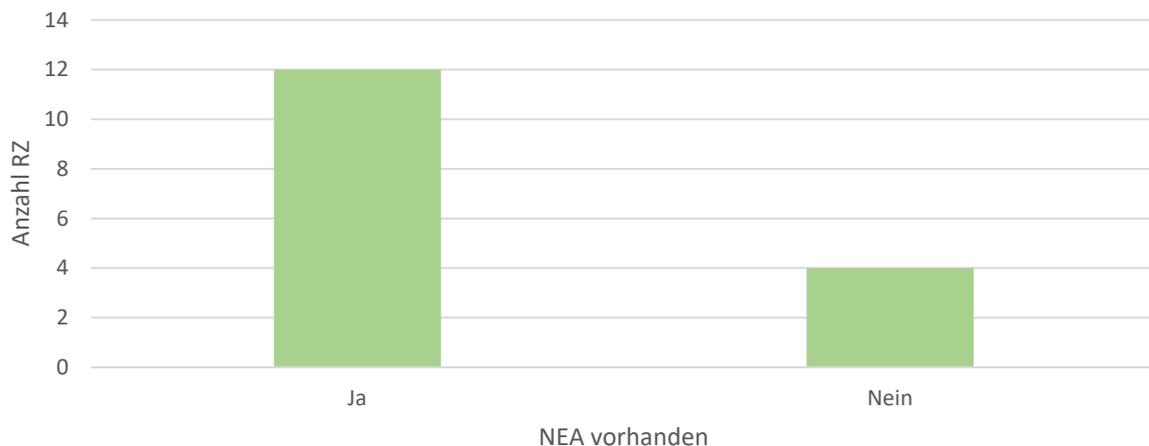


Abbildung 10: Betrieb einer Netzersatzanlage

Zur Überbrückung eines Stromausfalls im Rechenzentrumsbetrieb greifen Betreiber in vielen Fällen auf den Einsatz einer Netzersatzanlage zurück. In der Praxis stellt sich in diesem Fall die Situation meist so dar, dass unmittelbar nach dem Stromausfall die USV den Betrieb im Minutenbereich aufrechterhalten können. Dies gibt der, meist mit fossilen Brennstoffen betriebenen Netzersatzanlage die Möglichkeit, in Betrieb zu gehen und anschließend die Stromversorgung zu übernehmen. Übliche Überbrückungszeiten liegen hier im Bereich von 48 Stunden. Dieses Zeitintervall gibt den Betreibern die Möglichkeit, die Stromversorgung über das Netz wiederherzustellen und in den normalen Betrieb überzugehen.

Die Auswertung ergab hier prinzipiell das gleiche Bild, das sich auch in den anderen untersuchten Fällen mit Bezug zu ‚Erhöhung der Verfügbarkeit‘ zeigte. Rechenzentren, welche das Vorhandensein einer Netzersatzanlage verneinten, fanden sich ausschließlich im Hochschul-Umfeld wieder, wohingegen industrielle Rechenzentren, falls Angaben zu einem solchen Betrieb gemacht wurden, das

Vorhandensein mit Ja beantworteten. In Zahlen gaben 75 % der Betreiber an, eine Netzersatzanlage auf ihrem Rechenzentrumsgelände installiert zu haben.

#### 2.1.10 Allgemein erkennbare Muster

Neben den quantitativen Auswertungen zeigten sich bei der Untersuchung noch weitere qualitative Muster.

Rechenzentrumsbetreiber nannten als möglichen Abwanderungsgrund bzw. zukünftige Ansiedlungsalternative den Standort bzw. die Metropolregion Frankfurt am Main. Gründe dafür liegen an der nahtlosen Anbindung an den weltweit größten Internetknoten (bezogen auf Spitzendatenraten) De-CIX und eine vorhandene und ausgebaute digitale Infrastruktur. Als Gründe für eine Abwanderung ins Ausland, beispielsweise das benachbarte Frankreich für Rechenzentrumsbetreiber aus dem Raum Karlsruhe, wurde der im Allgemeinen wesentlich günstigere Stromtarif genannt. Verglichen mit Strompreisen in Deutschland können Rechenzentrumsbetreiber in Frankreich bis zu 75 % an Kosten einsparen (Pauly 2020).

Bis auf einen Rechenzentrumsbetreiber aus dem HPC Bereich, der einen Teil der Abwärme zur Beheizung nahegelegener Büros nutzt, gab kein Rechenzentrumsbetreiber an, seine Abwärme zu nutzen. Als Hemmnisse konnten im Allgemeinen zu niedrige Temperaturniveaus der Abwärme, damit verbundene zu hohe Strompreise für den notwendigen Betrieb einer Wärmepumpe zur Temperaturerhöhung und keine zugesicherte Abnahme der Abwärme identifiziert werden.

#### 2.1.11 Diskussion der Ergebnisse

Die Evaluation der Daten hat klar gezeigt, dass bereits starke Tendenzen zum nachhaltigen beziehungsweise energieeffizienten Rechenzentrumsbetrieb in Baden-Württemberg vorhanden sind. Beispielsweise liegt der Median der PUE knapp über 1,4 und der weit größere Teil der Rechenzentrumsbetreiber greift auf das effiziente Konzept der freien Kühlung zurück. Ebenfalls ist bereits heute der Wille zum Strombezug aus erneuerbaren Quellen, vor allem im industriellen Umfeld, vorhanden. Die Praxis, den Strom über sogenannte Zertifikate oder Herkunftsnachweise bei einem Stromanbieter zu erwerben, ist nicht vollständig transparent und hat auch keinen direkten Einfluss auf den Ausbau von EE-Anlagen in Deutschland bzw. Baden-Württemberg. Eine Zukunftsoption stellen Power Purchase Agreements (PPAs) dar. Bei dieser weitaus transparenteren Methode gibt es eine genaue Zuordnung zwischen EE-Anlage und Abnehmer und eine flexible Vertragsausgestaltung zwischen Erzeuger und Abnehmer. Eine tiefergehende Diskussion von PPAs ist in Kapitel 4.2.2.3 zu finden. Ineffiziente Infrastruktur Technologien sind meist in Institutionen vorzufinden, in denen wirtschaftliche Rentabilität nicht die alles entscheidende Rolle spielt oder oft Personalmangel vorherrscht, wie dies beispielsweise oft in kleineren Hochschul-Rechenzentren der Fall ist.

Die Stichprobe zur Schätzung der Feststellungsquote in den untersuchten Rechenzentren fiel klein aus. Im Hochschulbereich gab es starke Schwankungen (Werte unter 30 % und über 90 %), wohingegen im kommunalen Bereich konstant hohe Werte über 90 % genannt wurden. Der Schätzer für den Mittelwert der Feststellungsquote lag im Bereich der landesweiten Quote des Bundeslandes Baden-Württemberg. Jedoch kann aufgrund der geringen Stichprobengröße eine signifikante Abweichung nicht ausgeschlossen werden.

Im Bereich der Verfügbarkeit des Rechenzentrumsbetriebes war klar erkennbar, dass dies vor allem im industriellen Umfeld eine fundamental wichtige Rolle spielt. Ausfälle des Betriebs können hierbei existenzbedrohliche Ausmaße annehmen und müssen unter allen Umständen vermieden werden. Hierbei ist es wichtig, das richtige Verhältnis aus bereitgestellter Verfügbarkeit, welche oft mit redundanter Infrastruktur verbunden ist, und einem energieeffizienten Betrieb auf der anderen Seite zu finden.

## 2.2 Kategorisierung und Mengengerüst der RZ-Landschaft

Zur besseren Analyse des Rechenzentrumsbestands wurde dieser einer Kategorisierung nach Größe unterzogen. Es wurde ein beispielhaftes Mengengerüst konstruiert, indem die Rechenzentren aus Kapitel 2.1, in die Kategorien eingepflegt wurden.

### 2.2.1 Methodik

Zur Kategorisierung der untersuchten Rechenzentren nach ihrer Größe wurde die Studie „Energieverbrauch und Energiekosten von Servern und Rechenzentren in Deutschland - Aktuelle Trends und Einsparpotenziale bis 2015“ (Hintemann 2012) als Grundlage herangezogen. In dieser Studie wurde eine Kategorisierung nach Serveranzahl vorgenommen (insgesamt fünf Kategorien). Diese Kategorisierung wurde als aktuell gewertet, da zwar die Rechenzentren immer mehr IT-Lasten verarbeiten müssen, aber andererseits ein Trend zur Serverkonsolidierung bspw. mit Hilfe eines vermehrten Einsatzes von Virtualisierungstechnologien stattfindet. Diese Art der Einteilung soll jedoch nur als Grundlage für die Kategorisierung im Projekt EcoRZ dienen. Ziel ist es, die Kategorisierung auf Basis der Systemgrenzen überschreitenden Energieflüsse zu konstruieren. Prinzipiell müssen dafür drei Flüsse betrachtet werden. Zum einen ist dies die elektrische Energie zum Betrieb der Gebäude- und IT-Infrastruktur und mögliche, jedoch zu vernachlässigende, Wärmeenergie für e.g. anschließende zu beheizende Bürogebäude oder noch extrem selten in der Praxis installierte Adsorptionskältemaschinen (siehe Kapitel 4.2.1.2). Zum anderen ist dies die Abwärme, welche genutzt oder ungenutzt, das Rechenzentrum verlässt. Da ein Proportionalitätsverhältnis zwischen gesamter elektrischer Energieaufnahme bzw. damit verknüpfter Anschlussleistung (i.e. die an der Anschlussstelle des Rechenzentrums bereitgestellte elektrische Leistung) und generierter Abwärme besteht, genügt es, die Anschlussleistung zu betrachten. Diese Festlegung wird durch die intuitive Erkenntnis, dass eine höhere Anschlussleistung ein „größeres“ Rechenzentrum impliziert, bestärkt. Um eine feingranularere Aufteilung innerhalb der Anschlussleistungs-Kategorien zu ermöglichen, wurde als zusätzlicher Parameter die Verfügbarkeitsklasse in die Kategorisierung aufgenommen.

Die genaue Umrechnung der Serveranzahl aus (Hintemann 2012) auf die Anschlussleistung wurde basierend auf Recherchen zur Energieaufnahme der aktuellen Serverlandschaft durchgeführt. Hierfür wurden Zahlen bezüglich der durchschnittlichen Leistungsaufnahmen von Servern der fünf größten Hersteller nach Verkaufszahlen im zweiten Quartal 2017 verwendet (Brown 2017). Die Anzahl der untersuchten Modelle wird am Marktanteil der verkauften Server ausgerichtet. Außerdem wurden die Modelle der Hersteller heterogen gewählt (unterschiedliche Höheneinheiten, unterschiedliche Anzahl an Prozessor-Sockets und Hauptspeicher etc.) unter der Einschränkung, dass spec\_power\_sj2008 Benchmark Werte vorlagen. Die spec\_power\_sj2008 Benchmark Werte geben Auskunft über die durchschnittliche elektrische Leistungsaufnahme der Servermodelle unter verschiedenen Lasten. Außerdem wurden Modelle, welche in der Zeitspanne der letzten sechs Jahre auf dem Markt erschienen, ausgewählt. Dies liegt im Bereich der durchschnittlichen Austauschdauer von IT-Komponenten im Rechenzentrumsbetrieb. Zusammengefasst wurden insgesamt 20 Modelle mitsamt durchschnittlicher Leistungsaufnahme unter verschiedenen Lasten ausgewählt. Abschließend wurde bestimmt, welcher Prozentsatz der Server in welchem Lastbereich läuft. Mit Hilfe der Trendkurve über elektrische Leistungsaufnahmen auf Rackebene in Abbildung 11, Kapitel 2.3.1 und Daten aus (Wilkins und Terrahe 2012) ließ sich unter Anwendung einer Extrapolation für das Jahr 2018 die Annahme treffen, dass 45 % der Server bei 20 %, 40 % der Server bei 60 % und 15 % der Server bei 80 % Auslastung laufen. Zusammengefasst kann aus diesen Daten auf die durchschnittliche Leistungsaufnahme pro Server geschlossen werden. In Anhang B finden sich alle zu den verschiedenen Auslastungen gehörigen Werte für die untersuchten Servermodelle und die sich daraus ergebenden Mittelwerte. Mit Hilfe der definierten Gewichte ergibt sich daraus:

$$P_{Server} = 0,45 * 302,19 W + 0,4 * 483,90 W + 0,15 * 622,35 W = 422,90 W$$

*Formel 1: Durchschnittliche el. Leistungsaufnahme pro Server*

Dieser auf den ersten Blick hohe Wert ergibt sich aus der Tatsache, dass auch Servermodelle, die mehrere Höheneinheiten umfassen (e.g. 10U) in die Berechnung mitaufgenommen wurden. Um aus der berechneten Server-Leistung die Anschlussleistung zu berechnen, ist noch ein Wert für die PUE auszuwählen. Auf den Resultaten aus Kapitel 2.1.2 basierend, wurden Werte für die verschiedenen Kategorien gewählt, die in Tabelle 2 zu finden sind:

*Tabelle 2: Verteilung der PUE auf die Kategorien*

Kategorie	PUE
1	1,1
2	1,7
3	1,5
4	1,3
5	1,3

Für einzelne Server bzw. Serverschränke wurde ein sehr niedriger PUE angesetzt, da diese in vielen Fällen kein Kühlgerät benötigen. Kleine Rechenzentren der Kategorie 2 sind, wie in Kap. 2.1.2 angedeutet, oft im Bereich kleiner Hochschul-Rechenzentren oder Rechenzentren auf Landesebene BW beheimatet. Diese Rechenzentren sind häufig durch eine nicht energieeffiziente Infrastruktur gekennzeichnet. Ebenfalls deuteten die Analysen in Kapitel 2.1 an, dass eine steigende Serveranzahl meist mit einer stärkeren Bereitschaft der Investition in energieeffizientere Infrastruktur verknüpft ist. Diesen Annahmen zufolge geht ein Anstieg der Kategorie mit einem Absinken des PUE einher. Der Grund für die Stagnation zwischen der Kategorie 4 und 5 liegt darin begründet, dass Größt-Rechenzentren vorwiegend aus dem industriellen Umfeld eine extrem hohe Ausfallsicherheit garantieren müssen. Diese Rechenzentren setzen in der Folge verstärkt auf redundante Auslegung ihrer Infrastruktur, was zu einer Verschlechterung des PUE führt. Um die Berechnungsmethodik abzuschließen, wird noch auf das Resultat ein pauschaler Wert für die Leistungsaufnahme der Speicher- und Netzwerkkomponenten addiert. Laut (Hass und et al. 2015) liegt dieser bei einem moderaten Virtualisierungsgrad von 2 bei etwa 30 %. Mit:

*i*: Kategorie  
*Gr*: Serveranzahl Grenze (0 für untere Grenze; 1 für obere Grenze)  
 $P_{Anschl}(i, Gr)$ : Zur Kategorie *i* und zur Grenze *Gr* gehörende Anschlussleistung  
 $S(i, Gr)$ : Zur Kategorie *i* und zur Grenze *Gr* gehörende Serveranzahl  
 $P_{Server}$ : Durchschnittliche elektrische Leistungsaufnahme des Servers  
 $PUE(i)$ : Zur Kategorie *i* gehörende PUE  
 ergibt sich für die Anschlussleistung bezogen auf Kategorie *i* und Grenze *Gr*:

$$P_{AI}(i, Gr) = 1,3 * S(i, Gr) * P_{Server} * PUE(i)$$

Formel 2: Anschlussleistung als Grundlage für Definition der Kategorien

Der mathematischen Vollständigkeit halber sei angemerkt, dass gilt:

$$P_{AI}(i, 1) == P_{AI}(i + 1, 0)$$

Formel 3: Äquivalenzrelation zwischen benachbarten Kategorien

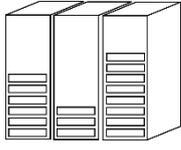
Das bedeutet, dass der obere Wert der Anschlussleistung der Kategorie *i* dem unteren Wert der darauffolgenden Kategorie entspricht. Fällt die Anschlussleistung eines Rechenzentrums genau auf diesen Grenzwert, soll das Rechenzentrum der Kategorie *i+1* zugeordnet werden. Wurden die Rechenzentren den Kategorien nach Anschlussleistung zugeordnet, ließen sich diese, falls Auskunft über eine Verfügbarkeitsklasse vorlag, weiter nach Verfügbarkeit unterteilen. Zusammengefasst wurden im Rahmen des Projekts 4 verschiedene Verfügbarkeitsklassen betrachtet. Je höher die Verfügbarkeitsklasse eines Rechenzentrums ist, desto unwahrscheinlicher ist ein Ausfall des Rechenzentrumsbetriebs.

## 2.2.2 Resultate und Verteilung

Tabelle 3 zeigt die Einteilung der Rechenzentren, die der Auswertung aus Kapitel 2.1 entstammen und deren Datensätze eine derartige Einteilung ermöglichten. Die Rechenzentren in den ‚# RZ, VK Spalten‘ stellen den Teil der Rechenzentren in der ‚# RZ‘ Spalte dar, für den eine Verfügbarkeitsklasse ermittelt

werden konnte.

Tabelle 3: Kategorisierungs Klassen

	$i$	$P_{AI}(i, 0)/kW$	$P_{AI}(i, 1)/kW$	# RZ	# RZ, VK1	# RZ, VK2	# RZ, VK3	# RZ, VK4
	1	1	5					
	2	5	60	2		1		
	3	60	420	5		2		
	4	420	4230	6				
	5	4230	>4230	3			1	
	Summe			16		3	1	

Die Spalten  $P_{AI}(i, Gr)$  sind untere bzw. obere Grenzen der Anschlussleistung Kategorien. Insgesamt gaben 16 Rechenzentrumsbetreiber Auskunft über die von ihnen genutzten Anschlussleistungen. 9 verschiedene Rechenzentrumsbetreiber gaben Auskunft über die Verfügbarkeitsklasse ihres Rechenzentrums. Eine kombinierte Angabe aus genutzter Anschlussleistung und Verfügbarkeitsklasse lag bei drei Rechenzentrumsbetreiber vor.

In Kategorie 1 (Serverschränke) fand sich keines der untersuchten Rechenzentren wieder. Ein kleines Hochschul-Rechenzentrum und ein Rechenzentrum auf Landesebene BW konnten Kategorie 2 (Serverräume) zugeordnet werden. In Kategorie 3 (Kleine Rechenzentren) befanden sich ein Hochschul-, ein kommunales, ein industrielles Rechenzentrum und zwei Rechenzentren auf Landesebene BW. Die vierte Kategorie (Mittlere Rechenzentren) wurde von jeweils 2 Rechenzentren aus dem Hochschul-, dem industriellen und dem Landesebene BW Umfeld besetzt. In der fünften Kategorie (Große Rechenzentren) fanden sich zwei industrielle Rechenzentren und ein Hochschul-Rechenzentrum wieder. Die beiden Rechenzentren mit Verfügbarkeitsklasse 2 in Kategorie 2 und 3 waren beide im Bereich Rechenzentren auf Landesebene BW zu finden, wohingegen das Rechenzentrum der Kategorie 3 und Verfügbarkeitsklasse 3 aus dem industriellen Umfeld stammte.

An dieser Stelle soll noch kurz auf die beiden industriellen Rechenzentren aus dem Colocation Bereich, welche ihren Sitz in Frankfurt am Main haben, eingegangen werden. Diese Rechenzentren, welche nicht kategorisiert wurden, haben beide eine Anschlussleistung im Bereich 10 MW und würden folglich der Kategorie 5 (Große Rechenzentren) angehören. Ebenfalls besitzt eines dieser Rechenzentren ein Zertifikat für die Verfügbarkeitsklasse 3.

### 2.2.3 Diskussion der Ergebnisse

Wie bereits in Kapitel 2.1 erwähnt und begründet, wurden im Projekt keine Rechenzentren der Kategorie 1, i.e. einzelne Server bzw. Serverschränke, betrachtet und ausgewertet.

Der Kategorie 2 (Serverräume) konnte ein Rechenzentrum auf Landesebene BW und ein kleineres Hochschul-Rechenzentrum zugeordnet werden. Die Vermutung liegt nahe, dass in diesem Bereich in Baden-Württemberg noch weit mehr Rechenzentren zu verorten sind. Die Aggregation von Daten aus diesem Bereich erwies sich als schwer, da Hochschul-Rechenzentrumsbetreiber beispielsweise in direkter Kommunikation darüber klagten zu wenig Personal zur Verfügung zu haben und Paradigmen aus dem Bereich Green-IT zwar kennen, aber nicht umsetzen können. Des Weiteren wären weitere Kandidaten für diese Kategorie kleine Mittelständler mit gewachsenen IT-Strukturen, die noch nicht in die Cloud ausgelagert wurden.

In Kategorie 3 (kleine Rechenzentren) befanden sich beide untersuchten kommunalen Rechenzentren. Des Weiteren sind in dieser Kategorie ein Rechenzentrum auf Landesebene BW, zwei Hochschul-Rechenzentren größerer Universitäten, welche keine High Performance Computing (HPC) Dienste anbieten und ein kleinerer Colocator aus dem industriellen Umfeld zu finden.

In Kategorie 4 (Mittlere Rechenzentren) befinden sich zwei universitäre Hochschul-Rechenzentren, die zum Teil HPC Dienste anbieten, alle restlichen (zwei) Rechenzentren auf Landesebene BW und alle restlichen (zwei) untersuchten industriellen Rechenzentren aus dem Colocation Bereich. Ein interessanter Punkt ist hier, dass sich in Baden-Württemberg ansässige Colocator offenbar in Kategorien unterhalb 5 (Große Rechenzentren) konzentrieren. Dies scheint ein Unterscheidungskriterium gegenüber dem Standort Großraum Frankfurt am Main darzustellen, in dem alle untersuchten Colocator der Kategorie 5 angehörten. Für die auf Landesebene BW betriebenen Rechenzentren zeigte sich, dass Kategorie 4 in diesem Fall exklusiv von den nach eigener Angabe beiden größten Informatikzentren der Landesverwaltung besetzt wird.

Kategorie 5 (Große Rechenzentren) wird besetzt von zwei Rechenzentren aus dem industriellen Umfeld, welche Cloud-, Enterprise-, Hosting- und Managed-IT-Dienste anbieten und einem Rechenzentrum aus dem Hochschul-Umfeld, welches einzig und allein HPC Dienste zur Verfügung stellt. Als signifikanter Punkt ist an dieser Stelle zu sehen, dass offenbar ein Unterscheidungskriterium im universitären Hochschul-Bereich der Anteil an angebotenen HPC Diensten darzustellen scheint. In Kategorie 3 befanden sich unter diesen Rechenzentren keines mit HPC Angebot, in Kategorie 4 befanden sich Rechenzentren dieser Art mit teilweise HPC Angebot und in Kategorie 5 befand sich ein Rechenzentrum, welches ausschließlich auf HPC setzt. Ein industrielles Rechenzentrum aus Kategorie 5 gab an, eine Zertifizierung nach Verfügbarkeitsklasse 3 zu besitzen. Wie bereits erläutert, lässt sich durch diese Information die Größe des Rechenzentrums innerhalb der Kategorie etwas nach unten korrigieren.

Zum Schluss soll noch erwähnt werden, dass eine Kategorisierung eines Rechenzentrums nach Größe immer von subjektiver Art ist. Dies liegt zum einen in der Natur der Sache, da eine Aussage darüber, was groß bzw. klein ist immer von der bewertenden Person selbst abhängt. Zum anderen kann eine derartige Kategorisierung mathematisch nie exakt vorgenommen werden, da jede getroffene Annahme immer mit Unsicherheiten und Fehlern besetzt ist. Nichtsdestotrotz ließen sich mit Hilfe der Kategorisierung im Projekt einige Muster erkennen, die für eine akkurate Anwendbarkeit auf weitere Rechenzentren des Landes Baden-Württemberg sprechen.

### 2.3 Szenarien zur Entwicklung der Rechenzentrumslandschaft in Baden-Württemberg

Im Rahmen des Projektes wurden mögliche Zukunftsszenarien zur Entwicklung der Rechenzentrumslandschaft in Baden-Württemberg entworfen.

Im Vorfeld der Szenarienbeschreibungen ist es aus Gründen der Verständlichkeit angebracht, mehrere im Folgenden verwendete Begriffe zu definieren:

**PDU:** Eine PDU (Power Distribution Unit) stellt den IT-Komponenten Schnittstellen für die Stromzufuhr zur Verfügung. Im einfachsten Fall ist dies eine Steckdosenleiste ohne Schutzfunktion. Höherwertige PDU stellen Messtechnik zur Überwachung und einen Überspannungsschutz bereit.

**Smart-City:** Nach (Washburn und Sidhu 2010) umfasst der Begriff Smart-City den Einsatz von intelligenten Computing-Technologien, um die kritischen Infrastrukturkomponenten und -dienste einer Stadt - einschließlich Stadtverwaltung, Bildung, Gesundheitswesen, öffentliche Sicherheit, Immobilien, Verkehr und Versorgung - smarter, vernetzter und effizienter zu gestalten.

**Smart Factory, IIoT:** Unter dem Begriff IIoT versteht man nach (NI 2014) eine Vielzahl verbundener industrieller Systeme, die ihre Datenanalysen und -maßnahmen kommunizieren und koordinieren, um die industrielle Leistung zu verbessern und der Gesellschaft im Ganzen zu dienen.

**5G:** 5G steht für die fünfte Generation des Mobilfunks und ist nach (Parsons et al. 2018) durch folgende (verbesserten) Anwendungsszenarien charakterisiert:

- Verbessertes Mobiles Breitband
- Massive Maschine-zu-Maschine-Kommunikation
- Ultraschnelle und verzögerungsfreie Kommunikation

**nX Redundanz:** Redundanz ist in (BSI 2018) wie folgt definiert: Redundanz ist die Bereitstellung zusätzlicher, über den eigentlichen Bedarf hinaus gehender Systeme. Zwei Beispiele:

- n+1 Redundanz: Diese stellt einem System, dessen Leistungsvermögen 100 % beträgt, ein zweites System zur Seite, dessen Leistungsvermögen ebenfalls 100 % beträgt.
- n+2 Redundanz: Diese ordnet dem primär erforderlichen System zwei gleichwertige leistungsfähige Systeme zu.

### 2.3.1 Steigerung der Leistungsdichten in den Serverräumen

Ein Herausforderung, der sich Rechenzentrumsbetreiber in Zukunft stellen müssen, ist der Anstieg des elektrischen Leistungsverbrauchs auf Rackebene (Ascierto 2018; Emerson Network Power 2012; Geißler und Ostler 2019). Aus diesem Grund werden im Folgenden Entwicklungsszenarien für diesen Bereich entworfen und die damit verbundenen Herausforderungen, Potenziale und Hemmnisse diskutiert. Grundlage der Diskussion verschiedener Szenarien sollen unterschiedliche Entwicklungsprognosen des Parameters der elektrischen Leistungsaufnahme auf Rackebene sein.

Einer der Hauptgründe für den Trend einer im Allgemeinen stetig ansteigenden elektrischen Leistungsdichte auf Rack-Ebene liegt zum einen in verbesserten Kühltechnologien, welche es ermöglichen, die mit hohen Temperaturen verbundenen IT-Komponenten effizienter zu kühlen. Zum anderen kann durch eine dichtere „Bepackung“ und damit verbundener erhöhter Leistungsaufnahme der Racks Whitespace (Serverraum-Fläche) eingespart werden. Werden durch eine derartige Konsolidierung Kapazitäten frei, können diese für die Unterbringung zusätzlicher IT-Komponenten genutzt werden. Damit können bereits angebotene IT-Dienste breiter skaliert, neue IT-Dienste angeboten und das gesamte Dienst Angebot performanter und breiter aufgestellt werden. Wird sich beim Neubau eines Rechenzentrums bereits für eine dichtere Bepackung der Racks entschieden, kann dies enorme monetäre Einsparungen bieten. Nach (Gruchot 2015b) liegt der Investitions-Preis pro m<sup>2</sup> eines TIER3 (i.e. Verfügbarkeitsklasse 3) Rechenzentrums im Bereich von 11.000 €. Wird durch diese Maßnahmen die Whitespace Fläche im Bereich von 100 m<sup>2</sup> bei der Planung reduziert, können dadurch Kosten im Bereich von 1.000.000€ eingespart werden. Des Weiteren sollte erwähnt werden, dass der Anstieg der elektrischen Leistungsaufnahme auf Rackebene auch mit der inhärent-technischen Entwicklung immer leistungstärkerer IT-Komponenten zusammenhängt.

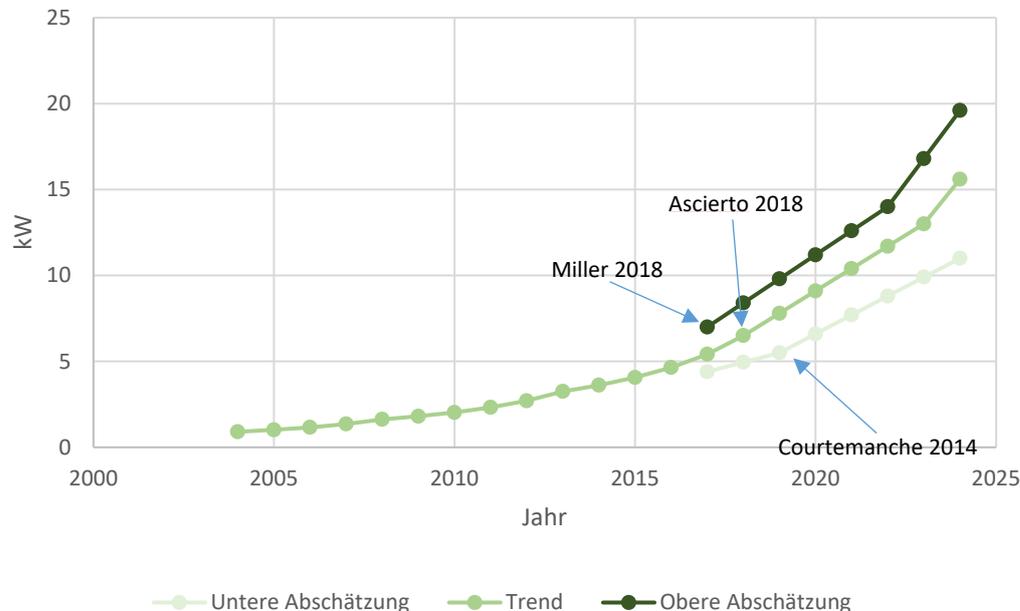


Abbildung 11: ø-Leistungsaufnahme pro Rack

Abbildung 11 zeigt drei mögliche Verläufe der durchschnittlichen Leistungsaufnahme pro Rack. Als Grundlage für die Verläufe wurde angenommen, dass sich die durchschnittliche elektrische

Leistungsaufnahme alle 5 Jahre verdoppelt, was nach einer Expertenmeinung aus (Courtemanche 2014) als plausibler Wert angenommen wurde. Der mittlere Verlauf stellt den momentanen Trend dar. Ausgangspunkt hierfür ist eine Abschätzung für den aktuellen Wert (2018), der sich aus Zahlen aus (Ascierto 2018) ergab und mit 6,5 kW/Rack abgeschätzt wurde. Des Weiteren wurde eine untere Abschätzung nach Expertenmeinung aus (Courtemanche 2014) mit einem Wert von 5,5 kW/Rack für 2019 und eine obere Abschätzung nach Expertenmeinung aus (Miller 2018) mit einem Wert von 7 kW/Rack für 2017 gewählt. Der Verlauf dieser beiden Abschätzungen beginnt ab dem Jahr 2017. Diese Verläufe sollen im Folgenden dabei helfen, zu prognostizieren, welche Herausforderungen, Probleme beziehungsweise Veränderungen sich vor allem im Betrieb der Rechenzentrumsinfrastruktur durch die veränderten Voraussetzungen ergeben. Außerdem wird ebenfalls diskutiert, inwieweit eine intensivere Nutzung der freien Kühlung im Rahmen der veränderten Voraussetzungen sinnvoll ist. Allen drei Abschätzungen ist gemein, dass in den kommenden 5 Jahren die 10 kW Grenze überschritten wird. Für die untere Abschätzung ist dieser Wert ab dem Jahr 2023, für den Trend-Verlauf ab dem Jahr 2021 und für die obere Abschätzung ab dem Jahr 2019 erreicht.

Eine Überschreitung dieses Wertes wird zur Folge haben, dass viele momentan noch etablierte Kühltechnologien an ihre Leistungsgrenze geraten. Laut (Capozzoli und Primiceri 2015) eignen sich traditionelle Raumkühlkonzepte bis zu einem Wert von ca. 5 kW. Die heute gängigen Methoden der Warm-/Kaltgang Einhausungen mit Luftzufuhr über Doppelböden können Leistungsaufnahmen bis ca. 10 kW versorgen. Ab 10 kW sollten reihen- beziehungsweise rackbasierte Kühllösungen in Betracht gezogen werden. Grundgedanke dieser Lösungen ist, statt einiger weniger CRAH (Computer Room Air Handler) Einheiten, welche im Raum verteilt die Kaltluftzufuhr über relativ lange Strecken über den Doppelboden liefern, die CRAH Einheiten modular in den Reihen bzw. an den Racks anzubringen. Hauptgründe für die erhöhte Kühlkapazität liegen in der erhöhten Flexibilität beziehungsweise Skalierbarkeit der Kühleinheiten und den kürzeren Wegen der Kältequellen zu den Kältesenken (IT-Komponenten). Als positive Nebeneffekte ergeben sich außerdem eine individuelle Anpassbarkeit der Kühlkapazität und Redundanz auf Reihen- beziehungsweise Rackebene und im Falle einer rackbasierten Kühllösung wäre keine Einhausung notwendig. Eine weitere hocheffiziente Kühloption ist die sogenannte „on-chip Kühlung“ auf die hier jedoch nicht näher eingegangen werden soll, da diese momentan als Nischen-Technologie nicht weit verbreitet ist und ein künftiger verbreiteter Einsatz dieser Technologie schwer einzuschätzen ist.

Die erhöhte mittlere elektrische Leistungsaufnahme pro Rack impliziert zudem höhere Temperaturen innerhalb der Racks. Dies ermöglicht prinzipiell ebenfalls eine Erhöhung der Einlasstemperaturen der innerhalb der Racks positionierten Server. Diese Temperaturerhöhung hätte wiederum zur Folge, dass vermehrt auf einen Frei-Kühl Betrieb zurückgegriffen werden könnte. Wäre es beispielsweise möglich, die Ansaugtemperatur von 24°C auf 26°C anzuheben, könnte man eine derartige Temperaturerhöhung auch auf die Obergrenze zur Nutzung der freien Kühlung anwenden. Eine Frei-Kühl Obergrenze von bisher 18°C könnte durch diese Maßnahme auf 20°C erhöht werden. In der Folge erhöht sich die Stundenzahl im Jahr, in der freie Kühlung genutzt werden kann, was zu erheblichen Kühlkosteneinsparungen führt. Jedoch sollten an dieser Stelle ebenfalls die Probleme angeführt werden, die eine derartige Maßnahme mit sich bringt. Um die aufgrund erhöhter elektrischer Leistungsaufnahme größeren Wärmemengen aus den Racks abzuführen ist eine höhere Kühlleistung von Nöten. Dies wird im Allgemeinen durch eine Vergrößerung der Spreizung (i.e. Temperaturdifferenz zwischen angesaugter und abgegebener Luft) oder Erhöhung des Massenstroms der Kühlluft erreicht. Eine Erhöhung der Spreizung ist meistens nicht möglich, da Serverhersteller diese unabhängig von der Eingangstemperatur fix wählen. Eine Erhöhung des Luftmassenstroms hat einen erhöhten Energieverbrauch und einen möglichen Garantieverlust mit dem Einkaufsvertragspartner des Servers zur Folge. Außerdem bedingen laut (Torell et al. 2016) höhere Temperaturen unter Anderem oft eine Überdimensionierung der CRAH Anlagen und zusätzlich eine Erhöhung der Ausfallwahrscheinlichkeit der IT-Komponenten. Ebenfalls werden Reaktionszeiten für kritische Wartungsarbeiten im Falle eines Kühlsystemausfalls verkürzt und die Arbeitsbedingungen für im Whitespace arbeitendes Personal

verschlechtert. Diese letztgenannten beiden Probleme verschärfen sich weiterhin, wenn Warmgangeinhausungen benutzt werden.

Ebenfalls werden Anforderungen an die Art der elektrischen Leistungszuführung auf Rackebene ansteigen. Im Allgemeinen werden mehr bzw. breitere Stromzuleitungen zu den Racks und damit mehr verbaute Sicherungen nötig sein. Nach (Rasmussen 2006) ergeben sich beispielsweise als Optionen für 7,4 kW zwei Zuleitungen mit 230 V und 16 A, für 11 kW hingegen drei Zuleitungen mit 230 V und 16 A. Durch die höheren Stromflüsse wird der zuverlässige Betrieb der Racks beziehungsweise der darin enthaltenen IT-Komponenten erschwert. Innerhalb der Racks ergeben sich mehr Stromversorgungspfade für die Komponenten, was u.A. die Fehleranfälligkeit des Betriebs beispielsweise durch das Lösen von Sicherungen erhöht. Im Allgemeinen müsste mit einem erhöhten Wartungsaufwand gerechnet werden. Abhilfe können in diesem Fall intelligente Rack-PDU schaffen, welche eine feingranulare Fernsteuerung der Anschlüsse und Überwachung der Strom- und Leistungsflüsse bieten.

### 2.3.2 Zentralisierung und Konsolidierung hin zu großen Rechenzentrumsstrukturen

Nach Einschätzung von Experten von Gartner und Borderstep ist ein Trend der Migration von IT-Infrastrukturen hin zu Public-Cloud oder Colocation Rechenzentren erkennbar (Gartner Inc. 2019) (Hintemann 2012). Analysten von Gartner gehen von einer starken Konsolidierung der Public-Cloud Anbieter bis ins Jahr 2023 aus. Dies hat zur Folge, dass sich die Anzahl großer, mit hohen elektrischen Anschlussleistungen verbundener Rechenzentren erhöhen wird.

Mittelständische Unternehmen sehen darin Vorteile wie die Übergabe des IT-Infrastrukturbetriebs an „Profis“ oder aber auch eine damit verknüpfte Erhöhung der IT-Sicherheit. Auch kommunale Rechenzentrumsbetreiber in Baden-Württemberg wie die *ITEOS Anstalt des Öffentlichen Rechts* gaben als Gründe für ihren Zusammenschluss Vorteile wie die Vereinheitlichung von Fachverfahren oder Kosteneinsparungen an.

Vorteile für die Betreiber solcher zentralisierten Rechenzentren liegen im „Right-sizing“, also der optimal an die zu erwartende Arbeitslast der IT angepasste Infrastruktur und damit verknüpfter Geschäftsmodelle. Im Public Cloud Bereich gibt es beispielsweise für bestimmte Software Dienste oder virtuelle IT-Infrastruktur eine Vielzahl an Bezahlmodellen über welche diese zeitlich und quantitativ flexibel gebucht werden können. Im Bereich Colocation stellen Rechenzentrumsbetreiber Serverraumfläche und sonstige für den Betrieb der IT nötige Infrastruktur bereit. Unternehmen haben hier beispielsweise die Möglichkeit abhängig von der Verfügbarkeitsklasse des Rechenzentrums oder der Art der Unterbringung der IT-Komponenten (bspw. Colocation Käfig) ein passendes Colocation Rechenzentrum zu wählen.

Im Falle der Public Cloud muss bedacht werden, dass Teile der eigenen Datensouveränität an Dritte abgegeben werden. Die führenden Public Cloud Unternehmen sind US-amerikanisch geführt und bieten prinzipiell die Möglichkeit Daten persistent an ihren europäischen Standorten (e.g. Frankfurt am Main) abzulegen und gewährleisten somit prinzipiell ein DSGVO kompatibles Verhalten. Nichtsdestotrotz ist auch in diesem Fall der vollständige Schutz der Daten nicht gewährleistet, da beispielsweise Gesetze wie der US CLOUD Act (United States of America 2018) ausländischen Behörden in begründeten Verdachtsfällen Zugriff auf Daten auch im deutschen Hoheitsgebiet erlauben.

### 2.3.3 Aufkommen dezentral verteilter Kleinstrechenzentren

Analysten von Gartner und dem Magazin CIO gehen von einem zweiten transformatorischen Trend in der Entwicklung der Rechenzentrumslandschaft aus, welcher noch am Anfang seiner Entwicklung steht (Gartner Inc. 2019), (Thorenz 2019). Dieser Trend ist mit dem Versuch verknüpft, den rasant anwachsenden Anforderungen an die Verlagerung der Rechenkapazität an den Ort der Entstehung der Information, zu genügen. In der Praxis soll sich dies in Form von sogenannten Kleinst-Rechenzentren, auch Edge-Rechenzentren (Edge-RZ) genannt, umsetzen lassen. Aufgrund ihrer geringen Größe können Edge-RZ flexibel an Orten der Entstehung von Daten installiert und vernetzt werden. Die damit zu lösenden Probleme sind vielfältig und reichen von geringen Latenzzeitanforderungen bei der Verarbeitung von Daten über Filterungen großer Datenmengen auf dem Weg hin zu den großen Cloud

Anbietern bis hin zur Beibehaltung der Datenhoheit über die selbst generierten Daten. Damit verbundene Anwendungsfelder sind unter anderem das Autonome Fahren, Smart-City-, Smart-Factory-Anwendungen (auch als IIoT bekannt) oder auch VR (Virtual-Reality). Um Edge-RZ flächendeckend installieren zu können, ist zusätzlich eine enorme Neuaufstellung der Infrastruktur nötig. Ein ausgebautes Glasfaser- und 5G-Netz, funktionierende Stromzufuhr und potenziell zu verwendende Energieabfuhr (i.e. Abwärmenutzung) sind hinreichende Voraussetzungen. Neben starken Unsicherheiten in der Prognose des Umfangs solcher Maßnahmen aus juristischer, staatlicher und unternehmerischer Sicht, ergeben sich zusätzlich Fragen in den Bereichen der Anzahl der zu erwartenden Edge-RZ, des geschätzten Datenaufkommens, den genauen Anwendungen und den damit verbundenen elektrischen Leistungsaufnahmen. Beispielsweise müsste beim Autonomen Fahren hinsichtlich der Härte der Echtzeitanforderung und der Art der Anwendung die Frage beantwortet werden, welche Rechenoperationen ‚on-board‘ im Fahrzeug oder an einem nahe gelegenen „Edge-Knoten“ durchgeführt werden sollten bzw. müssen.

Begründet durch die Vielfalt an unsicheren Parametern in der Entwicklungsprognose und des transformatorischen Potenzials hinsichtlich der Architektur der Rechenzentren-Landschaft sollen in diesem Kapitel Szenarien mit dem Schwerpunkt der Transformation durch Edge-Computing bzw. Edge-Rechenzentren erarbeitet werden. Aufgrund der im Vergleich zu anderen Parametern noch als leichter einzuschätzenden Berechenbarkeit und der wichtigen Stellung im Projekt wurde das Hauptaugenmerk bei den Berechnungen auf den Parameter der Gesamtenergieaufnahme gelegt.

Um die Anzahl an Freiheitsgraden weiter einzuschränken, wurde sich auf zwei Anwendungsbereiche konzentriert, die in noch schwacher Ausprägung heute schon auf Landesebene vorangetrieben werden. Dies ist zum einen das ‚Autonome Fahren‘, für welches bereits durch den Gesetzgeber auf Bundesebene erste Weichenstellungen gelegt wurden (BMVI 2017) und zum Anderen die ‚Smart-City‘, dessen Begriff beispielsweise in der Stadt Karlsruhe bereits seit einigen Jahren auf der Agenda steht (Wirtschaftsförderung Stadt Karlsruhe 2014).

#### 2.3.3.1 Getroffene Annahmen und Berechnungsmethodik

Für die Berechnungen wurden folgende Werte bzw. Quellen verwendet:

- Für die Berechnung des Gesamtenergiebedarfs für Rechenzentren in Deutschland im Jahr 2025 werden Daten aus (Hintemann 2016) verwendet. Für die Umrechnung dieses Wertes auf das Land Baden-Württemberg wurden die in Branchen der IT-Dienstleistung beschäftigten Menschen in Land und Bund in Relation gesetzt (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2016). Für den Gesamtenergiebedarf der Rechenzentren in Baden-Württemberg ergab sich damit

$$E_{ges,RZ} = 2,77 \text{ TWh/a}$$

*Formel 4: Gesamte in RZ in Baden-Württemberg verbrauchte Energie, Prognose für 2025*

- Für die Dichte an Edge-RZ entlang Autobahnabschnitten wurde ein Wert von 20km verwendet.

$$d_{Autobahnen} = 20 \text{ km}$$

*Formel 5: Edge-RZ Dichte entlang Autobahnen*

Da es aufgrund der Schwierigkeit einer realistischen Prognose dieses Wertes zu finden keine verlässlichen Quellen und Publikationen gibt, wurde dieser Wert in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner ‚ICT Facilities‘ geschätzt.

- Zur Berechnung von Straßenlängen wurde einerseits (OpenStreetMap Foundation 2020) für die Berechnung von Autobahnlängen und andererseits (Stadt Stuttgart 2020) für die Berechnung von Straßenlängen in Städten verwendet. Dabei wurden die den Stadtbezirken zugeordneten Kreisstraßen, Gemeindestraßen, Verbindungsstraßen und S-Bahn-Strecken verwendet. Standen für gewisse Städte keine festen Daten bereit, erfolgte eine Umrechnung

mit Hilfe von (Stadt Stuttgart 2020) über die Größe der Stadtbezirke. Für die Gesamtlänge der Bundesautobahnen in Baden-Württemberg ergibt sich daraus folgender Wert:

$$l_{\text{Autobahnen}} = 842,2 \text{ km}$$

*Formel 6: Gesamtlänge der Autobahnen in Baden-Württemberg*

- Für die Dichte der mit den Edge-RZ verbundenen 5G Sende-Masten wurde 2km und eine ‚n+1‘ Redundanz gewählt. Diese kurze Reichweite ergibt sich aus der stärkeren Dämpfung hochfrequenter Wellen, welche zunächst im Bereich der ersten zur Verfügung stehenden Frequenzbänder bei 2,1GHz und 3,6GHz liegen werden. Der Wert für die Reichweite ergab sich als Schätzwert auf Grundlage von Expertenaussagen des Mobilfunkgipfel 2018 (BITKOM 2018a) (ca. 1km bei 3,6GHz), der Gesetzmäßigkeit einer mit abnehmender Frequenz erhöhten Sendereichweite (2,1GHz vs. 3,6GHz) und potenziell einsetzbarer reichweiteerhöhender Techniken wie MIMO oder Beamforming. Der Wahl eines Schätzwertes liegt die Tatsache zugrunde, dass eine exakte Angabe der Reichweite in Abhängigkeit der Sendefrequenz aus vielerlei Hinsicht nicht zielführend ist, da die Datenübertragungsrate proportional zur Entfernung abnimmt und Faktoren wie die Antennenhöhe des Funkmasts, Wetter, Umgebungshindernisse und die Mobilität des Empfängers räumlich und zeitlich variieren und ebenfalls eine Rolle in der exakten Berechnung spielen würden. Zusammengefasst wurde sich, auch vor dem Hintergrund maximaler Verfügbarkeit und Echtzeitanforderungen, auf den kleinsten möglichen Wert festgelegt:

$$d_{5G} = 1 \text{ km}$$

*Formel 7: Abschätzung des Abstands zw. 5G Masten*

- Um eine Abschätzung über Potenziale zur Abwärmenutzung geben zu können, wurden auf Durchschnittsverbräuche und Heizölpreise aus (Koch 2017) zurückgegriffen. Als Schätzwerte für den äquivalenten Energieaufwand pro Liter Heizöl und den durchschnittlichen Heizölverbrauch in Liter pro 2-Personen-Haushalt pro Jahr ergab sich:

$$\tilde{E}_{\text{Heizöl,äquiv}} = 10 \text{ kWh/l}$$

*Formel 8: Geschätzter Energieaufwand pro Liter Heizöl*

$$\tilde{V}_{\text{Heizöl}} = 1250 \text{ l/(a * Wohnung)}$$

*Formel 9: Geschätzter Heizölverbrauch pro Haushalt*

- Um Durchschnittsgrößen und durchschnittliche Leistungsaufnahmen für Edge-RZ zu erhalten, wurden Daten der ‚edge\_data\_center\_konfigurator‘ Web-Applikation (Rittal 2020) der ‚Rittal GmbH & Co. KG‘ verwendet. Hier ist anzumerken, dass für die Schränke in Edge-RZ mit ‚Smart-City‘ Bezug in den hier vorgestellten Szenarien eine geringere Leistungsdichte als in den Schränken mit Bezug auf ‚Autonomes Fahren‘ gewählt wurde. Begründet liegt dies in der Tatsache, dass für ‚Smart-City Applikationen‘ wie ‚Intelligente Müllentsorgung‘ oder ‚Kluge Verkehrsleitsysteme‘ weder das hohe Datenaufkommen noch die strikten Echtzeitanforderungen wie beispielsweise bei einer Kolonnensteuerung im ‚Autonomen Fahren‘ Bereich erwartet werden (Yuan et al. 2018). Für die durchschnittlichen el. Leistungsaufnahmen eines Edge-RZ zur Steuerung von Aufgaben im ‚Autonomen Fahren‘ Bereich bzw. zur Steuerung von Aufgaben im ‚Smart-City‘ Bereich ergaben sich damit:

$$P_{\text{Edge-RZ,autonom}} = 16,5 \text{ kW}$$

*Formel 10: Durchschn. el. Leistungsaufnahme eines Edge-RZ im "Autonomen Fahren" Bereich*

$$P_{\text{Edge-RZ,smart-city}} = 8,25 \text{ kW}$$

*Formel 11: Durchschn. el. Leistungsaufnahme eines Edge-RZ im "Smart City" Bereich*

An diesem Punkt sei angemerkt, dass sich diese Edge-RZ in Kategorie 2 der Kategorisierung in Kapitel 2.2.2 wiederfinden. Das heißt, diese Rechenzentren können die Größe kleiner Hochschul-Rechenzentren besitzen.

- Um Vergleichswerte wie die derzeit in Deutschland bzw. Baden-Württemberg zugelassene Anzahl an elektrifizierten Pkws und deren durchschnittliche elektrische Energieaufnahme pro Jahr zu erhalten, wurden außerdem die Quellen (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2020b), (Bollmann und Neuhausen 2018), (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, www.bmub.bund.de 2016), (Kraftfahrtsbundesamt 2020b), (Kraftfahrtsbundesamt 2020a) herangezogen. Die sich daraus für Baden-Württemberg ergebenden relevanten Zahlen sind die durchschnittliche Laufleistung eines elektrifizierten Pkws pro Jahr:

$$\tilde{d}_{\text{Laufleistung}} = 12000 \text{ km}$$

*Formel 12: Durchschn. Laufleistung eines ePkw in Deutschland*

Der durchschnittliche Energieverbrauch eines Elektro-Pkws pro 100 km:

$$\bar{E}_{ePkw,a} = 20 \text{ kWh}/100 \text{ km}$$

*Formel 13: Durchschn. Energieverbrauch eines ePkw in Deutschland*

Und der Wert für die derzeit in Baden-Württemberg (Stichtag 01.01.2020) zugelassenen Elektro-Pkws:

$$n_{ePkw} = 24863$$

*Formel 14: Anzahl zugelassener ePkw in Baden-Württemberg, Stand 01.01.2020*

### 2.3.3.2 Berechnungsmethodik

Um die gesamte in den Edge-RZ verbrauchte Energie in Mrd. kWh/a in dem jeweiligen Szenario abzuschätzen, ergibt sich unter Zuhilfenahme von Formel 6, Formel 10, Formel 11 und nach der Definition folgender Größen:

- Die Dichte der installierten Edge-RZ auf Autobahnen (in km):

$$d_{\text{Autobahnen}} = 20 \text{ km}$$

*Formel 15: Edge-RZ Dichte an Autobahnen in Baden-Württemberg*

- Die Gesamtlänge der im letzten Abschnitt definierten Straßen in Stadt  $i$  (in km):

$$l_{\text{Stadt}_i}$$

Dieser Wert wird in jedem vorgestellten Szenario variiert.

- Die Dichte der installierten Edge-RZ in Städten (in km):

$$d_{\text{Stadt}}$$

Dieser Wert wird in jedem vorgestellten Szenario variiert.

- Der konstante Umrechnungsfaktor von kW auf Mrd. kWh/a:

$$k_0 = 8760 \text{ h/a}$$

- Die Gesamtanzahl der an Autobahnen installierten Edge-RZ. entspricht dem aufgerundeten Quotienten aus  $l_{\text{Autobahnen}}$  und  $d_{\text{Autobahnen}}$ :

$$n_{\text{Autobahnen}} = 42$$

- Die Gesamtanzahl der in Stadt  $i$  installierten Edge-RZ:

$$n_{Stadt,i}$$

Dieser Wert wird in jedem vorgestellten Szenario variiert und hängt sowohl von dem Wert  $l_{Stadt_i}$  als auch  $d_{Stadt}$  ab (i.e. der Quotient).

Folgende Gleichung:

$$\begin{aligned}
 & E_{gesEdge}(l_{Autobahnen}, d_{Autobahnen}, l_{Stadt_1}, \dots, l_{Stadt_n}, d_{Stadt}, P_{Edge-RZ,autonom}, P_{Edge-RZ,smart-city}) \\
 &= E_{gesAutobahnen}(l_{Autobahnen}, d_{Autobahnen}, P_{Edge-RZ,autonom}) * k_0 + \\
 &+ E_{gesStadt}(l_{Stadt_1}, \dots, l_{Stadt_n}, d_{Stadt}, P_{Edge-RZ,autonom}, P_{Edge-RZ,smart-city}) * k_0
 \end{aligned}$$

Formel 16: Gesamte Energieaufnahme in den Edge-RZ

wobei:

$$\begin{aligned}
 & E_{gesAutobahnen}(l_{Autobahnen}, d_{Autobahnen}, P_{Edge-RZ,autonom}) \\
 &= n_{Autobahnen}(l_{Autobahnen}, d_{Autobahnen}) * P_{Edge-RZ,autonom}
 \end{aligned}$$

Formel 17: Gesamte Energieaufnahme in den Edge-RZ an Autobahnen

und:

$$\begin{aligned}
 & E_{gesStadt}(l_{Stadt_1}, \dots, l_{Stadt_n}, d_{Stadt}, P_{Edge-RZ,autonom}, P_{Edge-RZ,smart-city}) \\
 &= \sum_{i=1}^n n_{Stadt_i}(l_{Stadt_i}, d_{Stadt}) * (P_{Edge-RZ,autonom} + P_{Edge-RZ,smart-city})
 \end{aligned}$$

Formel 18: Gesamte Energieaufnahme in den Edge-RZ in den Städten

In den Szenarien wurden die RZ-Dichten in den Städten wesentlich höher gewählt als an den Autobahnen. Zum einen ist die Verkehrslage in den Städten wesentlich facettenreicher. So sind Fahrmanöver wie auch Fahrprofile wesentlich komplexer. Außerdem müssen wesentlich mehr externe Interaktionen mit e.g. Fußgängern in Betracht gezogen werden. Zum anderen erschwert die stärkere Abschirmung von Funkwellen durch Gebäude in den Städten die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Funkmast, was zu zusätzlichen 5G-Masten und damit potenziell zu ebenfalls mehr Edge-RZ führt.

In den folgenden Auswertungen wurde nur einmal die Tendenz bzgl. der Realisierbarkeit des jeweiligen Szenarios **bis ins Jahr 2025** vom Projekt-Konsortium als realistisch eingeschätzt (Szenario 1). Nichtsdestotrotz bleibt diese Einschätzung, aufgrund der diskutierten immensen Schwierigkeiten der Vorhersage, mit großer Unsicherheit behaftet. Alle anderen diskutierten Szenarien dürften einen Realisierbarkeitshorizont besitzen, der über 2025 hinausragt.

Neben der gesamten im Edge verbrauchten Energie  $E_{gesEdge}$  im Jahr werden in den Szenarien noch weitere Größen berechnet. Der Gesamtenergieverbrauch im Edge bezogen auf den Gesamtenergieverbrauch der Rechenzentren in Baden-Württemberg (Referenzjahr 2025) in Prozent:

$$perc = \frac{E_{gesEdge}}{E_{ges,RZ}} * 100 \%$$

Formel 19: Prozentuale Gesamtenergieaufnahme in den Edge-RZ

Die für das Szenario nötige Anzahl an 5G-Masten (2km Abstand untereinander, da 1km Sendereichweite und ,n+1' Redundanz):

$$n_{Masten,5G} = \left\lceil \frac{l_{Autobahnen} + \sum_{i=1}^n l_{Stadt_i}}{d_{5G} * 2} \right\rceil * 2$$

Formel 20: Anzahl installierter 5G Masten

Die Anzahl potenziell mit Abwärme versorgter Wohnungen:

$$n_{Wohnungen,Abwärme} = \left\lfloor \frac{E_{gesEdge}}{\tilde{E}_{Heizöl,äquiv} * \tilde{V}_{Heizöl}} \right\rfloor$$

Formel 21: Potenziell mit Abwärme versorgte Wohnungen

Die ‚Äquivalente Elektro-Pkw Anzahl‘ entspricht der sich aus durchschnittlichen Energieverbrauchswerten von Elektro-Pkws ergebenden Gesamtanzahl, unter der Voraussetzung, dass die Gesamtenergieverbräuche in den Edge-RZ (mit ‚Bezug auf Autonomes Fahren‘) und die Gesamtenergieverbräuche der Elektro-Pkws auf das Jahr bezogen gleich sein sollen:

$n_{ePkw,äquiv}$ :

$$n_{ePkw,äquiv} * \tilde{d}_{Laufleistung} * \bar{E}_{ePkw} = \sum_{i=1}^n (n_{Stadt_i} (l_{Stadt_i}, d_{Stadt}) + n_{Autobahnen}) * P_{Edge-RZ,autonom}$$

Formel 22: Berechnung der äquivalenten ePkw Anzahl

### 2.3.3.3 Szenario 1

Dieses Szenario betrachtet nur den Fall, dass Edge-RZ Infrastruktur an den Bundesautobahnen in Baden-Württemberg installiert wurde.

Tabelle 4: Resultate des Szenario 1

$E_{gesEdge}$ in Mrd. kWh/a	0,006
Prozentualer Energieverbrauch in %	0,219
Nötige 5G-Masten	844
Potenziell mit Abwärme versorgte Wohnungen	0
Äquivalente Elektro-Pkw Anzahl	2529

Der prozentuale Energieanteil ist marginal und ebenfalls ließen sich mit diesem Energiebetrag durchschnittlich nur ca. 10 % der derzeit in BW zugelassenen e-Pkws betreiben. Größte Herausforderung zur Realisierung dieses Szenarios wäre, wenn man nur die technische Sichtweise zulässt, der Aufbau der begleitenden Infrastruktur. I.e. ein ausgebautes 5G- und Glasfasernetz wie auch eine hochverfügbare Stromzufuhr.

### 2.3.3.4 Szenario 2

Dieses Szenario betrachtet neben dem Fall der verfügbaren Installation von Edge-RZ Infrastruktur an den Bundesautobahnen in Baden-Württemberg auch den Fall, dass eine derartige Installation sowohl für Anwendungen aus dem Bereich des ‚Autonomen Fahrens‘ wie auch aus dem Bereich der ‚Smart-City‘ in ganz Stuttgart zur Verfügung steht. Die Edge-RZ Dichte in der Stadt beträgt 5 Kilometer.

Tabelle 5: Zusätzliche Parameter des Szenario 2

$l_{Stadt_1}$ (Stuttgart) in km	1435
$n_{Stadt_1}$ (Stuttgart)	287
$d_{Stadt}$ in km	5

Dies liefert folgende Ergebnisse:

Tabelle 6: Resultate des Szenario 2

$E_{gesEdge}$ in Mrd. kWh/a	0,068
Prozentualer Energieverbrauch in %	2,469
Nötige 5G-Masten	2278
Potenziell mit Abwärme versorgte Wohnungen	6638
Äquivalente Elektro-Pkw Anzahl	19814

Der prozentuale Energieanteil ist nach wie vor gering. Jedoch entspräche der Energiebetrag zum Betrieb von Edge-RZ mit Bezug zum ‚Autonomen Fahren‘ bereits 80 % der Energie zum Betrieb der derzeit in BW zugelassenen e-Pkws. Neben riesiger Herausforderungen aus juristischer, unternehmerischer und staatlicher Sicht, wäre hier der Aufbau der begleitenden Infrastruktur (i.e. ein ausgebautes 5G- und Glasfasernetz wie auch eine hochverfügbare Stromzufuhr) folgerichtig um weitere Größenordnungen höher einzustufen als im Szenario 1. Im Falle der Anzahl an benötigten 5G-Masten wäre dies ein Faktor 3. Im Falle der Abwärmenutzung ergeben sich durch die Verfügbarkeit von Edge-RZ mitten in der Stadt neue Möglichkeiten. Durch effiziente Platzierung an oder in Gebäuden ließen sich Verluste bei der Wärmeübertragung verringern und somit das Potenzial einer Verwendung von RZ Abwärme in der Gebäudebeheizung erhöhen.

#### 2.3.3.5 Szenario 3

Dieses Szenario betrachtet neben dem Fall der verfügbaren Installation von Edge-RZ Infrastruktur an den Bundesautobahnen in Baden-Württemberg auch den Fall, dass eine derartige Installation sowohl für Anwendungen aus dem Bereich des ‚Autonomen Fahrens‘ wie auch aus dem Bereich der ‚Smart-City‘ in ganz Stuttgart zur Verfügung steht. Die Edge-RZ Dichte in der Stadt beträgt 2,5 Kilometer.

Tabelle 7: Zusätzliche Parameter des Szenario 3

$l_{Stadt_1}$ (Stuttgart) in km	1435
$n_{Stadt_1}$ (Stuttgart)	574
$d_{Stadt}$ in km	2,5

Dies liefert folgende Ergebnisse:

Tabelle 8: Resultate des Szenario 3

$E_{gesEdge}$ in Mrd. kWh/a	0,130
Prozentualer Energieverbrauch in %	4,719
Nötige 5G-Masten	2278
Potenziell mit Abwärme versorgte Wohnungen	13275
Äquivalente Elektro-Pkw Anzahl	37098

Die Werte der relevanten Parameter haben sich im Vergleich zu Szenario 2 beinahe verdoppelt, da die Packungsdichte der Edge-RZ in der Stadt verdoppelt wurde. Die Linearität wird nur leicht von dem Energiebeitrag der an den Autobahnen installierten Edge-RZ beeinflusst. Die Dimensionen der zu lösenden Probleme und Herausforderungen bleiben, wie unter Szenario 2 dargelegt, gleich. Des Weiteren verbrauchen in diesem Szenario bereits die Edge-RZ mit Bezug zum ‚Autonomen Fahren‘ einen signifikant höheren Anteil an Energie als die derzeitige e-Pkw Flotte in BW (i.e. Energiemehrverbrauch im Bereich des Betriebs von 13.000 e-Pkws).

#### 2.3.3.6 Szenario 4

Dieses Szenario betrachtet neben dem Fall der verfügbaren Installation von Edge-RZ Infrastruktur an den Bundesautobahnen in Baden-Württemberg auch den Fall, dass eine derartige Installation sowohl für Anwendungen aus dem Bereich des ‚Autonomen Fahrens‘ wie auch aus dem Bereich der ‚Smart-

City' in ganz Stuttgart, Karlsruhe und Mannheim zur Verfügung steht. Die Edge-RZ Dichte in den Städten beträgt 5 Kilometer.

Tabelle 9: Zusätzliche Parameter des Szenario 4

$l_{\text{Stadt}_1}$ (Stuttgart) in km	1435
$n_{\text{Stadt}_1}$ (Stuttgart)	287
$l_{\text{Stadt}_2}$ (Karlsruhe) in km	1200
$n_{\text{Stadt}_2}$ (Karlsruhe)	240
$l_{\text{Stadt}_3}$ (Mannheim) in km	1003
$n_{\text{Stadt}_3}$ (Mannheim)	201
$d_{\text{Stadt}}$ in km	5

Dies liefert folgende Ergebnisse:

Tabelle 10: Resultate des Szenario 4

$E_{\text{gesEdge}}$ in Mrd. kWh/a	0,164
Prozentualer Energieverbrauch in %	5,926
Nötige 5G-Masten	4482
Potentiell mit Abwärme versorgte Wohnungen	12628
Äquivalente Elektro-Pkw Anzahl	46373

Der prozentuale Energieanteil besitzt nun eine gewisse Signifikanz (ca. 6 %). Ebenfalls wird in den Edge-RZ mit Bezug auf ‚Autonomes Fahren‘ bereits ca. doppelt so viel Energie aufgewendet als von der derzeitigen e-Pkw Flotte in BW verbraucht wird. Interessant ist, dass sich der Gesamtenergieverbrauch gegenüber Szenario 3 um nur 25 % erhöht hat, obwohl sowohl die zweit- als auch die drittgrößte Stadt Baden-Württembergs in die Berechnungen zusätzlich integriert wurden. Der Grund dafür liegt in der doppelt so hohen Packungsdichte der Edge-RZ innerhalb der Stadt in Szenario 3. Die Dimensionen der zu lösenden Probleme und Herausforderungen bleiben, wie unter Szenario 2 dargelegt, gleich.

### 2.3.3.7 Szenario 5

Dieses Szenario betrachtet neben dem Fall der verfügbaren Installation von Edge-RZ Infrastruktur an den Bundesautobahnen in Baden-Württemberg auch den Fall, dass eine derartige Installation sowohl für Anwendungen aus dem Bereich des ‚Autonomen Fahrens‘ wie auch aus dem Bereich der ‚Smart-City‘ in ganz Stuttgart, Karlsruhe und Mannheim zur Verfügung steht. Die Edge-RZ Dichte in den Städten beträgt 2,5 Kilometer.

Tabelle 11: Zusätzliche Parameter des Szenario 5

$l_{\text{Stadt}_1}$ (Stuttgart) in km	1435
$n_{\text{Stadt}_1}$ (Stuttgart)	574
$l_{\text{Stadt}_2}$ (Karlsruhe) in km	1200
$n_{\text{Stadt}_2}$ (Karlsruhe)	480
$l_{\text{Stadt}_3}$ (Mannheim) in km	1003
$n_{\text{Stadt}_3}$ (Mannheim)	402
$d_{\text{Stadt}}$ in km	2,5

Dies liefert folgende Ergebnisse:

Tabelle 12: Resultate des Szenario 5

$E_{ges_{Edge}}$ in Mrd. kWh/a	0,321
Prozentualer Energieverbrauch in %	11,625
Nötige 5G-Masten	4482
Potentiell mit Abwärme versorgte Wohnungen	25237
Äquivalente Elektro-Pkw Anzahl	90157

Die Werte der relevanten Parameter haben sich im Vergleich zu Szenario 4 verdoppelt, da die Packungsdichte der Edge-RZ in der Stadt verdoppelt wurde. Der Energiebeitrag der an den Autobahnen installierten Edge-RZ entspricht nur einem Bruchteil des Energiebedarfs der Edge-RZ in den Städten. Die Dimensionen der zu lösenden Probleme und Herausforderungen bleiben, wie unter Szenario 2 dargelegt, gleich. Ebenfalls wird in den Edge-RZ mit Bezug auf ‚Autonomes Fahren‘ bereits ca. 3,5-mal so viel Energie aufgewendet als von der derzeitigen e-Pkw Flotte in Baden-Württemberg verbraucht wird.

### 2.3.3.8 Szenario 6

Dieses Szenario betrachtet neben dem Fall der verfügbaren Installation von Edge-RZ Infrastruktur an den Bundesautobahnen in Baden-Württemberg auch den Fall, dass eine derartige Installation sowohl für Anwendungen aus dem Bereich des ‚Autonomen Fahrens‘ wie auch aus dem Bereich der ‚Smart-City‘ in ganz Stuttgart, Karlsruhe, Mannheim, Freiburg und Heidelberg zur Verfügung steht. Die Edge-RZ Dichte in den Städten beträgt 5 Kilometer.

Tabelle 13: Zusätzliche Parameter des Szenario 6

$l_{Stadt_1}$ (Stuttgart) in km	1435
$n_{Stadt_1}$ (Stuttgart)	287
$l_{Stadt_2}$ (Karlsruhe) in km	1200
$n_{Stadt_2}$ (Karlsruhe)	240
$l_{Stadt_3}$ (Mannheim) in km	1003
$n_{Stadt_3}$ (Mannheim)	201
$l_{Stadt_4}$ (Freiburg) in km	1059
$n_{Stadt_4}$ (Freiburg)	212
$l_{Stadt_5}$ (Heidelberg) in km	753
$n_{Stadt_5}$ (Heidelberg)	151
$d_{Stadt}$ in km	5

Dies liefert folgende Ergebnisse:

Tabelle 14: Resultate des Szenario 6

$E_{ges_{Edge}}$ in Mrd. kWh/a	0,243
Prozentualer Energieverbrauch in %	8,771
Nötige 5G-Masten	6294
Potentiell mit Abwärme versorgte Wohnungen	18924
Äquivalente Elektro-Pkw Anzahl	68235

Der Vergleich mit Szenario 5 liefert hier interessante Ergebnisse. Der Energieverbrauch ist um ca. 25 % gesunken, obwohl zwei weitere Großstädte in die Berechnung integriert wurden. Die höhere Edge-RZ Packungsdichte in Szenario 5 übersteigt offensichtlich hinsichtlich des Energieverbrauchs das Hinzukommen zwei weiterer großer Stadtflächen. Folgerichtig wird in den Edge-RZ mit Bezug auf ‚Autonomes Fahren‘ etwas weniger, noch ca. 2,7-mal so viel Energie aufgewendet als von der derzeitigen e-Pkw Flotte in Baden-Württemberg verbraucht wird. Die Anzahl an nötigen 5G-Masten

hingegen liegt in Szenario 6 um etwas mehr als 40 % höher. Grund dafür ist die größere Gesamtstraßenlänge, die in die Berechnungen integriert werden muss. Die Dimensionen der zu lösenden Probleme und Herausforderungen bleiben, wie unter Szenario 2 dargelegt, gleich.

#### 2.3.3.9 Szenario 7

Dieses Szenario betrachtet neben dem Fall der verfügbaren Installation von Edge-RZ Infrastruktur an den Bundesautobahnen in Baden-Württemberg auch den Fall, dass eine derartige Installation sowohl für Anwendungen aus dem Bereich des ‚Autonomen Fahrens‘ wie auch aus dem Bereich der ‚Smart-City‘ in ganz Stuttgart, Karlsruhe, Mannheim, Freiburg und Heidelberg zur Verfügung steht. Die Edge-RZ Dichte in den Städten beträgt 2,5 Kilometer.

Tabelle 15: Zusätzliche Parameter des Szenario 7

$l_{\text{Stadt}_1}$ (Stuttgart) in km	1435
$n_{\text{Stadt}_1}$ (Stuttgart)	574
$l_{\text{Stadt}_2}$ (Karlsruhe) in km	1200
$n_{\text{Stadt}_2}$ (Karlsruhe)	480
$l_{\text{Stadt}_3}$ (Mannheim) in km	1003
$n_{\text{Stadt}_3}$ (Mannheim)	402
$l_{\text{Stadt}_4}$ (Freiburg) in km	1059
$n_{\text{Stadt}_4}$ (Freiburg)	424
$l_{\text{Stadt}_5}$ (Heidelberg) in km	753
$n_{\text{Stadt}_5}$ (Heidelberg)	302
$d_{\text{Stadt}}$ in km	2,5

Dies liefert folgende Ergebnisse:

Tabelle 16: Resultate des Szenario 7

$E_{\text{gesEdge}}$ in Mrd. kWh/a	0,479
Prozentualer Energieverbrauch in %	17,30790374
Nötige 5G-Masten	6294
Potentiell mit Abwärme versorgte Wohnungen	37812
Äquivalente Elektro-Pkw Anzahl	133820

In diesem Szenario wäre die hier verwendete Edge-RZ Energie zur Steuerung von Anwendungen aus dem ‚Autonomen Fahren‘ Bereich um mehr als das fünffache höher als für den Betrieb von Elektro-Pkws in Baden-Württemberg momentan benötigt würde. Ebenfalls würden hier bereits 17 % der gesamten für Rechenzentren (auf das Jahr 2025 bezogen) in Baden-Württemberg aufzuwendenden Energie in die „Edge-Knoten fließen“. Zur vollständigen Funknetzabdeckung wären hier 6.300 Masten von Nöten und ebenfalls würde in den Städten Wärmeenergie produziert, mit welcher potenziell eine Stadt in der Größenordnung von Konstanz versorgt werden könnte (geht man von 2 Personen pro Haushalt bzw. Wohnung aus). Die Dimensionen der zu lösenden Probleme und Herausforderungen bleiben, wie unter Szenario 2 dargelegt, gleich.

#### 2.3.3.10 Diskussion der Ergebnisse

Die vorgestellten Szenarien haben verdeutlicht, dass sich der Strombedarf von Rechenzentren in den Bereich „Edge“ verschieben kann. Wie stark und wann genau diese Transformation sich vollzieht ist noch unklar. Der Unterschied in der Größenordnung der in den Edge-RZ verbrauchten Energien liegt im Bereich von 100, wenn man Szenario 1 mit Szenario 7 vergleicht.

Tabelle 17: Zusammenfassung der prozentualen Energieaufnahmen im Edge in den einzelnen Szenarien

<i>perc</i> (Szenario 1), in Prozent	0,219
<i>perc</i> (Szenario 2), in Prozent	2,469
<i>perc</i> (Szenario 3), in Prozent	4,719
<i>perc</i> (Szenario 4), in Prozent	5,926
<i>perc</i> (Szenario 5), in Prozent	11,625
<i>perc</i> (Szenario 6), in Prozent	8,771
<i>perc</i> (Szenario 7), in Prozent	17,308

Tabelle 17 fasst noch einmal die Ergebnisse der Szenarien, hier konkret die prozentualen Energieaufnahmen im Edge (bezogen auf den Gesamtenergieverbrauch der Rechenzentren in Baden-Württemberg, Prognose 2025), zusammen. Als realistischster Fall bezogen auf einen Umsetzungshorizont 2025 wurde Szenario 1 betrachtet. Der Anteil ist hier sehr moderat (ca. 0,2 %), wohingegen im extremsten Fall bereits mehr als 17 % der Energie in das Edge abwandern würde (Szenario 7). Wie in dem Kapitel diskutiert, würde sich dadurch bereits ein Teil der Rechenzentrums-Topologie, vor allem in den Großstädten Baden-Württembergs, grundlegend ändern. Umsetzungsprognosen für diese Größenordnungen gingen nach Einschätzung des Projekt-Konsortiums jedoch über das Jahr 2025 hinaus. Auch auf den interessanten Punkt des plötzlichen Abfalls der monotonen Steigung beim Übergang von Szenario 5 auf 6 soll hier noch einmal kurz eingegangen werden. Dieser lag in der wesentlich dichteren Bepackung der Edge-RZ (2,5 km in Szenario 5. 5 km in Szenario 6) begründet, welche das Hinzukommen an Edge-RZ Fläche in der Größenordnung Freiburgs und Heidelbergs überkompensierte.

Des Weiteren sollte angemerkt werden, dass das Potenzial hinsichtlich des prozentualen Energieverbrauchs von Edge-RZ am Gesamtenergieverbrauch von Rechenzentren als noch höher eingestuft werden kann. Ordnet man die in der industriellen Automatisierung (Stichwort IIoT) prognostizierte, sich verändernde IT-Infrastruktur, den Edge-RZ zu, kommt man möglicherweise nochmal auf einen Energiebeitrag der in der Größenordnung der zwei diskutierten Felder (Autonomes Fahren, Smart-City) liegt. Aufgrund fehlender Zahlenbasis wurde diese Komponente in die hier diskutierten Szenarien nicht integriert. Begründet liegt dies in der Tatsache, dass Unternehmen mit industrieller Automatisierung in ihren Wertschöpfungsketten Daten über betriebsinterne Strategiewechsel in der IT-Infrastruktur, wenn überhaupt vorhanden, nicht in großem Umfang öffentlich zur Verfügung stellen. Folglich wäre jegliche Prognose als absolutes „Raten ins Blaue“ einzustufen.

### 3. Bewertungsinstrumentarium zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von Rechenzentren und Rechenzentrumsstandorten

Historisch stellten Rechenzentren (damals sog. Gebietsrechenstellen) Kapazitäten ausschließlich für staatliche Einrichtungen zur Verfügung und waren räumlich den zentralen Behörden wie beispielsweise den Landesämtern oder Universitäten zugeteilt. Mit dem steigenden Bedarf an EDV-Kapazitäten und deren Einsatz im privatwirtschaftlichen Bereich stieg der Bedarf an Rechenzentren. Unternehmenseigene (sog. Enterprise-) Rechenzentren waren anfangs als notwendige Infrastruktur in den eigenen Räumlichkeiten untergebracht und wurden nicht gesondert betrachtet. Die strategische Bedeutung der IT im allgemeinen und Rechenzentren im speziellen wandelte sich jedoch im Laufe der Jahre von der Rationalisierung von administrativen Aufgaben in den 60er Jahren zum Werkzeug für die Entwicklung neuer Geschäftsfelder in den 90er Jahren. Heute spielen Rechenzentren eine zentrale Rolle als Innovationstreiber und essentielle Infrastruktur für viele Unternehmen. Dieser Wandel in der strategischen Bedeutung führt dazu, dass die Bedürfnisse für einen erfolgreichen

Rechenzentrumsbetrieb Einfluss auf die Standortwahl haben und Standorte für Rechenzentren spezifisch für deren Betrieb ausgesucht werden. Die Investitionen für Modernisierung und den Neubau von Rechenzentren lag in Deutschland im Jahr 2016 bei 970 Mio. € und verzeichnete in den 3 Vorjahren ein jährliches Wachstum von 10 % (Hintemann 2017a).

Das Ziel des zweiten Arbeitspaketes ist die Entwicklung eines Bewertungsinstrumentariums zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von Rechenzentren und der Beurteilung der Nachhaltigkeitsaspekte von Rechenzentrumsstandorten. Basierend auf einer Ist-Analyse der Indikatoren und Kennzahlen wird ein Bewertungssystem entwickelt welches mit vertretbarem Aufwand die Nachhaltigkeitsaspekte eines Rechenzentrums und eines Rechenzentrumsstandorts quantifizieren kann.

### 3.1 Kennzahlen zur Nachhaltigkeit – Stand der Wissenschaft

Um den aktuellen Stand der wissenschaftlichen Literatur zu erfassen wurden über Schreibtischrecherche Kennzahlen und Indikatoren für die Nachhaltigkeitsbewertung identifiziert. Eine Liste aller identifizierten Kennzahlen finden Sie in Anhang C. Die Mehrheit dieser Indikatoren waren bei Befragungen von Rechenzentrumsbetreibern jedoch nicht bekannt. Entwickelt wurden diese Kennzahlen von verschiedenen Industriekonsortien, Verbänden und Forschungseinrichtungen wie dem *Green IT Promotion Council* (GIPC), dem *Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien* (BITKOM) und *The Green Grid* (TGG).

Das bekannteste Beispiel unter den identifizierten Indikatoren ist der *Power Usage Effectiveness* (PUE) (Belady und Malone 2007). Dieser findet sich ebenfalls in Normen und Zertifizierungen wieder (siehe Kapitel 3.2). Weitere Kennzahlen sind die *IT Equipment Utilization for servers* (ITEU<sub>sv</sub>) (GITPC 2012a) und die *Electronics Disposal Efficiency* (EDE) (Brown 2013).

Während der Laufzeit des Projekts wurde eine Studie des Umweltbundesamtes zum Thema *Kennzahlen und Indikatoren für die Beurteilung der Ressourceneffizienz von Rechenzentren und Prüfung der praktischen Anwendbarkeit* veröffentlicht (Schödwell et al. 2018b). Die identifizierten Indikatoren aus Anhang C wurden in dieser Veröffentlichung ebenfalls berücksichtigt. Der Fokus der Arbeit von Schödwell et al. lag auf der Entwicklung, Überprüfung und Verbreitung eines praktikablen Kennzahlensystems welche eine Bewertung der Ressourceneffizienz und Umweltwirkung von Rechenzentren ermöglicht. Das vorgeschlagene Kennzahlensystem wurde an drei Rechenzentren getestet. Jedoch konnten von keinem der Rechenzentren alle Daten geliefert werden um die Berechnung der Kennzahlen durchzuführen.

Das *Ministry of Transport and Communications* der finnischen Regierung beauftragte 2013 die Entwicklung eines Nachhaltigkeitskennzahlensystems für Rechenzentren (Haverinen et al. 2014). Der Fokus dieser Arbeit lag auf der Bewertung von Rechenzentrumsneubauten mit starker Anlehnung an die Richtlinien der *Environmental Performance Criteria Guide for New Data Centers* des U.S. Green Building Council (USGBC). Bei der Entwicklung dieses Kennzahlensystems wurde bereits die Umsetzungsschwierigkeit durch zu aufwändige Datenerfassung berücksichtigt und das Kennzahlensystem dementsprechend reduziert. Nach aktuellem Stand (2020) hat sich, dass daraus entstandene *TIKO Sustainability Rating System for data centers* trotz dieser Maßnahmen ebenfalls nicht durchsetzen können. Die mangelnde Anwendung dieses System wird primär in dem noch immer hohen Aufwand für die Datenerhebung und der Veröffentlichungspflicht gesehen. Wie bereits in Kapitel 2.1.1 erläutert ist die Rechenzentrumsbranche nur sehr begrenzt dazu bereit Daten an Dritte mitzuteilen, eine detaillierte Veröffentlichungspflicht ist somit als Hemmnis einzustufen.

### 3.2 Zertifizierungen und Normungsvorhaben zu Leistungskennzahlen

Verschiedene Kennzahlen und Indikatoren wurden in Normen verwendet/definiert. Sollten Indikatoren in einer Norm definiert sein werden diese als einfach zu erheben gewertet da es hier durch den Normungsprozess weniger Unklarheiten bezüglich der Erhebungsmethodik gibt.

ISO 30134: Die ISO Norm 30134 definiert fünf Rechenzentrumsindikatoren von denen mit Stand 2020 vier veröffentlicht wurden.

- Power Usage Effectiveness (PUE)

- Renewable Energy factor (REF)
- IT Equipment Energy Efficiency for Servers (ITEEsv)
- IT Equipment Utilization for server (ITEUsv)
- Energy Reuse Factor (ERF) (derzeit noch nicht veröffentlicht)

EN 50600: Die Europäische Norm EN50600 definiert in den Teilen 4-2 und 4-3 die Indikatoren Power Usage Effectiveness (PUE) und Renewable Energy Factor (REF). Beide Teile entsprechen der ISO 30134 Norm.

Für Rechenzentren gibt es neben den Normen auch konkrete Zertifizierungen. Im deutschsprachigen Raum ist der *Blaue Engel Energieeffizienter Rechenzentrumsbetrieb* die bekannteste Zertifizierung mit Nachhaltigkeitsaspekten (DE-UZ 161 2019). Neben Kriterien wie beispielsweise der Kältemittel in den Kühlanlagen und verpflichtende Inventarlisten werden folgende Indikatoren abgefragt:

- Power Usage Effectiveness (PUE)
- Jahresarbeitszahl (JAZ) der Kühlanlage
- Anteil erneuerbarer Energie
- IT Equipment Utilization (ITEUsv)
- Effizienz der USV Anlage

In vorangegangenen Versionen wurde der PUE im Blauen Engel als Energy Usage Effectiveness (EUE) bezeichnet. Dies ist auf wissenschaftlicher Basis die korrekte Bezeichnung da es sich hier um Energie und nicht Leistung handelt. Da jedoch der Begriff PUE in der Industrie geläufiger ist, wurde diese Ungenauigkeit zugunsten des Wiedererkennungswertes und Einfachheit geändert. Zusätzlich wird ein Monitoring von Subsystemen und IT Komponenten (CPU, Speicher, Netzwerk) vorausgesetzt und Grenzwerte für den Energieverbrauch von neuen Komponenten definiert.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es im Bereich der Leistungsindikatoren bereits einen großen Pool an klar definierten und genormten Indikatoren gibt, die bezüglich Ihres Erhebungsaufwandes eine vertretbare Belastung für ein Rechenzentrum darstellt. Der Bereich der Ressourceneffizienz ist derzeit für Rechenzentren noch in keiner Norm umfangreich berücksichtigt. Verfügbare Indikatoren zur Ressourceneffizienz konnten sich bis jetzt noch nicht durchsetzen, da diese einen zu großen Aufwand auf Seiten der Rechenzentrumsbetreiber bedeuten.

Es konnten keine rechenzentrumsspezifischen Normen gefunden werden welche die soziale Nachhaltigkeit bewerten. Mit der ISO 26000 werden Empfehlungen für den Bereich soziale Verantwortung gegeben, diese können jedoch nicht quantifiziert oder zertifiziert werden (ISO 26000:2010).

Für Zulieferer und Rohstoffproduzenten gibt es verschiedene freiwillige Zertifizierungen und Standards. Der internationale Standard *SA8000* setzt Mindestanforderungen in den Bereichen Kinderarbeit, Zwangsarbeit, Arbeitssicherheit, Arbeitszeit, Lohnniveau und anderen sozialen Aspekten (Norm SA8000 Standard). Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe zertifiziert seit 2009 Mienen nach Mindeststandards bei der Produktion um Kinderarbeit und die Finanzierung von bewaffneten Konflikten zu verhindern. Diese Zertifikate können für eine Bewertung der sozialen Nachhaltigkeit in den Vorketten von Rechenzentrumsprodukten herangezogen werden.

### 3.3 Methodik des Bewertungsinstrumentariums

Basierend auf den oben erläuterten Vorarbeiten wurde für das zu entwickelnde Bewertungsinstrumentarium folgende Randbedingungen gestellt um eine Anwendung in der Industrie zu erleichtern:

- *Aggregiert*: Das Bewertungssystem wird auf höhere Werte aggregiert um für Dritte Rückschlüsse auf Einzelkomponenten zu vermeiden. Diese höheren Werte sind Einzelwerte für die ökonomische Nachhaltigkeit, ökologische Nachhaltigkeit, soziale Nachhaltigkeit. Diese Werte können nach außen kommuniziert werden.

- *Reduziert:* Das Bewertungssystem wird auf eine handhabbare Menge an Indikatoren begrenzt um den Aufwand der Datenerhebung für Rechenzentrumsbetreiber zu reduzieren. Außerdem werden die Indikatoren basierend auf deren Erhebungsaufwand bewertet und nur Indikatoren ausgewählt welche einen vertretbaren Aufwand für die Rechenzentrumsbetreiber bedeuten. Vielversprechende Indikatoren können zu diesem Zweck vereinfacht oder verändert werden.

### 3.4 Leistungsindikatoren für Rechenzentren

Die Beurteilung der Nachhaltigkeit von Rechenzentren wird in ökonomische, ökologische und soziale Aspekte der Nachhaltigkeit unterteilt. Die im Rahmen dieses Projektes angestrebte Beurteilung unterteilt sich in die Bewertung der konkreten Leistung des Rechenzentrums sowie einer Bewertung des allgemeinen Rechenzentrumsstandortes. Im Folgenden wird auf die Leistungsbewertung eines Rechenzentrums eingegangen. Die Bewertung von Standorten erfolgt ab Kapitel 3.9.

#### 3.4.1 Ökonomische Leistungsbewertung

Für Rechenzentren existieren heterogenen Geschäftsmodelle die auf der Dienstleistungsebene von Colocation über Private Cloud bis hin zu Enterprise reichen. Die **ökonomische Bewertung/Abrechnung** dieser Betriebskonzepte wurde im Dienstleistungssektor zu Anfang der 90er Jahre über die dargebotene Bandbreite und den Datentransfer dargestellt (€/Gbit). Mit fortschreitender Technik geriet der Footprint in den Vordergrund und war viele Jahre die Abrechnungsgrundlage für RZ-Dienstleistungen (€/m<sup>2</sup>). Beide Modelle werden derzeit noch eingesetzt. Die häufigste ökonomische Bewertung erfolgt derzeit aber über die Abrechnung der verbrauchten Energiemenge (€/kWh), der Abrechnung der zugesicherten IT-Leistung (€/kW) oder eine Mischform aller genannten Modelle. Eine Abrechnung über Anzahl und Zeit der benutzten Prozessorkerne findet sich vor allem im HPC Bereich (€/core\*time) wieder und lässt sich als abstrahierte Form der Abrechnung über den Energieverbrauch ansehen.

Im Bereich der Enterprise Rechenzentren wird die ökonomische Bewertung nicht nach außen kommuniziert und obliegt dem jeweiligen Management. Experteninterviews mit Betreibern ergaben hier Abrechnungsmodelle die ebenfalls auf der verbrauchten Energiemenge basieren oder als Teil des Overheads nicht separat ausgewiesen werden. Das am häufigste genannte Konzept verrechnet die Hardwareanschaffung über die verantwortliche Kostenstelle (z.B. Abteilung) der Betrieb der Hardware wird anschließend über den Overhead auf das ganze Unternehmen umgelegt.

Eine externe Bewertung des ökonomischen Erfolgs eines Rechenzentrums wird im Rahmen dieses Projektes als nicht sinnvoll angesehen und obliegt alleine dem Rechenzentrumsbetreiber. Eine Wertung der ökonomischen Sinnhaftigkeit eines Rechenzentrumsbetriebs wie bei beispielsweise dem Kryptowährungsmining wird in diesem Projekt ebenfalls nicht vorgenommen. Dennoch lassen sich Merkmale identifizieren die einen Einfluss auf den ökonomischen Erfolg eines Rechenzentrums haben. Diese können für eine Bewertung herangezogen werden und sind im Folgenden aufgeführt.

##### 3.4.1.1 Effizienz der Infrastruktur

Neben dem Stromverbrauch der IT-Komponenten entsteht ein weiterer Energieverbrauch durch die Infrastruktur die den IT-Betrieb ermöglicht und aufrechterhält. Dieser Verbrauch entsteht u.a. durch den Energieverbrauch der Klimatisierung, Kühlung, Stromversorgung, Stromverteilung, Überwachung, Beleuchtung und anderer Infrastruktur die für den Betrieb nötig ist. Das Verhältnis der Summe aller Verbraucher im Rechenzentrum (inklusive IT-Betrieb) zum alleinigen IT-Verbrauch ist die branchenbekannte Power-Usage-Effectiveness (PUE). Da aus ökonomischer Sicht der durch diesen Indikator beschriebenen „Overhead“ als reiner Kostenfaktor auftritt kann dieser als Indikator für die wirtschaftliche Nachhaltigkeit herangezogen werden.

An dieser Stelle ist anzumerken, dass die Relevanz der Infrastruktureffizienz in direktem Zusammenhang mit dem Strompreis steht und bei sinkenden Strompreisen der ökonomische Einfluss ebenfalls abnimmt da andere Einflussfaktoren überwiegen können. Der Strompreis in Deutschland/Baden-Württemberg ist im europäischen Vergleich sehr hoch. Die ökonomische Relevanz des PUE ist folglich hier am stärksten.

#### 3.4.1.2 Auslastung der IT-Komponenten

Für IT-Komponenten gilt im Allgemeinen, dass mit steigender Auslastung die Wirtschaftlichkeit ebenfalls ansteigt. Dies trifft für Server in besonderem Maße zu da diese neben Abschreibungskosten auch im „Nicht-Betrieb“ einen Stromverbrauch aufweisen und somit laufende Betriebskosten erzeugen. Der Stromverbrauch eines Servers weist eine hohe Korrelation zur Auslastung auf. Diese Korrelation ist jedoch nicht ursprungsgerade, da Server bei 0 % Auslastung noch ca. 20 % des Spitzenstromverbrauchs benötigen (Gimarc 2015). Ein ökonomisches Ziel ist es also die verfügbare Hardware möglichst hoch auszulasten und im Fall eines rückläufigen Bedarfs an Hardware entsprechend Hardware außer Betrieb zu nehmen. Dieser Indikator kann für die Bewertung der wirtschaftlichen Nachhaltigkeit herangezogen werden.

#### 3.4.1.3 Monitoring der Betriebsparameter und Verbräuche

Die Erfüllung von internen sowie externen Service Level Agreements (SLA) ist eine der Gründe für die Notwendigkeit von Überwachungs- und Monitoring- Konzepten. SLAs reichen von der Verfügbarkeit von Services bis zu Temperaturgrenzwerten in Raumabschnitten oder Racks. Ein Nichterfüllen der SLAs kann für Serviceanbieter und Rechenzentrumsbetreiber das Image und somit die Marktposition des eigenen Unternehmens gefährden und gegenüber Kunden konkrete Ansprüche wie z.B. Strafzahlungen bedeuten. Nicht erfüllen von internen SLAs wie zum Beispiel lang andauernde Nicht-Erreichbarkeit von Services können enorme Schäden für das Unternehmen bedeuten. Das Marktforschungsunternehmen Gartner gibt für Unternehmen eine durchschnittliche Schadenshöhe von 5.600 Dollar pro Minute Downtime an (Lerner 2014). Das entspricht über 300.000 € pro Stunde. Der störungsfreie /störungsarme Betrieb wird maßgeblich durch das Monitoring beeinflusst. Neben der Erfüllung von vereinbarten Leistungen ermöglicht ein Monitoring auch das identifizieren von Betriebsfehlern, unoptimierten Betriebspunkten, potenziellen Risiken und Kapazitätsengpässen. Das Einsetzen eines zentralisierten Monitorings welches Gebäudemanagement, IT-Management und Asset-Management vereint, kann als Indikator für einen ökonomisch nachhaltigen Betrieb herangezogen werden.

### 3.4.2 Ökologische Leistungsbewertung

Der ökologische Aspekt der Nachhaltigkeit bezieht sich allgemein auf das Überleben von Ökosystemen. Das in diesem Projekt berücksichtigen Ökosysteme ist das globale Ökosystem welches maßgeblich durch Kohlendioxid und andere klimaschädigende Stoffe beeinflusst wird. Des Weiteren wird ökologischen Nachhaltigkeit in der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie beschrieben als der weitsichtige und rücksichtsvolle Umgang mit natürlichen Ressourcen. Siehe ebenfalls unter „Begriffsdefinitionen“ in Kapitel 1.1. Rechenzentren wirken auf das Ökosystem durch verschiedene Effekte ein.

Diese sind:

- Indirekten Treibhausgas- und Luftschadstoff-Ausstoß
- Direkten Ausstoß von THG und Luftschadstoffen (Diesel-Netzersatzanlagen, Ausgasung von F-Gasen, ...)
- Direkten und indirekter Ressourcenverbrauch (Wasser, Rohstoffe, ...)

Weitere Aspekte sind der Einsatz von Chemikalien, der Flächenverbrauch durch das Gebäude, das Binden von Rohstoffen durch das Gebäude, erzeugen von Metall- und Plastikabfall, Umweltbelastung durch Löschanlagen und die Luftbelastung durch Aerosole.

All diese Aspekte haben einen Einfluss auf die ökologische Bewertung eines Rechenzentrums und sollten von den Betreibern adressiert und minimiert werden.

Um eine Vergleichbarkeit von Rechenzentren zu ermöglichen muss die Anzahl an Bewertungskriterien jedoch ein sinnvolles Verhältnis aus Aufwand (in der Datenerhebung) und Nutzen (Ganzheitlichkeit des Vergleichs) aufweisen. Verschiedene Versuche wurden unternommen um die Nachhaltigkeit von Rechenzentren zu bewerten, konnten aber nicht in die Realität umgesetzt werden da von Seiten der Rechenzentrumsbetreiber der Aufwand als zu groß eingeschätzt wurde oder andere Gründe eine

breite Anwendung verhinderten vgl. (Haverinen et al. 2014). Beispielsweise ermöglicht eine Abfrage aller Hardwarekomponenten eine präzise Auswertung der Ressourcennachhaltigkeit, diese ist jedoch nicht in der Datenerhebung umsetzbar wie (Schödwell et al. 2018a) feststellt.

Somit werden für einen Vergleich nur die Kriterien herangezogen welche den größten Einfluss oder das größte Einsparpotenzial für die ökologische Nachhaltigkeit aufweisen und mit einem vertretbaren Aufwand zu erheben sind. Folgend werden die für die Indikatoren relevanten Aspekte kurz beschrieben. Aspekte die nicht in den Indikatoren abgebildet werden aber dennoch von Rechenzentrumsbetreibern adressiert werden sollten sind in Anhang D aufgelistet (F-Gase, Chemikalien, direkter/indirekter Wasserverbrauch, Flächenverbrauch, Rohstoffverbrauch in Gebäude/Gebäudetechnik/Hardware, Löschmittel, Aerosolbildung).

#### 3.4.2.1 Metall- und Plastikabfall

Aufgrund der in Abschnitt 0 erwähnten Turn-over-rate werden in einem Rechenzentrum regelmäßig Komponenten ausgetauscht. Da der Austausch regelmäßig und in größeren Rechenzentren auch in großer Summe stattfindet, wird die Entsorgung der Komponenten im Regelfall an Dienstleister ausgelagert, welche die Entsorgung übernehmen. Neben der Vermeidung von Elektroschrott durch längere Einsatzzeiten kann der Rechenzentrumsbetreiber hier nur indirekt auf die nachhaltige Entsorgung Einfluss nehmen. Die Einflussnahme liegt in der Ausschreibung der Dienstleistung. In einer Entsorgungsausschreibung wird festgelegt wie der Entsorger mit den Komponenten zu verfahren hat und welche Weiterverarbeitung/Verwendung zulässig ist. Aus Sicherheitsgründen ist es üblich die Informationen auf Festplatten nicht nur zu löschen sondern durch eine physische Zerstörung „unlesbar“ zu machen. Diese Zerstörung wird teilweise direkt auf dem Gelände des Rechenzentrums unter Aufsicht der RZ-Betreibers durchgeführt um „BSI compliant“ zu sein oder Forderungen durch Kunden zu erfüllen. Neben permanenten Speichern (Festplatten, Magnetbändern) werden aus Sicherheitsgründen teilweise auch flüchtige Speicher (CPUs, RAM) oder die gesamte Hardware zerstört.

Der Rechenzentrumsbetreiber legt in der Ausschreibung das Vorgehen für die drei Komponententypen fest. Diese sind permanente Speicher (SSD, HDD, Magnetbänder), flüchtige Speicher (RAM, CPU) und Informationsfreie Komponenten (Platinen, Netzteile, Lüfter, Gehäuse, etc.). Das mögliche Vorgehen ist die zerstörende Entsorgung oder die zerstörungsfreie Entsorgung. Bei der zerstörenden Entsorgung ist der Entsorger dazu verpflichtet die übergebene Komponente zu zerstören und unbrauchbar zu machen. Er darf lediglich die Rohstoffe nutzen. Bei der zerstörungsfreien Entsorgung wird dem Entsorger die Komponente übergeben und alle Rechte an den Komponenten eingeräumt. Der Entsorger hat somit, dass Recht die Komponente weiter zu verkaufen oder anderweitig aktiv einzusetzen ohne Sie zu zerstören. Solche Komponenten bezeichnet man als refurbished. Da die Komponenten ein zweites Mal eingesetzt werden, wird Ihr Rohstoff effizienter genutzt. Im Bereich der Rohstoffnachhaltigkeit ist die Entsorgungsstrategie eines Rechenzentrums ein wichtiger Bewertungspunkt.

#### 3.4.2.2 Indirekter CO<sub>2</sub>-Ausstoß

Trotz der Bemühungen der Energiewende basiert der deutsche Strommix auch 2020 noch zu großen Teilen auf fossilen Brennstoffen. Dies führt dazu, dass jeder kWh Strom eine gewisse Menge an Luftschadstoffen und Treibhausgasen wie CO<sub>2</sub> zugerechnet werden kann. Für 2017 lag dieser Wert bei 474 g CO<sub>2</sub>/kWh (Umweltbundesamt 2020). Ein durchschnittliches Rechenzentrum mit 1000m<sup>2</sup>, 430 Racks und 4 kW pro Rack verbraucht bei einem PUE von 1,7 insgesamt 25.614.240 kWh Strom. Dies entspricht einem CO<sub>2</sub> Ausstoß von ca. 12,1 Millionen kg CO<sub>2</sub>. Da der CO<sub>2</sub>-Ausstoß pro kWh durch den Rechenzentrumsbetreiber nicht direkt beeinflusst werden kann bleibt ein bilanzieller Ausgleich als Maßnahme über den Stromeinkauf. Über die Wahl des Stromtarifs ist es dem Rechenzentrumsbetreiber möglich den indirekten CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu reduzieren. Somit ist die Strombeschaffung bezüglich des Anteils erneuerbarer Energien ein Indikator für einen ökologisch nachhaltigen Betrieb.

### 3.4.2.3 Einfachnutzung der eingesetzten Energie

Technisch betrachtet wandelt eine IT-Komponente die gelieferte Energie (Strom) in Wärme um. Die logischen Operationen in der IT-Hardware können thermodynamisch betrachtet vernachlässigt werden. Bei der Umwandlung von Strom in Wärme handelt es sich um eine Reduzierung der Wertigkeit der Energie. Strom als hochwertige Form der Energie wird in eine Energieform mit geringer Wertigkeit überführt (Leemann 1992). Experten bezeichnen dies als einen Exergieverlust. Die entstehende Abwärme enthält aber dennoch (abhängig von der Temperatur) einen relevanten Anteil an nutzbarer Energie (Exergie genannt). Um eine Überhitzung und folglich eine Zerstörung der Komponenten zu verhindern wird die erzeugte Wärme (also die verbleibende Exergie) aber meist über ein Kühlsystem abgeführt und ungenutzt an die Umwelt abgegeben. Technisch ist eine Nutzung der Abwärme jedoch möglich um beispielsweise Gebäude zu beheizen. Wird Abwärme zum Beheizen von Gebäuden benutzt, verdrängt diese alternative Heiztechniken die in Deutschland vorwiegend auf CO<sub>2</sub>-intensiven Rohstoffen wie Erdöl oder Erdgas basieren. Die Berücksichtigung der Abwärmenutzung ist folglich ein Indikator für einen ökologisch nachhaltigen Rechenzentrumsbetrieb.

### 3.4.3 Soziale Leistungsbewertung

Als Unternehmen mit Angestellten aus verschiedenen Fachbereichen und Gehaltsgruppen, Hardware aus verschiedenen Ländern und als „Herzstück“ der digitalen Infrastruktur haben Rechenzentren eine soziale Verantwortung. Die **soziale Nachhaltigkeit** wird durch folgende Bereiche beeinflusst.

- Einfluss auf Mitarbeiter
- Einfluss auf den Arbeitsmarkt
- Einfluss auf Vorketten und Dienstleister

Im Folgenden werden die verschiedenen Einflüsse der sozialen Nachhaltigkeit erläutert welche im Kontext von Rechenzentren identifiziert wurden. Weitere Aspekte der sozialen Nachhaltigkeit sind in Anhang D aufgeführt.

#### 3.4.3.1 Arbeitsbedingungen der Hersteller

Neben der Konfliktfreiheit der Rohstoffe (siehe Kapitel 3.4.3.2) unterscheiden sich die Komponenten und Zwischenkomponenten auch bezüglich der Arbeitsbedingungen bei der Herstellung. Große mediale Aufmerksamkeit erlangte der Fall Foxconn im Jahr 2010 (Humanrights 2016) bei dem unmenschliche Arbeitsbedingungen bei dem Elektronik-Zulieferer Foxconn aufgedeckt wurden. Als Reaktion wurden verschiedene Kampagnen gestartet um auf die Problematik aufmerksam zu machen. Das Projekt „KnowTheChain“ der „Humanity United“ veröffentlicht regelmäßig ein Ratingsystem der größten IKT Hersteller nach sieben Kriterien. („Commitment and Governance, Traceability and Risk Assessment, Purchasing Practices, Recruitment, Worker Voice, Monitoring and Remedy) (KnowTheChain 2018). Die Fair Labor Association ermöglicht mit einem Code of Conduct eine Selbstkontrolle für Hersteller und gibt Kunden eine Möglichkeit Hersteller anhand der Erfüllung zu vergleichen. Der Internationale Standard SA800 basiert auf Konventionen der Internationalen Arbeitsorganisation (ILO) und der Vereinten Nationen und hat ebenfalls die Erfüllung von Mindestanforderungen der Sozial- und Arbeitsstandards zum Ziel. Dieser Standard kann zertifiziert werden (z.B. durch TÜV oder SGS) und kann ebenfalls zum Vergleich von Herstellern herangezogen werden. Eine Berücksichtigung dieser oder bedeutungsgleicher Standards/Label bei der Beschaffung von IT Hardware ist ein wichtiger Punkt in der Bewertung von Rechenzentren.

#### 3.4.3.2 Konfliktfreiheit in der Rohstoffgewinnung

Die Elektronikindustrie benötigt neben Grundstoffen wie Silizium auch z.B. Tantal, Gold, Zinn, oder Wolfram. Diese Rohstoffe werden als Erze aus Minen gewonnen (z.B. Coltan-Erz, Wolframit, Kassiterit) welche im Zusammenhang mit Konflikten stehen können da sie häufig in politisch instabilen und/oder bürgerkriegsgeplagten Ländern wie beispielsweise dem Kongo abgebaut werden. Im Kongo wird davon ausgegangen das die Milizen sich aus Minen finanzieren.

Im Sinne des Dodd-Frank Act (PUBLIC LAW 111-203 2010) aus den USA gelten Gold, Wolframit, Kassiterit, Coltan und andere Erze als Konfliktmineral, wenn dieses aus der Demokratischen Republik Kongo oder einem benachbarten Land stammen und der Hersteller die Konfliktfreiheit nicht

nachweisen kann. Das Gesetz verpflichtet Unternehmen welche die genannten Mineralien aus diesen Ländern beziehen dazu, die Konfliktfreiheit nachzuweisen und zu dokumentieren. Dies führte 2010 jedoch zu einem de facto Kongoembargo unabhängig ob die Mine in einem Krisengebiet lag oder nicht. Um die Konfliktfreiheit umfassender zu ermitteln wurde das „Conflict Free Smelter Program“ gestartet<sup>1</sup>. Hier können Hersteller mittels Zertifikaten die Konfliktfreiheit ihrer Rohstoffe nachweisen. Hersteller die ein solches Zertifikat oder einen ähnlichen Nachweis von Ihren Zulieferern fordern sind anderen Herstellern zu bevorzugen und der Nachweis von Konfliktfreien Rohstoffen wird als Bewertungskriterium im Rechenzentrumsvergleich eingestuft.

#### 3.4.3.3 Mitarbeiterzufriedenheit

Im Kontext der sozialen Nachhaltigkeit wird häufig die Mitarbeiterzufriedenheit als Bewertungsmaß für die sozialen Aspekte eines Unternehmens beschrieben. Eine Publikation aus dem Jahr 2013 nennt die Mitarbeiterzufriedenheit einen „Kernindikator sozialer Nachhaltigkeit“ (Meyerding 2013). In der ergänzenden Norm *ISO EN DIN 9004* wird in Abschnitt 9.2.2 empfohlen die Zufriedenheit über eine „fortlaufende Überprüfung“ zu ermitteln. Für die konkrete Ermittlung wurden viele Modelle aus dem Bereich der Sozialwissenschaft vorgeschlagen. Diese unterscheiden sich sowohl in der grundlegenden Methodik also auch dem nötigen Aufwand der Erhebung. Grundsätzlich lassen sich direkte und indirekte Methoden unterscheiden. Hierbei weisen direkte Methoden Probleme in der juristischen Rahmenbedingung auf, da hier Daten direkte von Mitarbeitern erhoben werden müssen (Fachausschuss 2/99 2002). Wenn eine Befragung zu der Mitarbeiterzufriedenheit nicht bereits Teil der Unternehmensphilosophie ist, muss hier durch eine Erhebung ein gesonderter Aufwand auf Seiten der Rechenzentrumsbetreiber betrieben werden. Für eine Abschätzung durch indirekte Methoden kommen verschiedene Daten in Frage, welche in den meisten Unternehmen bereits erhoben werden. Die StufeZwei Consulting GmbH listet zu diesem Thema die Fluktuationsquote, Eigenkündigungsquote, Krankenquote und die durchschnittliche Betriebszugehörigkeit also mögliche Indikatoren auf (StufeZwei Consulting GmbH 2018). Bei einer Stichprobenuntersuchung von 12 Nachhaltigkeitsberichten aus Unternehmen der Technikbranche wurde die durchschnittliche Betriebszugehörigkeit von jedem Unternehmen angegeben. Diese kann somit als verfügbarer Indikator für die soziale Nachhaltigkeit gewertet werden.

#### 3.4.3.4 Weiterbildung der Mitarbeiter

Die Rechenzentrumsbranche ist eine sich schnell wandelnde und verändernde Branche. Die Weiterbildung von Mitarbeitern ist ein wichtiger Bestandteil der Arbeitsplatzsicherung da so die Belegschaft auf Veränderungen in den Anforderungen vorbereitet werden kann und Kündigungen aufgrund unzureichender Qualifikation vermieden werden können. Das Statistische Bundesamt bewertet die Weiterbildungsquote als Dimension der „Qualität der Arbeit“ (DESTATIST 2016)(Bilger et al. 2016). In der Norm *ISO 9001: Qualitätsmanagement* wird in der ergänzenden Norm *ISO 9004* ebenfalls empfohlen beim „organisationalen Lernen zu unterstützen“ um Innovationen und Verbesserungen im Unternehmen zu fördern (Norm DIN EN ISO 9004). Auf Unternehmensebene kann die Weiterbildungsquote folglich auch als Indikator für soziale Nachhaltigkeit herangezogen werden.

#### 3.4.3.5 Ausbildung von Fachkräften

Die Verfügbarkeit von Fachkräften wird in einer Befragung von Rechenzentrumsbetreibern als „sehr wichtig“ eingestuft, wenn es um die Standortfaktoren für Rechenzentren geht (Hintemann 2017b). Bei einer Befragung wurde die aktuelle Verfügbarkeit von Fachkräften jedoch als „sehr problematisch“ von einigen lokalen Rechenzentrumsbetreibern beschrieben (Befragung während verschiedener Workshops während der Projektlaufzeit). Auf landesweiter Ebene kommt eine Studie des Wirtschaftsforschungsinstituts Wifor ebenfalls zu der Erkenntnis, dass sich die Fachkräfteverfügbarkeit bis zum Jahr 2030 von 3000 fehlenden Fachkräften auf 6700 fehlende Fachkräfte verschärfen wird (Hofmann et al. 2017). Neben der universitären Ausbildung zur IT-Fachkräften können Unternehmen auch zur Fachkräfteverfügbarkeit beitragen. Die Ausbildung von eigenen Fachkräften und dem Anbieten von Ausbildungsplätzen kann als Indikator für soziale Nachhaltigkeit herangezogen werden.

---

<sup>1</sup> <http://www.responsiblemineralsinitiative.org/>

### 3.5 Zusammenfassung des Ökonomisches Indikatorenset

Um Rechenzentren mit einem vertretbaren Verhältnis aus Aufwand und Ganzheitlichkeit bewerten und vergleichen zu können, wird die ökonomische Nachhaltigkeit durch drei Indikatoren abgebildet. Zwei Indikatoren werden quantifiziert und ein Indikator ist als binäre Bewertung eingebunden. Jeder Indikator hat eine durch Expertenbefragungen ermittelte Gewichtung.

Quantifizierte Indikatoren:

- IT-Auslastung (ITEU)
- Auslastung der Infrastruktur (PUE)

Binäre Indikator:

- DCIM

Im Folgenden werden die einzelnen Indikatoren genauer beschrieben und deren Berechnung erläutert.

#### 3.5.1 IT-Auslastung (ITEU)

Die Bestimmung des IT Equipment Utilization (ITEU) wird derzeit als ISO Norm unter der ISO/IEC 30134-5 geführt (Stand 01/2019). Da Server den größten Einzelposten im Stromverbrauch eines Rechenzentrums darstellen bezieht sich die ITEU in der oben genannten Norm auf die Auslastung von Servern. Dieser Bezug wird auch im Rahmen des hier vorgestellten Indikatoren-Sets verwendet. Für die Bestimmung der ITEU wird folgende Formel verwendet:

$$\text{ITEU (t)} = \frac{\sum_{i=1}^N \text{CUS}_i(t)}{N}$$

*Formel 23: Berechnung der ITEU zum Messzeitpunkt*

Hier ist  $\text{CUS}_i(t)$  die CPU Auslastung eines Servers zum Zeitpunkt  $t$  in %.  $N$  ist die Anzahl an durch Auslastungsmessung erfassten Servern im Rechenzentrum. Für die Bestimmung des ITEU Gesamtwerts wird der Median aller Messpunkte in den letzten 365 Tagen verwendet. Es ist darauf zu achten das die Messintervalle immer gleich lang sind und eine Mindestrate von einer Messung pro Stunde erfüllen. Für die Ermittlung der ITEU müssen außerdem 90 % der Server durch diese Messung erfasst werden. Für genauer Informationen wird an dieser Stelle auf die ISO/IEC 30134-4 verwiesen (ISO/IEC 30134-5:2017).

Die Bewertung des ITEU erfolgt über eine gestufte Bewertungsformel (siehe: Formel 24) welche in Abbildung 12 dargestellt wird.

$$y(\text{ITEU}) = \left\{ \begin{array}{l} 0 \text{ wenn } \text{ITEU} < 0,06 \\ 0,2 \text{ wenn } 0,06 \leq \text{ITEU} \leq 0,11 \\ 0,6 \text{ wenn } 0,11 \leq \text{ITEU} \leq 0,3 \\ 0,8 \text{ wenn } 0,3 \leq \text{ITEU} \leq 0,8 \\ 1 \text{ wenn } \text{ITEU} > 0,8 \end{array} \right\}$$

*Formel 24: Stufenformel der ITEU*

Die Bewertungsformel wurde als gestufte Funktion gewählt um Rechenzentrumsbetreibern konkrete Meilensteine in Ihren Nachhaltigkeitsbemühungen zu geben. Diese Meilensteine sind aufgrund ihrer scharfen Abtrennung sowohl intern als auch extern leichter zu kommunizieren und basieren im vorliegenden Fall auf branchenüblichen Auslastungen in legacy (6 % Auslastung), teilvirtualisierten (11 % Auslastung), virtualisierten (30 % Auslastung) und zukünftigen (80 % Auslastung) Anlagen (siehe Abbildung 12).

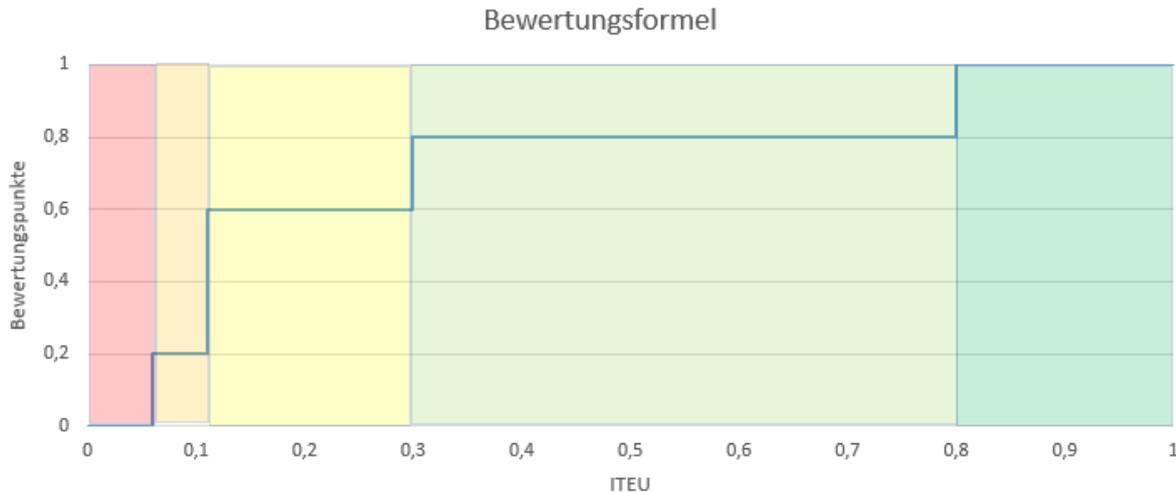


Abbildung 12: Visualisierung der Stufenbewertung (ITEU)

### 3.5.2 Infrastruktur (PUE)

Die Bestimmung der Power Usage Effectiveness (PUE) wird derzeit als ISO Norm unter der ISO/IEC 30134-2 beschrieben (Stand 01/2019). Das Ziel ist es die Effizienz der Infrastruktur des Rechenzentrums zu quantifizieren. Hierfür wird, angelehnt an die ISO/IEC 30134-2, folgende Formel verwendet, welche im Vergleich zur Formel in der ISO/IEC 30134-2 um einen Korrekturfaktor angepasst wurde:

$$PUE = \frac{E_{RZ}}{E_{IT} * K}$$

Formel 25: Berechnung des PUE

$E_{IT}$  ist der Energieverbrauch gemessen an den PDU, welche Server/Netzwerk/Storage versorgen. Hier wird ein Korrekturfaktor von 1 verwendet. Ist dies nicht möglich werden folgende Korrekturfaktoren K zu dem gemessenen Wert multipliziert:

0,98: wenn die Messung hinter der USV erfolgt.

0,90: wenn die Messung vor der USV erfolgt.

$E_{RZ}$  ist an der Übergabestelle von Verteilnetzbetreiber zum Rechenzentrum zu messen (Trafo-Station) und entspricht dem Gesamtenergieverbrauch des Rechenzentrums. Ist die Messung an der Trafo-Station nicht möglich ist eine Stelle zu wählen welche der Übergabestelle aus leitungstechnischer Sicht am nächsten ist. Sind weitere Verbraucher an dieser Messstation angebracht, welche nicht zum Rechenzentrum gehören, sind deren Verbräuche abzuziehen. Weiter Erzeuger wie Netzersatzanlagen sind an der Einspeisung in die USV zu erfassen und zum Gesamtverbrauch zu addieren.

Die Bewertung des PUE erfolgt über eine gestufte Bewertungsformel (siehe: Formel 26) welche in Abbildung 13 dargestellt wird.

$$y(PUE) = \begin{cases} 0 & \text{wenn } PUE > 2 \\ 0,2 & \text{wenn } 2 \geq PUE > 1,8 \\ 0,4 & \text{wenn } 1,8 \geq PUE > 1,6 \\ 0,6 & \text{wenn } 1,6 \geq PUE > 1,4 \\ 0,8 & \text{wenn } 1,4 \geq PUE > 1,2 \\ 1 & \text{wenn } PUE \leq 1,2 \end{cases}$$

Formel 26: Stufenformel der PUE

Die Bewertungsformel wurde als gestufte Funktion gewählt um Rechenzentrumsbetreibern konkrete Meilensteine in Ihren Nachhaltigkeitsbemühungen zu geben. Diese Meilensteine sind aufgrund ihrer

scharfen Abtrennung sowohl intern als auch extern leichter zu kommunizieren und basieren im vorliegenden Fall auf den derzeit in der Branche erreichten Effizienzwerten.

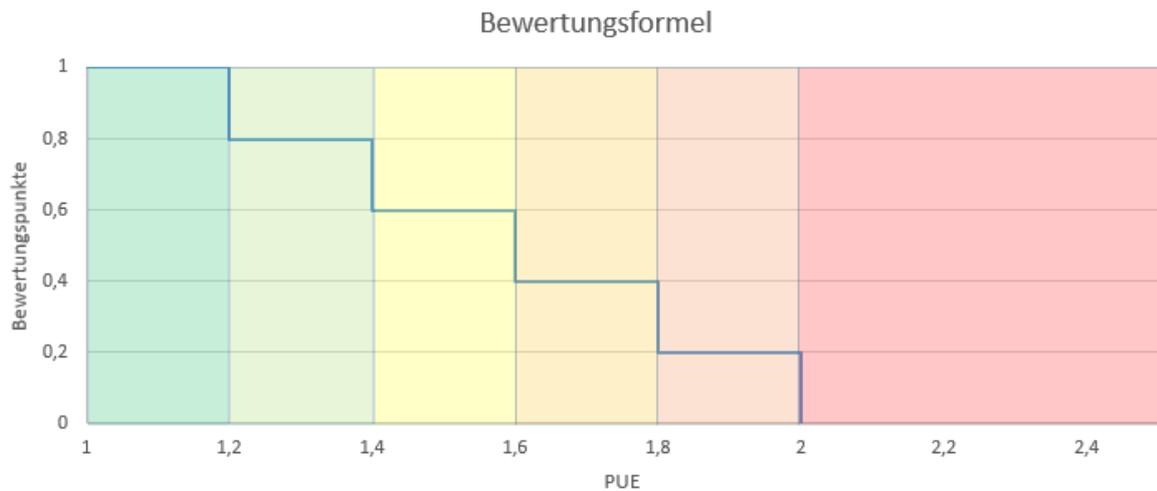


Abbildung 13: Visualisierung der Stufenbewertung (PUE)

### 3.5.3 DCIM

Das Einsetzen eines zentralisierten Monitorings welches Gebäudemanagement, IT-Management und Asset-Management vereint wird allgemein als Data Center Infrastructure Management (DCIM) bezeichnet. Durch das Einführen eines DCIM werden keine direkten Nachhaltigkeitsziele erreicht. Das verwenden eines DCIM versetzt Rechenzentrumsbetreiber jedoch in die Lage über ein kontinuierliches Monitoring den Ist-Zustand nachhaltigkeitsbezogener Parameter zu erfassen und basierend auf den gewonnenen Informationen betriebsoptimierende Maßnahmen zu ergreifen. Die Bewertung des DCIM ist eine binäre Bewertung.

$$DCIM = \begin{cases} 0 & \text{wenn DCIM nicht umgesetzt} \\ 1 & \text{wenn DCIM umgesetzt} \end{cases}$$

Formel 27: Stufenformel des DCIM

Ein DCIM gilt als umgesetzt, wenn mindestens folgende Punkte erfüllt sind:

- Monitoring der ITEU nach den in Kapitel 3.5.1 angegebenen Mindestanforderungen
- Monitoring des PUE nach den in Kapitel 3.5.2 angegebenen Mindestanforderungen
- Fortlaufende Inventarisierung aller Server-, Netzwerk- und Speicherkomponenten
- Erfassen der Leistungsaufnahme der IT-Komponenten mindestens auf PSU-Ebene
- Erfassen der Temperatur an mindestens 3 Punkten vor jedem Rack
- Auslastung der Klimatisierungsinfrastruktur bezogen auf die Maximalleistung
- Leistungsaufnahme der Klimatisierungsinfrastruktur getrennt nach Komponenten
- Auslastung der USV

### 3.5.4 Gewichtung und aggregierter Indikator

Für die Gewichtung der ökonomischen Nachhaltigkeitsindikatoren wurde eine Expertenbefragung durchgeführt welche die Indikatoren auf einer 100 Punkte Summenskala bewertet. Es konnten sechs Rückmeldungen von Branchenvertretern gewonnen werden. Die Ergebnisse als Box-Plot sind in Abbildung 14 dargestellt. Diese visualisieren sowohl den Median, den Interquartilabstand als auch das obere und untere Quantil. Der Interquartilabstand (oranger Bereich) ist der Bereich in welchem 50 % der Rückmeldungen lagen. Die Markierung innerhalb des orangen Bereichs stellt den Median dar.

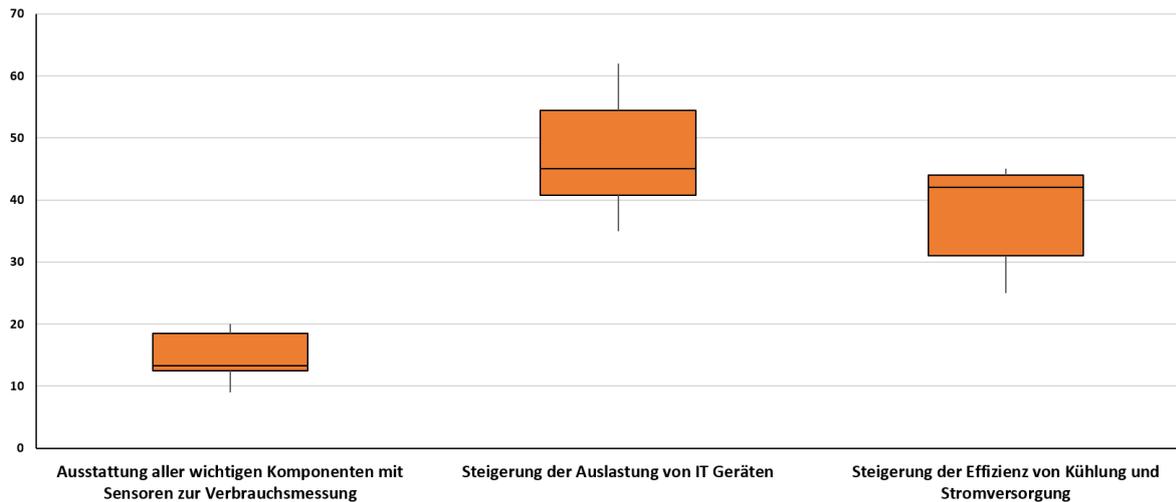


Abbildung 14: Box-Plot der Gewichtung ökonomischen Indikatoren (DCIM, ITEU und PUE)

Die Gewichtung ergab für die ITEU einen Median-Punktewert von 45 Punkten, für den PUE einen Median-Punktewert von 42 Punkten und für das DCIM einen Median-Punktewert von 13 Punkten. Für die Ermittlung des aggregierten Nachhaltigkeitswert werden die durch die Indikatoren erzielten Bewertungspunkte mit den Gewichtungspunkten multipliziert und anschließend addiert. Der daraus resultierende Prozentwert gibt auf einer Skala von 0-100 % die ökonomische Nachhaltigkeit für ein Rechenzentrum an. In Abbildung 15 ist eine beispielhafte Auswertung eines Rechenzentrums anhand von branchenüblichen Zahlen dargestellt.

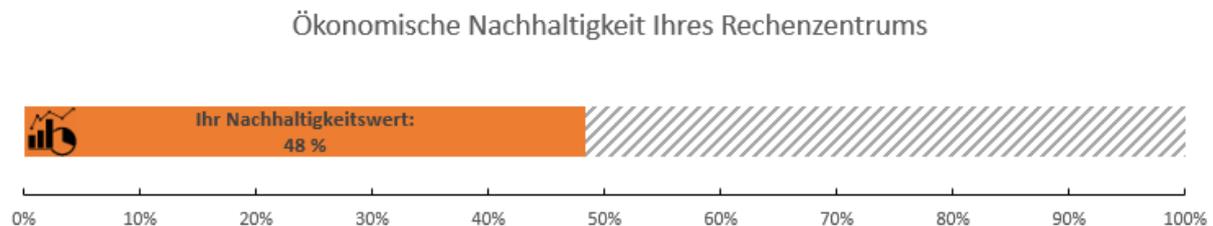


Abbildung 15: Beispielhafte Auswertung der ökonomischen Nachhaltigkeit

### 3.6 Zusammenfassung des Ökologisches Indikatorenset

Um Rechenzentren mit einem vertretbaren Verhältnis aus Aufwand und Ganzheitlichkeit bewerten und vergleichen zu können, wird die ökologische Nachhaltigkeit durch drei Indikatoren abgebildet. Alle drei Indikatoren werden quantifiziert. Jeder Indikator hat eine durch Expertenbefragungen ermittelte Gewichtung.

Quantifizierte Indikatoren:

- Abwärmenutzung
- Erneuerbare Energie
- Hardwarerecycling

Im Folgenden werden die einzelnen Indikatoren genauer beschrieben und deren Berechnung erläutert.

#### 3.6.1 Abwärmenutzung (ERF)

Die Bestimmung des Energy Reuse Factor (ERF) wird derzeit als ISO Norm unter der ISO/IEC 30134-6 überarbeitet (Stand 01/2019). Das Ziel ist es den Anteil der wiederverwendeten Energie aus dem RZ darzustellen. Da für die Bestimmung des ERF derzeit keine Formel vorliegt wurden für die Berechnung eine eigene Formel aufgestellt:

$$ERF = \frac{E_{Reuse}}{E_{IT} * K}$$

Formel 28: Berechnung des ERF

Für die Ermittlung der wiederverwendeten Energiemenge  $E_{Reuse}$  ist eine klare Trennung von interner und externer Nutzung nötig. Interne Abwärmenutzung wird nicht im REF berücksichtigt da diese Maßnahme im PUE verwendet wird (siehe Kapitel 3.5.2). Externe Abwärmenutzung ist gegeben, wenn die Nutzung strikt außerhalb der Systemgrenze des Rechenzentrums liegt. Ein Objekt ist außerhalb der Systemgrenze des Rechenzentrums sobald sein Energieverbrauch nicht als Energieverbrauch in der Bilanzierung des Rechenzentrumsenergieverbrauchs auftaucht. Ein Beispiel eines externen Verbrauchers ist der Heizenergieverbrauch von Bürogebäuden.

Alle Messungen sind über eine Betriebsdauer von 12 Monaten anzugeben.  $E_{IT}$  ist der Energieverbrauch gemessen an den PSU welche Server/Netzwerk/Storage versorgen. Hierbei wird ein Korrekturfaktor K von 1 verwendet. Ist an dieser Stelle die Messung nicht möglich werden folgende Korrekturfaktoren K zu dem gemessenen Wert multipliziert, um die Verzerrung anhand von branchenüblichen Verlustfaktoren zu berücksichtigen:

0,96: wenn die Messung hinter der USV erfolgt.

0,90: wenn die Messung vor der USV erfolgt.

$E_{Reuse}$  ist an der Übergabestelle zu messen welche die geringste Entfernung zur Quelle im Rechenzentrum hat. Im Falle einer Abwärmenutzung über Wärmetauscher ist die Wärmemenge als Messgröße zu wählen welche an den Abwärmenutzungskreislauf übergeben wird.

Die Bewertung des ERF erfolgt über eine gestufte Bewertungsformel (siehe: Formel 29) welche in Abbildung 16 dargestellt wird.

$$y(ERF) = \left\{ \begin{array}{l} 0 \text{ wenn } ERF = 0 \\ 0,2 \text{ wenn } 0 < ERF < 0,01 \\ 0,4 \text{ wenn } 0,01 < ERF \leq 0,05 \\ 0,6 \text{ wenn } 0,05 < ERF \leq 0,1 \\ 0,8 \text{ wenn } 0,1 < ERF \leq 0,3 \\ 1 \text{ wenn } ERF > 0,3 \end{array} \right.$$

Formel 29: Stufenformel des ERF

Die Bewertungsformel wurde als gestufte Funktion gewählt um Rechenzentrumsbetreibern konkrete Meilensteine in Ihren Nachhaltigkeitsbemühungen zu geben. Diese Meilensteine sind aufgrund ihrer scharfen Abtrennung sowohl intern als auch extern leichter zu kommunizieren und basieren im vorliegenden Fall auf den sowohl national und international erreichten und technisch möglichen

Abwärmennutzungsfaktoren.

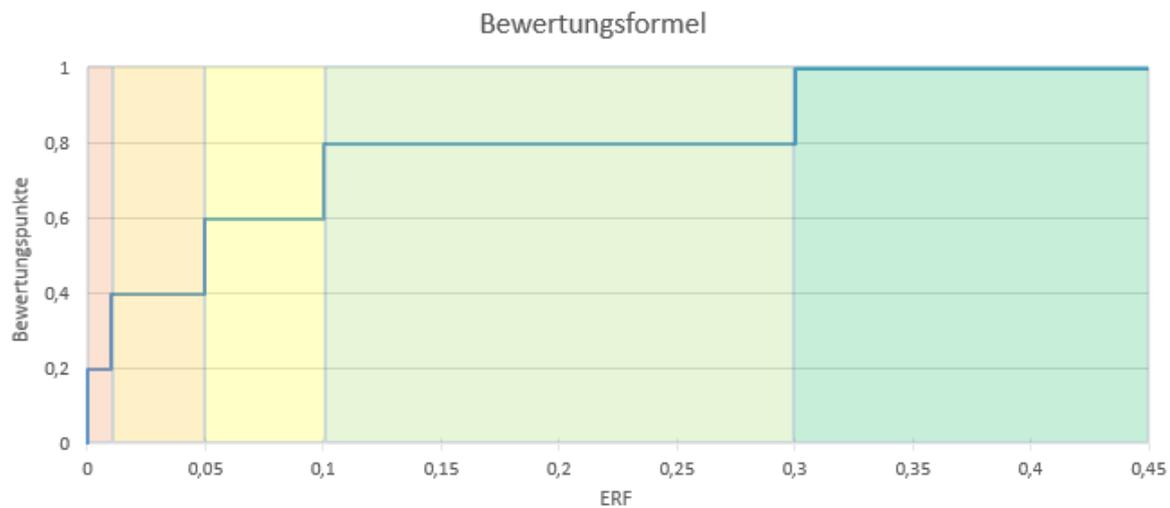


Abbildung 16: Visualisierung der Stufenbewertung (ERF)

### 3.6.2 Erneuerbare Energie (REF)

Die Bestimmung des Renewable Energy Factor (REF) wird derzeit als ISO Norm unter der ISO/IEC 30134-3 geführt (Stand 01/2019). Das Ziel ist es den Anteil der erneuerbaren Energie am Stromverbrauch des RZ darzustellen. Hierfür wird, basierend auf (ISO/IEC 30134-3:2016), folgende Formel verwendet:

$$REF = \frac{E_{Ren}}{E_{RZ}}$$

Formel 30: Berechnung des REF

$E_{Ren}$  bezeichnet die Summe der Erneuerbaren Energie.  $E_{RZ}$  bezeichnet den Energieverbrauch des Rechenzentrums. Für die Ermittlung des Anteils erneuerbaren Energie  $E_{ren}$  sind drei Quellen zulässig. Diese sind der Erneuerbare Energieanteil welcher vom Stromanbieter im Rahmen des gewählten Stromtarifs angegeben wird, die auf dem eigenen Gelände erneuerbare erzeugte Energie sowie die durch direktes Einkaufen von Grünstromzertifikaten erworbenen Zertifikatsnachweise. Für den Stromtarifbezogenen Anteil wird der EE-Anteil mit der bezogenen Strommenge in kWh multipliziert. Für die erneuerbare Eigenerzeugung auf dem eigenen Gelände wird die produziert Gesamtmenge in kWh verwendet solange die Strommenge auch im Rechenzentrum verbraucht wurde. Sollte die eigenerzeugte Strommenge den Eigenverbrauch übersteigen darf diese Strommenge nicht im  $E_{Ren}$  berücksichtigt werden. Die Grünstromzertifikate werden ebenfalls in kWh angegeben, entsprechend der Menge an Strom welche durch Zertifikate ausgewiesen sind. Diese Energiemengen werden zum Gesamtwert  $E_{Ren}$  zusammenaddiert. Für die Ermittlung des Gesamtstromverbrauchs des Rechenzentrums  $E_{RZ}$  wird der gesamte jährliche Stromverbrauch des Rechenzentrums herangezogen. Es gilt zu beachten das der REF nicht über den Wert 1 hinausgehen kann, was einem erneuerbaren Energieanteil von 100 % entspricht.

Die Bewertung des ERF erfolgt über eine gestufte Bewertungsformel (siehe: Formel 30) welche in Abbildung 17 dargestellt wird.

$$y(REF) = \begin{cases} 0 & \text{wenn } REF < 0,3 \\ 0,6 & \text{wenn } 0,3 \leq REF < 0,6 \\ 0,8 & \text{wenn } 0,6 \leq REF < 0,8 \\ 1 & \text{wenn } REF \geq 0,8 \end{cases}$$

Formel 31: Stufenformel des REF

Die Bewertungsformel wurde als gestufte Funktion gewählt um Rechenzentrumsbetreibern konkrete Meilensteine in Ihren Nachhaltigkeitsbemühungen zu geben. Diese Meilensteine sind aufgrund ihrer scharfen Abtrennung sowohl intern als auch extern leichter zu kommunizieren und basieren im vorliegenden Fall auf den vom Land (80 % bis 2050) bzw. Bund (30 % bis 2030 und 50 % bis 2050) festgelegten Klimazielen bezüglich des erneuerbaren Energieanteils.

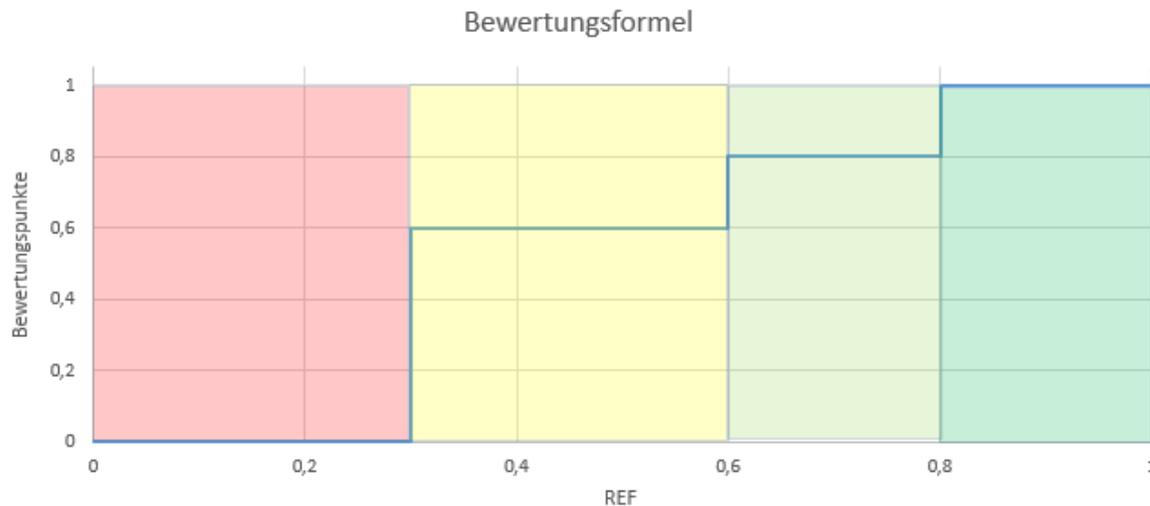


Abbildung 17: Visualisierung der Stufenbewertung (REF)

### 3.6.3 Hardwarerecycling (MRR)

Die Material Recycling Ratio (MRR) ist die für die Entsorgung von IT-Hardware gewählte Entsorgungsstrategie. Der Betreiber gibt in der Ausschreibung der Entsorgung an, welche Vorgehensweisen mit zu entsorgenden Komponenten zulässig sind. Diese ist Teil der Vergaberichtlinie der Ausschreibung. Hierfür sind vier Optionen denkbar.

**Option A:** Der Entsorger ist verpflichtet alle Komponenten zu entsorgen. Eine Weiterverwendung ist ausgeschlossen. Alle Komponenten werden im Entsorgungsprozess zerstört. Diese Option entspricht einer Bewertung von 0 Bewertungspunkten.

**Option B:** Der Entsorger ist verpflichtet alle Speichermedien zu entsorgen. Dies gilt für permanente sowie flüchtige Speicher (Festplatten, Ram, SSD, CPUs). Alle anderen Komponenten welche keine Daten speichern können sind zur Weiterverwendung freigegeben. Diese Option entspricht einer Bewertung von 0,4 Bewertungspunkten.

**Option C:** Der Entsorger ist verpflichtet alle permanenten (stromlose) Speichermedien zu entsorgen. Alle anderen Komponenten sind zur Weiterverwendung freigegeben. Diese Option entspricht einer Bewertung von 0,8 Bewertungspunkten.

**Option D:** Der Entsorger erhält alle Komponenten im zerstörungsfreien Zustand und ist berechtigt diese uneingeschränkt weiter zu verwenden. (Die fachgerechte und permanente Löschung aller Daten kann sowohl von Seiten des Entsorgers als auch Rechenzentrumsintern umgesetzt werden). Diese Option entspricht einer Bewertung von 1 Bewertungspunkt.

Anmerkung Colocation: Ein Colocation Anbieter kann das Recycling/Refurbishment von Komponenten für seine Kunden anbieten. Bietet er dies für alle Komponenten an, so erhält er abhängig der angebotenen Option eine Bewertung. (Unabhängig ob die Kunden den Service annehmen oder nicht). Bietet der Colocation Anbieter Option B, C oder D an, so muss dieser die hierfür nötige Löschung von Datenträgern ebenfalls anbieten.

$$y(\text{MRR}) = \begin{cases} 0 & \text{wenn MRR} = \text{Option A} \\ 0,4 & \text{wenn MRR} = \text{Option B} \\ 0,8 & \text{wenn MRR} = \text{Option C} \\ 1 & \text{wenn MRR} = \text{Option D} \end{cases}$$

Da es sich hierbei um vier konkrete Handlungsoptionen handelt, lässt sich die MMR nicht direkt über eine Formel quantifizieren. Es handelt sich hierbei vielmehr um eine Handlungsoption die an eine Punktebewertung geknüpft ist. Die Zuteilung der jeweiligen Bewertungspunkte lässt sind aufgrund ihrer scharfen Abtrennung sowohl intern als auch extern leicht kommunizieren und basieren im vorliegenden Fall auf der gewählten Handlungsoption bezüglich dem Umgang mit IT-Hardware. Die Höhe der Bewertungspunkte ist nicht linear zwischen den vier Handlungsoptionen verteilt um den verfügbaren Mengen an IT-Hardware Rechnung zu tragen die durch die verschiedenen Optionen wiederverwendet werden können.

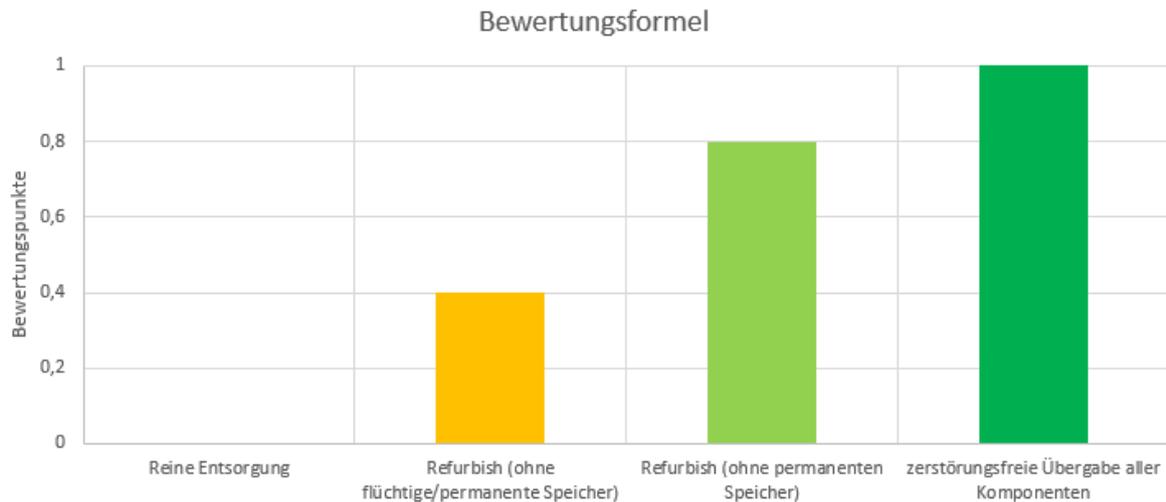


Abbildung 18: Visualisierung der Stufenbewertung (MRR)

### 3.6.4 Gewichtung und aggregierter Indikator

Für die Gewichtung der ökologischen Nachhaltigkeitsindikatoren wurde eine Expertenbefragung durchgeführt bei der die Experten die Indikatoren auf einer 100 Punkte Summenskala, bezüglich ihrer Gewichtung/Wichtigkeit bewerten konnten. Es konnten also 100 Punkte auf die drei Indikatoren verteilt werden. Insgesamt konnten Rückmeldungen von sechs Branchenvertreter akquiriert werden. Die Ergebnisse als Box-Plot sind in Abbildung 19 dargestellt. Diese visualisieren sowohl den Median, den Interquartilsabstand als auch das obere und untere Quantil.

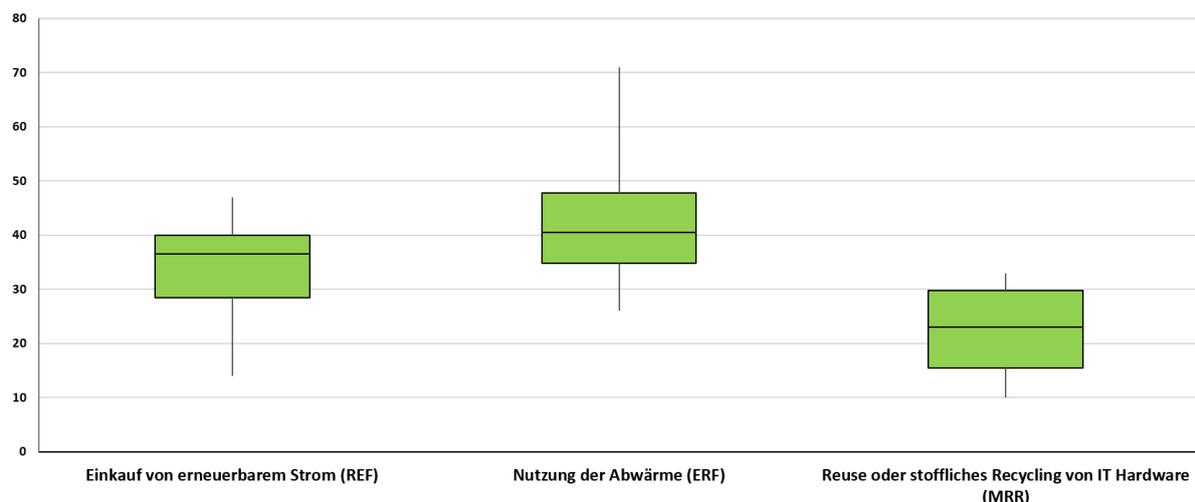


Abbildung 19: Box-Plot der Gewichtung ökologischer Indikatoren

Die Gewichtung ergab für den REF einen Punktwert von 36,5 Punkten, für den ERF einen Punktwert von 40,5 Punkten und für die MRR einen Punktwert von 23 Punkten. Für die Ermittlung des aggregierten Nachhaltigkeitswert werden die durch die Indikatoren erzielten Bewertungspunkte mit

den Gewichtungspunkten multipliziert und anschließend zusammenaddiert. Der daraus resultierende Wert gibt auf einer Skala von 0-100 % die ökologische Nachhaltigkeit für ein Rechenzentrum an. In Abbildung 20 ist eine beispielhafte Auswertung eines Rechenzentrums anhand von branchenüblichen Zahlen dargestellt.

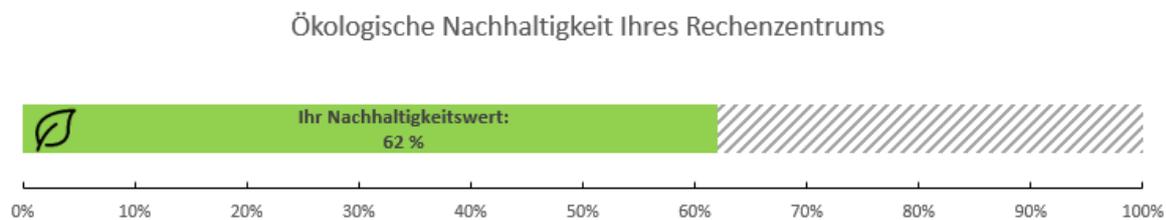


Abbildung 20: Beispielhafte Auswertung der ökologischen Nachhaltigkeit

### 3.7 Zusammenfassung des Soziales Indikatorenset

Um die soziale Aspekte der Nachhaltigkeit von Rechenzentren mit einem vertretbaren Verhältnis aus Aufwand und Nutzen darstellen zu können wurden fünf Indikatoren aufgestellt welche aus den oben genannten Kriterien abgeleitet wurden. Diese wurden bei Expertenbefragungen als die wichtigsten Einflussgrößen auf die soziale Nachhaltigkeit identifiziert. Die Reduzierung auf fünf Indikatoren ermöglicht es den Rechenzentrumsbetreibern mit geringem Aufwand die Daten zu erheben und so einen Vergleich mit anderen Rechenzentren durchzuführen da hier auch Informationen von externen Anbietern/Dienstleistern erforderlich sind.

Drei der sozialen Nachhaltigkeitsindikatoren sind ebenfalls als Zahlenwert zwischen Null und Eins zu quantifizieren. Zwei weitere sind also Binäre Indikatoren eingebunden. Jeder Indikator hat eine durch Expertenbefragungen ermittelte Gewichtung. Eine Addition aller Indikatorenwerte berechnet den Gesamtindikator und vereinfacht den Vergleich und die Kommunikation der sozialen Nachhaltigkeit.

Quantifizierte Indikatoren:

- Weiterbildung
- Ausbildung
- Mitarbeiterzufriedenheit

Binäre Indikatoren:

- Arbeitsbedingungen der Hersteller
- Konfliktfreiheit der Rohstoffe

Im Folgenden werden die einzelnen Indikatoren genauer beschrieben und deren Berechnung erläutert.

#### 3.7.1 Weiterbildung (FER)

Die Further Education Ratio (FER) ist das Verhältnis aus Anzahl der Fort- und Weiterbildungstagen zur Anzahl an Mitarbeitern. Hierfür wird folgende Formel verwendet:

$$FER = \frac{\sum \text{Fortbildungstage}}{\sum \text{Mitarbeiter}}$$

Formel 32: Berechnung der FER

Für die Ermittlung der FER werden nur Mitarbeiter des eigenen Rechenzentrums gezählt welche in Ihrer Haupttätigkeit im Rechenzentrum arbeiten oder in administrativer Form auf das Rechenzentrum zugreifen. Dienstleister von Dritten werden nicht berücksichtigt.

Als Fort- oder Weiterbildung gelten alle Aktivitäten die Kenntnisse auf beruflicher Ebene erweitern, vertiefen oder neu schaffen. Dazu zählen unter anderem Erhaltungsfortbildungen, Anpassungsfortbildungen, Erweiterungsfortbildungen und Aufstiegsfortbildungen. Die Teilnahme an Konferenzen, Tagungen oder Vorträgen sind ebenfalls als Fortbildung anzusehen.

Für einen einzelnen Mitarbeiter können maximal 15 Fort/Weiterbildungen angerechnet werden. Weiterbildung für die digitale Welt ist kein Selbstläufer. Im Durchschnitt stehen nur 2,3 Weiterbildungstage pro Mitarbeiter zur Verfügung und jedes fünfte Unternehmen gibt an, gar keine Fortbildungen anzubieten (BITKOM 2018b).

Die Bewertung des ERF erfolgt über eine gestufte Bewertungsformel (siehe: Formel 33) welche in Abbildung 21 dargestellt wird.

$$y(\text{FER}) = \begin{cases} 0 & \text{wenn } \text{FER} < 1 \\ 0,3 & \text{wenn } 1 \leq \text{FER} < 2,3 \\ 0,5 & \text{wenn } 2,3 \leq \text{FER} < 4 \\ 0,8 & \text{wenn } 4 \leq \text{FER} < 6 \\ 1 & \text{wenn } \text{FER} > 6 \end{cases}$$

Formel 33: Stufenformel der FER

Die Bewertungsformel wurde als gestufte Funktion gewählt um Rechenzentrumsbetreibern konkrete Meilensteine in Ihren Nachhaltigkeitsbemühungen zu geben. Diese Meilensteine sind aufgrund ihrer scharfen Abtrennung sowohl intern als auch extern leichter zu kommunizieren und basieren im vorliegenden Fall auf jährlicher und vierteljährlicher Fortbildung. Desweiteren wurde der Branchendurchschnitt (2,3) aus (BITKOM 2018b) und der Höchstwert (6) selbiger Studie als Meilensteine verwendet.

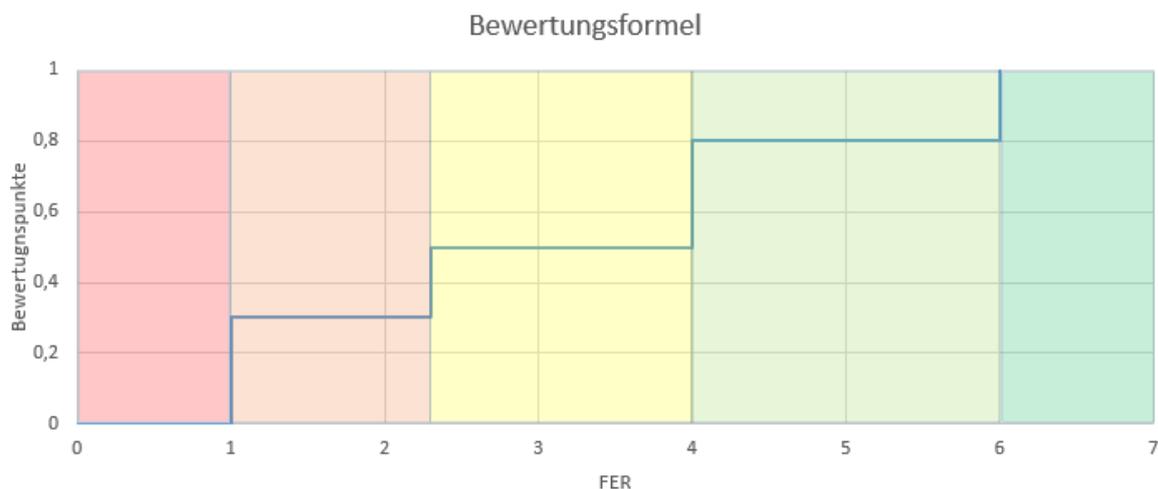


Abbildung 21: Visualisierung der Stufenbewertung (FER)

### 3.7.2 Ausbildung (AA)

Die Apprenticeship Availability (AA) ist das Verhältnis aus der Anzahl an Mitarbeitern die eine Ausbildung im Unternehmen gemacht haben (oder derzeit machen) zur Gesamtzahl der Mitarbeiter. Für die Berechnung der Apprenticeship Availability wird folgende Formel verwendet:

$$AA = \frac{\sum \text{ehem. Azubis} + \sum \text{Azubis}}{\sum \text{Mitarbeiter}}$$

Formel 34: Berechnung der AA

Für die Ermittlung der AA werden nur Mitarbeiter des eigenen Rechenzentrums berücksichtigt welche in Ihrer Haupttätigkeit im Rechenzentrum arbeiten oder in administrativer Form auf das Rechenzentrum zugreifen. Dienstleister von Dritten werden nicht berücksichtigt. Als Azubi oder ehemalige Azubi gelten alle Mitarbeiter welche derzeit oder in der Vergangenheit eine Ausbildung im genannten Unternehmen absolviert haben und derzeit noch im Rechenzentrum tätig sind.

Die Bewertung des ERF erfolgt über eine gestufte Bewertungsformel (siehe: Formel 35) welche in Abbildung 22 dargestellt wird.

$$y(AA) = \begin{cases} 0 & \text{wenn } AA = 0 \\ 0,2 & \text{wenn } 0 < AA \leq 0,035 \\ 0,6 & \text{wenn } 0,035 \leq AA \leq 0,3 \\ 1 & \text{wenn } AA > 0,3 \end{cases}$$

Formel 35: Stufenformel der AA

Die Bewertungsformel wurde als gestufte Funktion gewählt um Rechenzentrumsbetreibern konkrete Meilensteine in Ihren Nachhaltigkeitsbemühungen zu geben. Diese Meilensteine sind aufgrund ihrer scharfen Abtrennung sowohl intern als auch extern leichter zu kommunizieren und basieren im vorliegenden Fall auf der Anzahl von IT-Azubies anteilig zur Gesamtzahl erwerbstätiger IT-Fachleute bzw. zur Gesamtzahl an Beschäftigten in Rechenzentren in Deutschland.

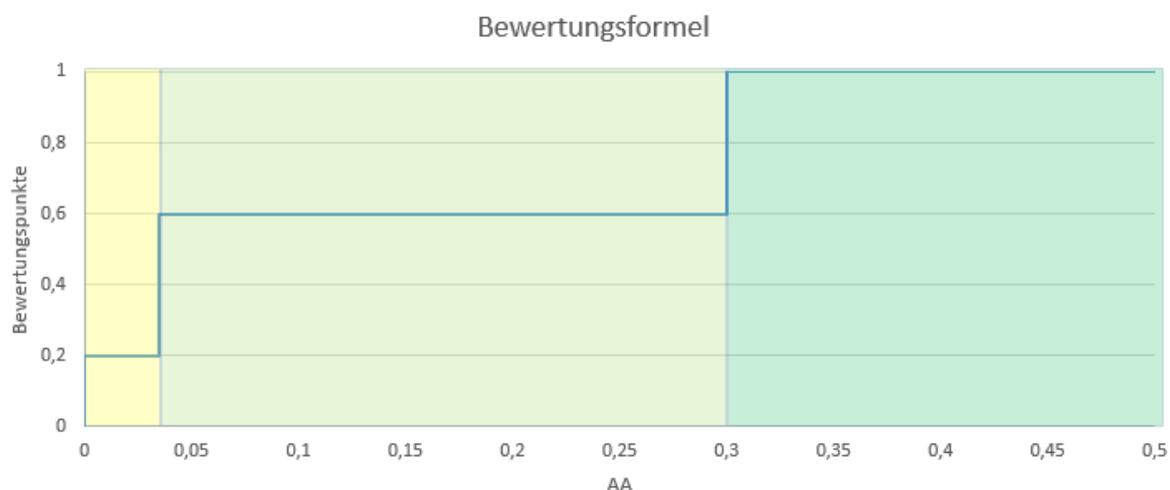


Abbildung 22: Visualisierung der Stufenbewertung (AA)

### 3.7.3 Mitarbeiterzufriedenheit (SM)

Die Mitarbeiterzufriedenheit bzw. Staff Moral (SM) ist der Verhältnis aus der Summe aller Betriebszugehörigkeitsjahre (BZJ) im Verhältnis zur Anzahl der Mitarbeiter. Sie beschreibt somit die durchschnittliche Betriebszugehörigkeit für ein Rechenzentrum und wird als Proxy für die Mitarbeiterzufriedenheit verwendet. Die Staff Moral wird in Anlehnung an (Havighorst 2006) mit folgender Formel beschrieben:

$$SM = \frac{\sum BZJ}{\sum \text{Mitarbeiter}}$$

Formel 36: Berechnung der SM

Gezählt werden nur Mitarbeiter des eigenen Rechenzentrums welche in Ihrer Haupttätigkeit im Rechenzentrum arbeiten oder in administrativer Form auf das Rechenzentrum zugreifen. Dienstleister von Dritten werden nicht berücksichtigt.

Die Bewertung des ERF erfolgt über eine gestufte Bewertungsformel (siehe: Formel 35) welche in dargestellt wird.

$$y(SM) = \begin{cases} 0 & \text{wenn } 0 \leq SM \leq 5 \\ 0,4 & \text{wenn } 5 < SM \leq 7 \\ 0,6 & \text{wenn } 7 < SM \leq 9 \\ 0,8 & \text{wenn } 9 < SM \leq 10,8 \\ 1 & \text{wenn } SM > 10,8 \end{cases}$$

Formel 37:Stufenformel der SM

Die Bewertungsformel wurde als gestufte Funktion gewählt um Rechenzentrumsbetreibern konkrete Meilensteine in Ihren Nachhaltigkeitsbemühungen zu geben. Diese Meilensteine sind aufgrund ihrer scharfen Abtrennung sowohl intern als auch extern leichter zu kommunizieren und basieren im vorliegenden Fall auf einer fünfteiligen Unterteilung mit der durchschnittlichen Betriebszugehörigkeit in Deutschland (10,8 Jahre) als Obergrenze.

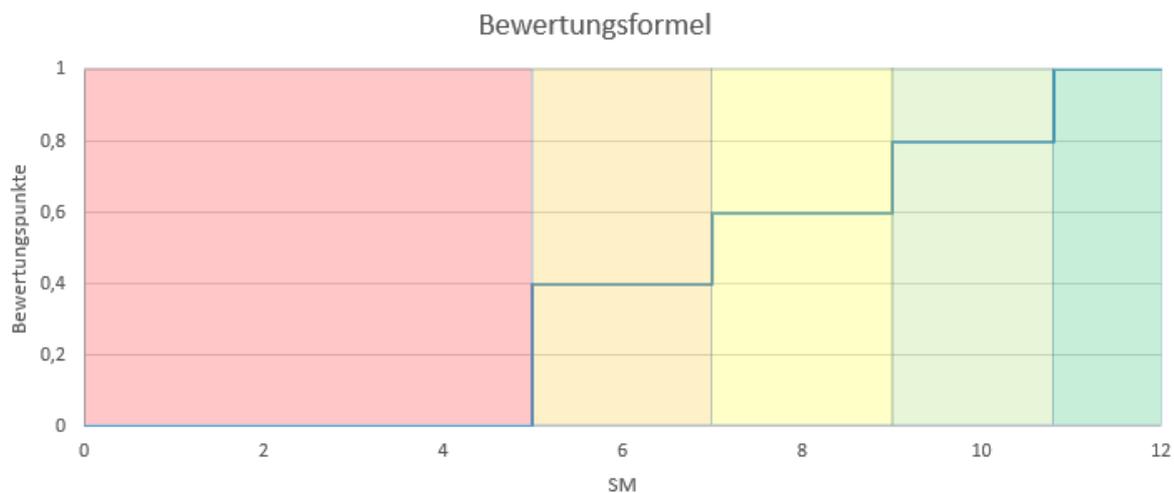


Abbildung 23: Visualisierung der Stufenbewertung (SM)

### 3.7.4 Sozialstandards der Hersteller

Die Arbeitsbedingungen in der Herstellung von Halbleiterprodukten ist aus Konsumentensicht schwer zu überprüfen. Das liegt unter anderem daran das fast alle IT-Komponenten außerhalb der EU produziert werden und es folglich keine Möglichkeit gibt direkt regulatorisch auf die Produktionsländer einzuwirken oder diese umfangreich zu kontrollieren. Mit dem, auf Konventionen der Internationalen Arbeitsorganisation (ILO) basierenden, internationalem Standard SA8000 der Social Accountability International (SAI) Organisation gibt es für Unternehmen die Möglichkeit das Erfüllen von Standards in den Arbeitsbedingungen durch eine Zertifizierung öffentlich zu machen (siehe Kapitel 3.4.3.1). Andere Nachweise von Sozialstandards und Sozialmaßnahmen sind ebenfalls möglich, wie zu Beispiel die Selbstverpflichtung nach dem Siegel der Fair Labor Association (FLA). Es ist jedoch darauf zu achten das die Glaubwürdigkeit der Zertifikate und Siegel kritisch hinterfragt werden muss und immer einer Einzelprüfung unterliegt.

Rechenzentrumsbetreiber können über die Bedingungen in den Ausschreibungen und im Festlegen von Kriterien in den Beschaffungsrichtlinien direkten Einfluss auf die Relevanz von Arbeitsbedingungen von Hardwareherstellern nehmen. Diese Einflussnahme wird in einem binären Indikator abgebildet:

$$\text{Sozialstandards} = \begin{cases} 0 & \text{wenn keine Sozialstandards in Beschaffung} \\ 1 & \text{wenn Sozialstandards in Beschaffung} \end{cases}$$

Formel 38: Berechnung der Einhaltung von Sozialstandards

Sozialstandards in der Beschaffung gelten als erfüllt, wenn:

- Die Zertifizierung nach SA8000 in Ausschreibungen als Kriterium berücksichtigt wird
- Die Zertifizierung nach SA8000 als Kriterium im Einkauf berücksichtigt wird

- Andere Nachweise von Sozialmaßnahmen in Ausschreibungen als Kriterium berücksichtigt werden
- Andere Nachweise von Sozialmaßnahmen als Kriterium im Einkauf berücksichtigt werden

### 3.7.5 Konfliktfreiheit der Rohstoffe

Wie auch bei den Sozialstandards der IT-Hardwarehersteller ist ein Nachweis der Konfliktfreiheit von Rohstoffen schwer zu überprüfen. Dies liegt unter anderem daran, dass Rechenzentrumsbetreiber das Ende einer sehr langen Wertschöpfungskette sind und zwischen den Rohstoffen und dem Endprodukt viele Unternehmen und Zwischenprodukte involviert sind. Eine Zertifizierung der gesamten Lieferkette würde einen hohen Verwaltungsaufwand mit hohen Kosten auf allen Produktstufen bedeuten. Die Zertifizierung eines Zwischenproduktes ist zudem nicht überprüfbar da ein geologischer (bzw. chemischer) Herkunftsnachweis nur vor der Rohstoffschmelze möglich ist (ZVEI 2013).

Das von der Conflict-Free Sourcing Initiative entwickelte Conflict-Free Smelter Programm (CFSP) setzt an einer Stelle in der Lieferkette an, an der die Rückverfolgung der Minerale bis zum Bergwerk noch einfach realisierbar ist. Dies sind die Hütten und Raffinerien die im Vergleich zu Bergwerken in Ihrer Anzahl überschaubar sind. Hier wird versucht über Auditierung und Zertifizierung die Konfliktfreiheit von diesen Einrichtungen nachzuweisen und den Unternehmen so eine Möglichkeit zu geben Konfliktfreie Rohstoffe zu beziehen. Die Konfliktfreiheit wird im Rahmen des Projektes mit folgender Formel abgebildet:

$$\text{Konfliktfreiheit} = \begin{cases} 0 & \text{wenn keine Konfliktfreiheit in Beschaffung} \\ 1 & \text{wenn Konfliktfreiheit in Beschaffung} \end{cases}$$

Konfliktfreiheit in der Beschaffung gilt als erfüllt, wenn:

- Ein Nachweis der Konfliktfreiheit in Ausschreibungen als Kriterium berücksichtigt wird
- Ein Nachweis der Konfliktfreiheit als Kriterium im Einkauf berücksichtigt wird

Die Konfliktfreiheit muss hierbei in der Beschaffung kein Ausschlusskriterium darstellen, sondern lediglich in die Auswahl miteinfließen.

### 3.7.6 Gewichtung und aggregierter Indikator

Für die Gewichtung der sozialen Nachhaltigkeitsindikatoren wurde eine Expertenbefragung durchgeführt bei der die Experten die Indikatoren auf einer 100 Punkte Summenskala, bezüglich ihrer Gewichtung/Wichtigkeit bewerten konnten. Es konnten also 100 Punkte auf die fünf Indikatoren verteilt werden. Insgesamt konnten Rückmeldungen von sechs Branchenvertreter akquiriert werden. Die Ergebnisse als Box-Plot sind in Abbildung 24 dargestellt. Diese visualisieren sowohl den Median, den Interquartilsabstand als auch das obere und untere Quantil.

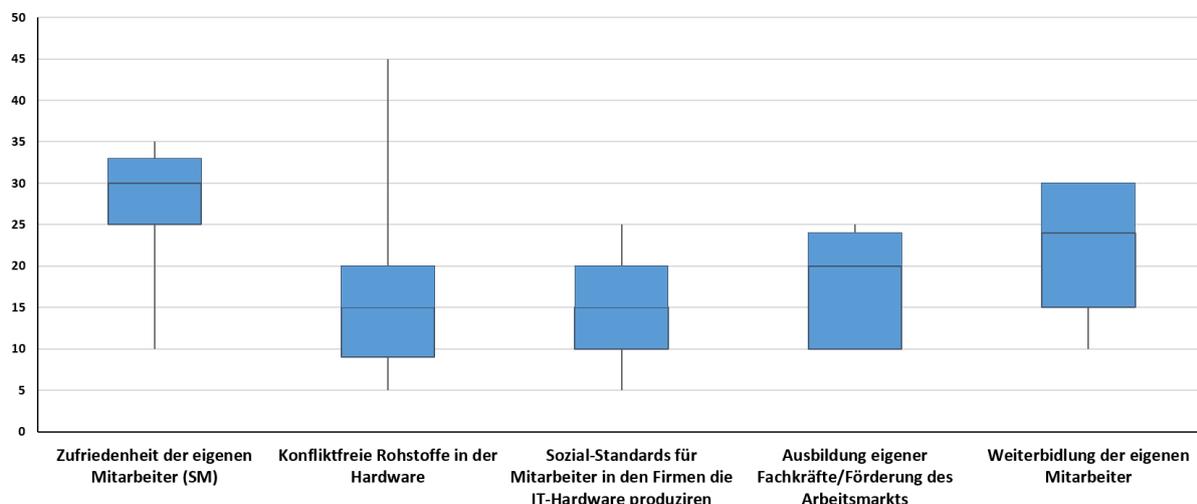


Abbildung 24: Box-Plot der Gewichtung sozialen Indikatoren

Die Gewichtung ergab für die SM einen Punktwert von 30 Punkten, für die FER einen Punktwert von 24 Punkten, für die AA einen Punktwert von 20 Punkten, für die Konfliktfreiheit der Rohstoffe 15 Punkte und die Sozial-Standards bei Hardwareherstellern 15 Punkte. Für die Ermittlung des aggregierten Nachhaltigkeitswert werden die durch die Indikatoren erzielten Bewertungspunkte mit den Gewichtungspunkten multipliziert und anschließend zusammenaddiert. Der daraus resultierende Wert gibt auf einer Skala von 0-100 % die soziale Nachhaltigkeit für ein Rechenzentrum an. In Abbildung 25 ist eine beispielhafte Auswertung eines Rechenzentrums anhand von branchenüblichen Zahlen dargestellt.

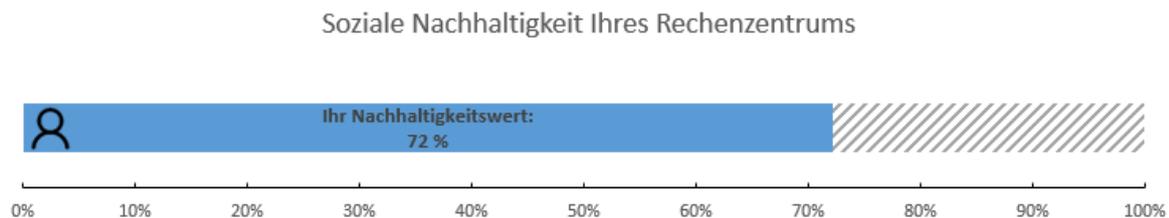


Abbildung 25: Beispielhafte Auswertung der sozialen Nachhaltigkeit

### 3.8 Ergebnisse der Leistungsbewertung von Rechenzentren

Das vorgestellte Indikatorenset lässt sich von Rechenzentrumsbetreibern für ein internes Benchmarking zur Eigenoptimierung heranziehen. Die Ergebnisse dieser Bewertung oder Auszüge aus dieser können auch extern in der Unternehmenskommunikation eingesetzt werden. Die externe Kommunikation der Ergebnisse wird vom Forschungskonsortium jedoch nicht empfohlen da es nicht möglich ist die unterschiedlichen Anforderungen an Rechenzentren abzubilden. Gesteigerte Anforderungen bezüglich der Verfügbarkeit oder Sicherheit eines Rechenzentrums verursachen in der Regel höhere Energieverbräuche und somit schlechtere Bewertungen mit dem hier genannten Indikatorenset. Das vorgestellte Indikatorenset lässt sich von Rechenzentrumsbetreibern somit primär als ein Selbsteinschätzung („Eigenbenchmarking“) heranziehen. Eine Excel-Version mit automatischer Auswertung steht als Download unter der Adresse [www.nachhaltige-rechenzentren.de](http://www.nachhaltige-rechenzentren.de) zur Verfügung.

### 3.9 Standortindikatoren für Rechenzentren

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt ein Bewertungssystem für den Betrieb eines Rechenzentrums entwickelt wurde, werden im Folgenden Standortfaktoren für Rechenzentren untersucht und ein Indikatorenset abgeleitet welches einen nachhaltigen Standort von Rechenzentren beschreibt. Daten zu den identifizierten Indikatoren werden für Baden-Württemberg recherchiert und durch ein Standortrating ausgewertet.

### 3.10 Überblick der Literatur zu Standortfaktoren

Standortkriterien für Rechenzentren wurden in einer Literaturanalyse aufgelistet und den Kategorien Ökonomie, Ökologie, Sozial, Politik und Sicherheit zugeordnet. Insgesamt wurden 16 Veröffentlichungen berücksichtigt. (Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik 2019; Hintemann 2017b; Schmitz und Ostler 2014; Ostler 2009; Acton et al. 2018; Bowman und Deneny 2012; Mena et al. 2014; Covas et al. 2013b; Depoorter et al. 2015; Covas et al. 2013a; Daim et al. 2013; Abbasov et al. 2009; OUNIFI et al. 2015; Carter und Hines 2018)

Im Bereich der ökologischen Standortfaktoren listet die *European Energy Efficiency Plattform (E3P)* des *Joint Research Centre* der Europäischen Kommission fünf geografische Faktoren auf welche für den Bereich Energieeffizienz berücksichtigt werden sollen. Diese sind in Abschnitt 8.2 des *2018 Best Practice Guidelines for the EU Code of Conduct on Data Center Energy Efficiency* aufgelistet und enthalten die Faktoren Abwärmepotenzial, Umgebungstemperatur, Luftfeuchtigkeit, Grundwasserkühlung und Entfernung zum Energieerzeuger (Acton et al. 2018). In der Literaturanalyse wurden für Ökologische Kriterien, absteigend nach Häufigkeit, die Temperatur, Wärmeabnehmer, Wärmesenken, Luftfeuchtigkeit, Verfügbarkeit von erneuerbarer Energie, Fernwärmeanschlüsse und Wasserentsorgung genannt. Ökonomische Kriterien sind absteigend ihrer Häufigkeit in der Literatur,

die Verfügbarkeit von Bandbreite, der Strompreis, die Höhe von Steuern, Zuverlässige Stromversorgung, die Latenz, Grundstückspreise, Gehälter und der Abstand zum eigenen Firmensitz. Soziale Kriterien sind absteigend ihrer Häufigkeit in der Literatur, die Verfügbarkeit von Fachpersonal, die Erreichbarkeit durch Verkehrsmittel, die Kundennähe, die Verfügbarkeit von Zulieferern und allgemeine Lebensqualität am Standort.

Essentiell für den nachhaltigen Betrieb von Rechenzentren ist auch deren Sicherheit. Hier wurden der Abstand zu Hochwassergebieten, Erdbebenzonen, Atomkraftwerken, Gaspipelines und explosionsgefährdeten Betrieben wie Tankstellen am häufigsten genannt. Diese Kriterien sind von besonderer Relevanz, wenn das Risiko nicht durch Maßnahmen gemindert werden kann. Dies ist z.B. die Gefahr durch Atomkraftwerke da es keine baulichen Maßnahmen gibt die es einem Rechenzentrumsbetreiber erlaubt im Falle einer Quarantänezone weiterhin Personal in das Gebiet zu entsenden. Als politische Rahmenkriterien wurden Datenschutz, Rechtssicherheit, Genehmigungsdauer und staatliche Förderprogramme für die Standortwahl genannt.

### 3.11 Standortkriterien für Rechenzentren in Baden-Württemberg

Für die Erstellung eines Indikatorensets wurden die drei meistgenannten Kriterien aus den Bereichen Ökonomie, Ökologie und Sozialem ausgewählt (siehe Abbildung 26). Politische Rahmenbedingungen werden nicht berücksichtigt da sich die Analyse auf Baden-Württemberg bezieht und der politische Rahmen hier als homogen angesehen wird. Die Rubrik der Sicherheit wird für Baden-Württemberg ebenfalls nicht berücksichtigt da die geographischen Risiken durch ökonomische Maßnahmen kompensiert werden können und das nicht-kompensierbare Risiko durch Atomkraftwerke vernachlässigbar ist, da in Baden-Württemberg bis zum Jahr 2023 alle Atomkraftwerke abgeschaltet werden.

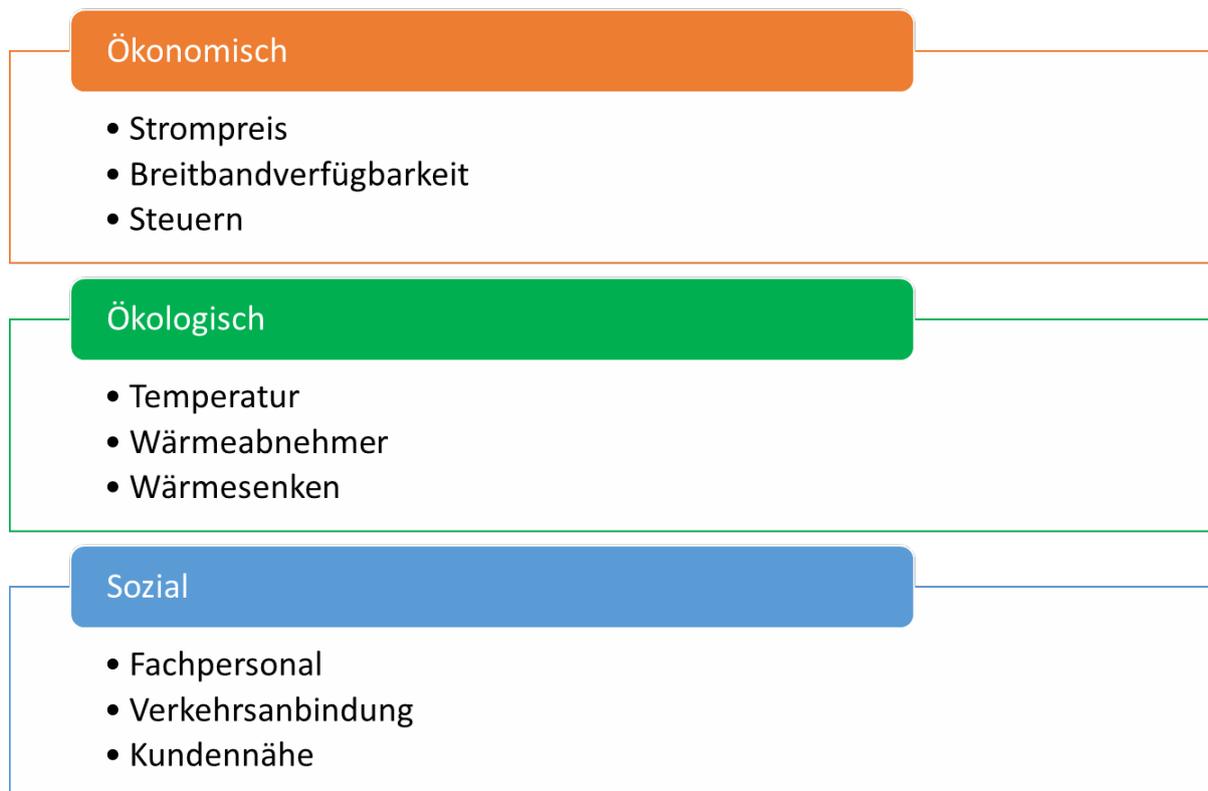


Abbildung 26: Berücksichtigte Standortkriterien

### 3.12 Datenerhebung, Bewertung & Auswertung

#### 3.12.1 Datenerhebung & Bewertung

Für die Datenerhebung wurden georeferenzierte Daten für Baden-Württemberg recherchiert um die in Kapitel 3.11 identifizierten Indikatoren abzubilden.

### 3.12.1.1 Strompreis

Der Strompreis setzt sich aus den Preisen für die Stromerzeugung, Netznutzung und Steuern bzw. Abgaben zusammen. Durch den liberalisierten Strommarkt ist es Kunden möglich den Stromanbieter zu wechseln und so Einfluss auf den Strompreis zu nehmen. Die Kostenkomponente für die Nutzung der Stromnetze (die sog. Netzentgelte) sind jedoch abhängig vom lokalen Netzbetreiber und werden vom Stromanbieter an die Kunden weitergereicht. Die Höhe der ortsabhängigen Netzentgelte wird somit als Approximation für den ortsabhängigen Strompreis herangezogen.

Für die Datenerhebung wurden Informationen der Netzbetreiber durch die Bundesnetzagentur zur Verfügung gestellt. Diese wurden durch eigene Recherchen erweitert da der Datensatz der BNetA nicht vollständig war. Als Berechnungsgrundlage für die Netzentgelte wurde ein Referenzrechenzentrum mit einem Jahresverbrauch von 1.200.000 kWh und einer Jahreshöchstlast von 300kW angenommen. Außerdem wurde eine Entnahme aus der Mittelspannung mit registrierter Leistungsmessung (RLM) angenommen. Anschließend wurde der Netzentgelte abhängig von der Gemeinde berechnet. Um die Werte zu normalisieren wurden die Werte der Stromnetzbetreiber in eine Bewertungsskala mit zehn 0,1-Stufen unterteilt (hier als Strompreisrating bezeichnet). Die Unterteilung erfolgt an den Dezilen der Netzentgelte. Der Begriff Dezil stammt aus dem lateinischen („Zehntelwert“) und beschreibt die Menge der verteilten Werte, wenn diese in zehn umfangsgleiche Teile zerlegt werden. Es handelt sich folglich um ein relatives Rating.

$$\text{Strompreis} \approx \text{Netzentgelte} \xrightarrow{\text{Dezentile Normalisierung}} \text{Strompreis Rating } [0,1]$$

Mit Unterstützung durch das Unternehmen „Lutum + Tappert“<sup>2</sup> wurden die Daten georeferenziert (siehe Abbildung 27).

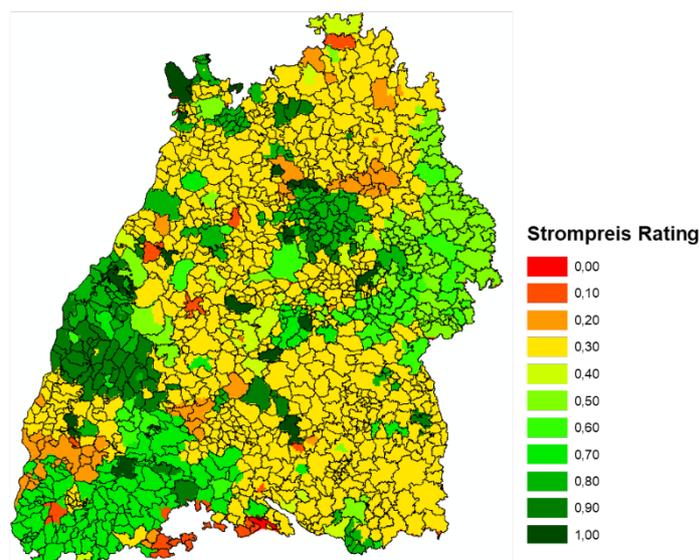


Abbildung 27: Falschfarbendarstellung des Strompreisratings [Quadratkilometerebene]

In absoluten Werten betrachtet unterscheiden sich die Netzentgelte in Baden-Württemberg nicht signifikant. Über die dezile Bewertung können jedoch regionale Unterschiede erkannt werden. Besonders auffällig sind hier die geringen Netzentgelte in Mannheim sowie im Ortenaukreis.

### 3.12.1.2 Breitbandverfügbarkeit

Die Verfügbarkeit von Glasfaserinfrastruktur ist für den Betrieb eines Rechenzentrums von großer Bedeutung. Die Verfügbarkeit von Glasfaseranbindungen ist in Baden-Württemberg ortsabhängig und zeigt ein starkes Gefälle zwischen städtischen und ländlichen Gebieten. Als Approximation der Breitbandverfügbarkeit wurden sowohl die Glasfaserinfrastruktur als auch Zugangspunkte zu diesem Netz berücksichtigt.

<sup>2</sup> <https://www.geomarketing.de/>

Für die Datenerhebung wurden Daten aus dem Infrastrukturatlas „Planung“ der Bundesnetzagentur entnommen (ISA-Planung). Berücksichtigt wurden die Trassenverläufe der Glasfaserinfrastruktur sowie die Position von Zugangspunkten zu den Glasfasernetzen. Da es sich um sensible Daten handelt wurden die Daten zuerst auf ein 50-Meter Raster verallgemeinert und anschließend in einem 1x1 Kilometer-Raster erneut verallgemeinert. Der kürzeste Abstand von den Mittelpunkten der 1x1 km Raster von Baden-Württemberg zur nächsten Glasfasertrasse und Zugangspunkt wurde berechnet. Beide Werte wurden anschließend in einer Skala in fünf 0,2-Stufen normalisiert und anschließend in gleicher Gewichtung addiert und erneut auf einen Zahlenraum zwischen 0 und 1 normalisiert. Die Stufung der Skala erfolgte absteigend von 1 nach den Abstandswerten 500, 750, 1000, 1250 und 1500 Metern.

$$\text{Breitbandverfügbarkeit} \approx \frac{\text{Abstand}_{\text{Glasfaser}} + \text{Abstand}_{\text{Zugangspunkt}}}{2} \xrightarrow{\text{gestufte Normalisierung}} \text{Breitband Rating [0,1]}$$

Die Daten wurden auf Quadratkilometerebene georeferenziert (siehe Abbildung 28). *Die Rohdaten wurden in der Abbildung 28 nicht dargestellt da eine Freigabe der Daten bis zum Zeitpunkt dieses Berichts noch nicht vorlag.*

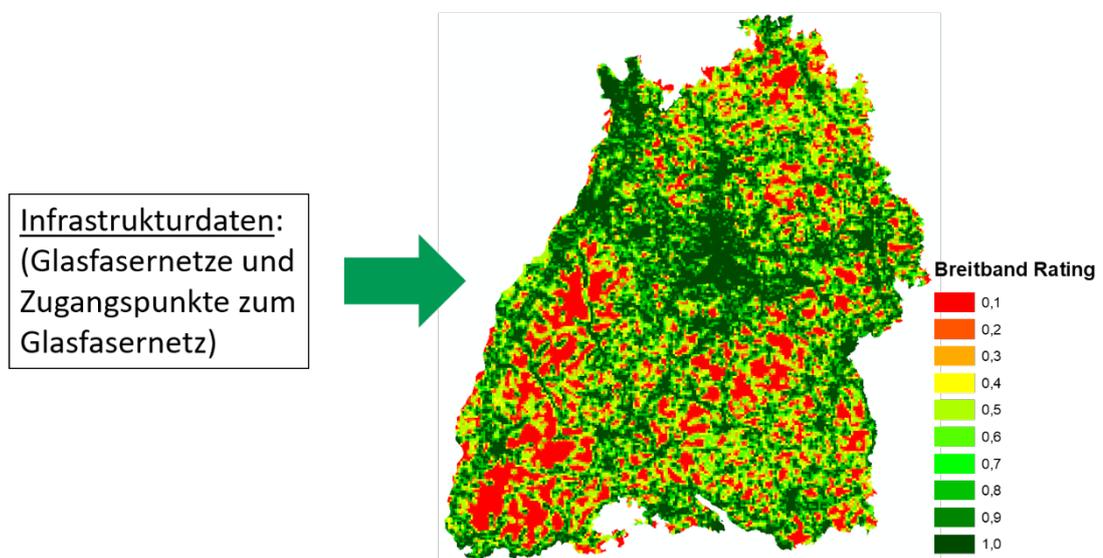


Abbildung 28: Falschfarbedarstellung des Breitbandratings [Quadratkilometerebene]

### 3.12.1.3 Steuern

Ortsabhängige Steuern in Baden-Württemberg sind die Gemeindesteuern. Von Relevanz für Rechenzentren sind davon die Grundsteuer und die Gewerbesteuer. Steuern die nicht auf Gemeindeebene erhoben werden sind für das Bundesland einheitlich und somit kein Differenzierungsmerkmal.

Für die Datenerhebung wurden Informationen der Hebesätze von Gewerbe- und Grundsteuer des Statistischen Landesamtes Baden-Württemberg verwendet (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2020a). Um die Werte zu normalisieren wurden die Werte der Hebesätze addiert (Die Grundsteuer wurde hier nur zu 10 % berücksichtigt) und in eine Skala mit zehn 0,1-Stufen unterteilt. Die Unterteilung erfolgte an den Dezilen der Addition der Hebesätze. Es handelt sich folglich um ein relatives Rating.

$$\text{Steuer} \approx \left( \frac{\text{Grundsteuer}}{10} + \text{Gewerbesteuer} \right) \xrightarrow{\text{Dezentile Normalisierung}} \text{Steuer Rating [0,1]}$$

Diese Informationen liegen auf Gemeindeebene vor und wurden durch Daten des Landesamtes für Geoinformation und Landentwicklung (LGL 2020) georeferenziert (siehe Abbildung 29).

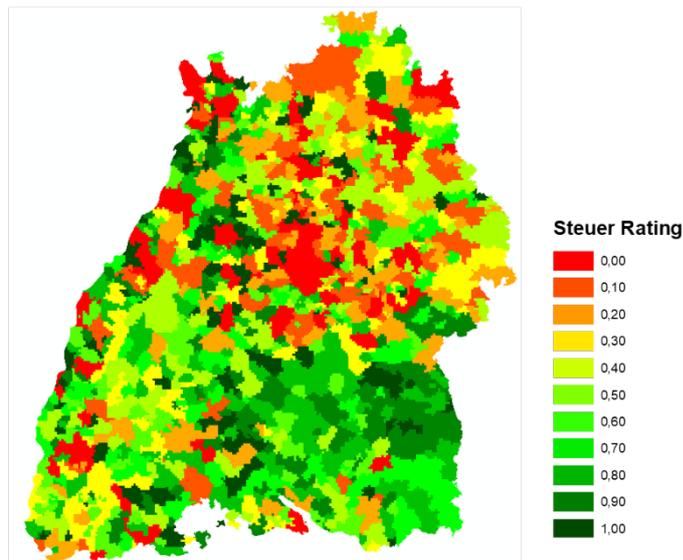


Abbildung 29: Falschfarbendarstellung des Steuerratings [Gemeindeebene]

#### 3.12.1.4 Temperatur

Die Temperatur ist eine ortsabhängige Größe welche einen Einfluss auf den Energieverbrauch des Rechenzentrums hat. Abhängig vom Kühlsystem lässt sich bis zu einer bestimmten Temperatur das Rechenzentrum über Freie Kühlung betreiben. Oberhalb dieser Temperatur muss auf Kompressionskälte oder andere Kühltechniken zurückgegriffen werden. Der Schwellwert wird hier als 21°C angenommen.

Für die Datenerhebung wurden Daten des DWD Climate Data Center (CDC) verwendet welche in einer 1x1 km Auflösung stündliche Temperaturwerte für Baden-Württemberg angeben. Als Zeitrahmen wurden die Daten der Jahre 2003 bis 2012 verwendet. Die Anzahl der Stunden unter 21°C wurden für jedes Jahr aufsummiert und dann der 10-Jahres-Mittelwert gebildet. Der Rheingraben weist eine deutlich geringere Anzahl an Stunden unter 21°C auf als beispielsweise die Gebirge Schwarzwald und Schwäbische Alb. Im Maximum unterscheiden sich die Stundenzahlen unter 21°C um über 1300 Stunden zwischen dem kältesten und wärmsten Ort in Baden-Württemberg. Um die Werte zu normalisieren wurde der 10-Jahres-Mittelwert in eine Skala mit zehn 0,1-Stufen unterteilt. Die Unterteilung erfolgte an den Dezilen. Es handelt sich folglich um ein relatives Rating.

$$Temperatur \approx \frac{\sum_{2003}^{2012} \text{Stunden}_{t < 21^{\circ}\text{C}}}{10} \xrightarrow{\text{Dezentile Normalisierung}} \text{Temperatur Rating } [0,1]$$

Die Daten wurden auf Quadratkilometerebene georeferenziert (siehe Abbildung 30).

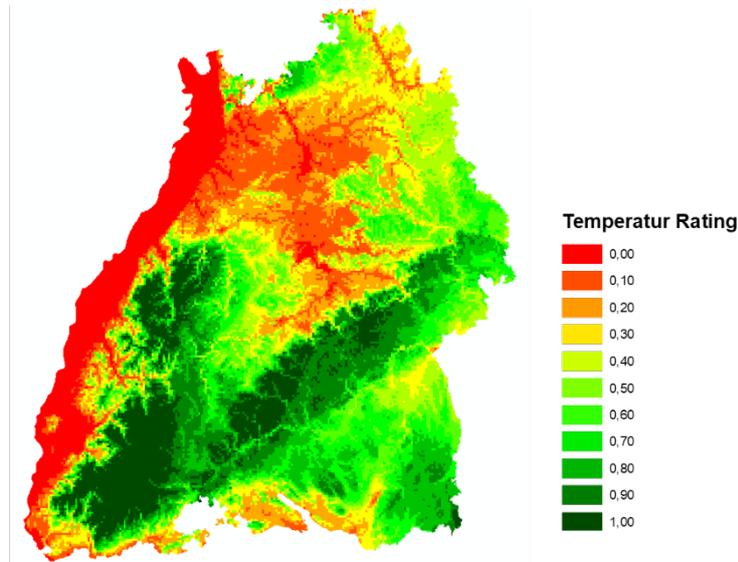


Abbildung 30: Falschfarbendarstellung des Temperaturratings [Quadratkilometerebene]

### 3.12.1.5 Wärmeabnehmer

Die Verfügbarkeit von Wärmeabnehmern ermöglicht es einem Rechenzentrum die Abwärme zu Heizzwecken in anderen Gebäude einzusetzen. Der Einsatz von Öl oder Gas kann somit vermieden werden. Als Grenzwert der möglichen Transportlänge wurde ein Abstand von 700 Metern angenommen.

Für die Datenerhebung wurden Wärmebedarfsdaten und Wohnflächen für Baden-Württemberg aus dem Energieatlas Baden-Württemberg entnommen (LUBW 2020). Basierend auf den Klimadaten aus Kapitel 3.12.1.4 wurde ein 1x1 km Raster von Baden-Württemberg erstellt. Diesem Raster wurde für jeden Zellemittelpunkt der Gesamtwärmebedarf in einem Umkreis von 700 Metern zugewiesen. Um die Werte zu normalisieren wurde der Wärmebedarf in eine Skala mit sechs 0,2-Stufen abgebildet (0-1). Die Unterteilung erfolgte an den fünf Stufen der Leistungsaufnahme von Rechenzentren aus Arbeitspaket 1 (hier wurde eine konstante Leistungsaufnahme über das Jahr angenommen) wobei der resultierende jährliche Energieverbrauch der Stufen den untere Schwellwert der Bewertungsstufen darstellt. Je höher die Bewertungsstufe an einer Stelle also ist, umso höher ist der Wärmebedarf in an dieser Stelle, was eine Abwärmenutzung theoretisch möglich macht.

$$\text{Wärmeabnehmer} \approx \text{Wärmebedarf}_{r=700m} \xrightarrow{\text{gestufte Normalisierung}} \text{Wärmeabnehmer Rating [0,1]}$$

Die Daten wurden auf Quadratkilometerebene georeferenziert (siehe Abbildung 31). Nicht verwunderlich ist die Ausprägung in den Bewohnten Gebieten Baden-Württembergs, da hier eine Nachfrage nach Wärme existiert. Um die Abwärme nutzen zu können sollten Rechenzentren folglich in der Nähe von anderen Gebäuden errichtet werden die gegebenenfalls die Abwärme nutzen könnten.

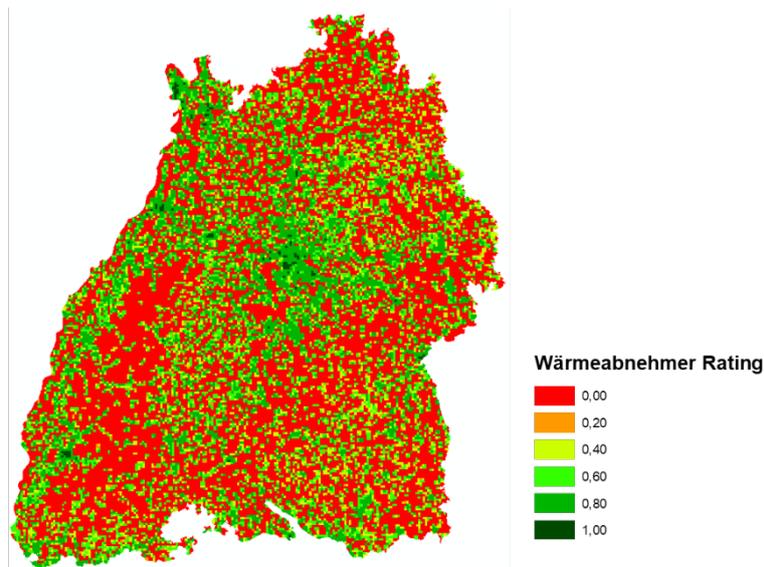


Abbildung 31: Falschfarbendarstellung des Wärmeabnehmerratings [Quadratkilometerebene]

### 3.12.1.6 Wärmesenken

Durch natürliche Wärmesenken wie Grundwasser und Oberflächenwasser ist es möglich in Zeiten in denen eine Freie Kühlung nicht möglich ist, diese Wärmesenken für die Kühlung einzusetzen um den Einsatz von Kompressionskälte zu vermeiden. Die Verfügbarkeit von Grundwasser und Oberflächenwasser wird hier als Indikator für die Nutzung von natürlichen Wärmesenken verwendet.

Für die Datenerhebung wurden Daten zur Grundwasserergiebigkeit und Hydrogeologischen Einheit vom Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg bezogen (LGRB 2020). Diese bewerten die Ergiebigkeit in fünf Stufen (gering, mäßig, mittel, hoch und sehr hoch). Zusätzlich wurden Gewässerdaten dem Amtlichen Digitalen Wasserwirtschaftlichen Gewässernetz (AWGN) der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg entnommen. Als Ausschlusskriterium für Grundwasser wurden ebenfalls die Grundwasserschutz-zonen des Landes Baden-Württemberg berücksichtigt. Um die Angaben zu normalisieren wurden die Ergiebigkeitsangaben der Hydrogeologischen Einheiten in einer Skala mit zehn 0,1-Stufen konvertiert. Die Hydrogeologischen Einheit „Festgestein“ wurde mit dem Faktor 0,5 bewertet da im Festgestein eine Grundwasserentnahme ökonomisch schwerer umsetzbar ist (Dies trifft beispielsweise auf die Schwäbische Alb zu). Analog zur Bewertung der Wärmeabnehmer wurden die Daten einem 1x1 km Raster zugewiesen welcher einen Radius von 700 Metern berücksichtigt und die maximale Ergiebigkeit des Bereichs angibt. Um die Verfügbarkeit von Oberflächenwasser zu berücksichtigen wurde 0,2 Bewertungspunkte zusätzlich addiert, wenn in Umfeld von 500 Metern fließende Oberflächengewässer vorhanden waren. Als Oberflächengewässer wurden nur Bundeswasserstraßen und Gewässer 1. Ordnung (Wassergesetz §4, Anlage 1) berücksichtigt. Ein Überschreiten der Skala durch die Addition wurde ausgeschlossen.

$$\text{Wärmesenken} \approx \text{Grundwasser}_{r=700m} + \text{Flusswasser}_{r=500m} \xrightarrow{\text{gestufte Normalisierung}} \text{Wärmesenken Rating [0,1]}$$

Die Daten wurden auf Quadratkilometerebene georeferenziert (siehe Abbildung 32)

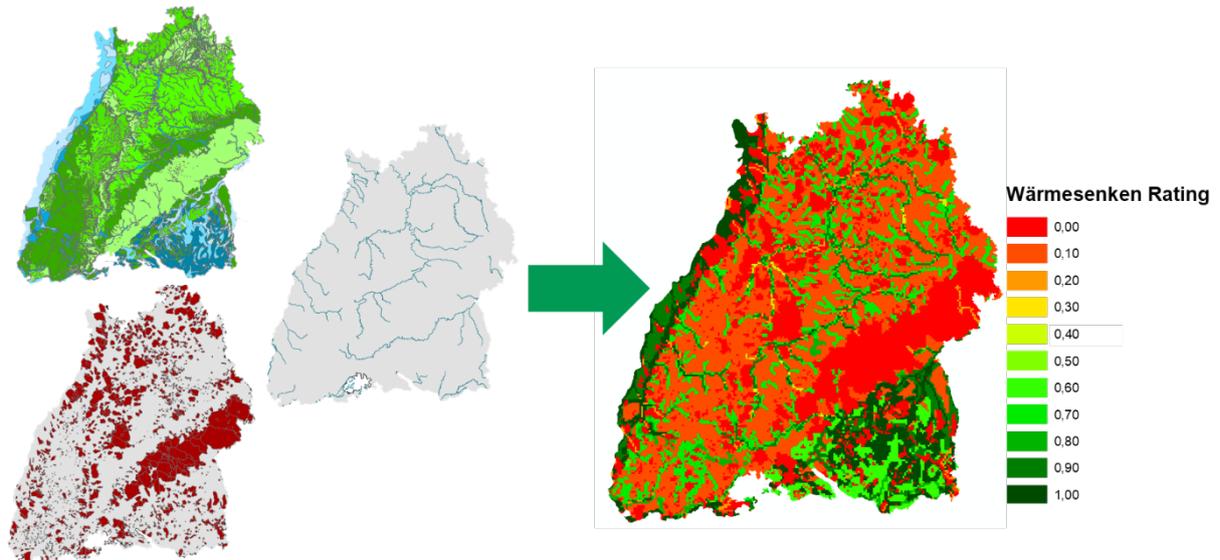


Abbildung 32: Links (im UZS): Hydrogeologische Grundwasserergiebigkeit, Flüsse und Grundwasserschutzgebiete; Rechts: Falschfarbendarstellung des Wärmesenkenratings [Quadratkilometerebene]

### 3.12.1.7 Fachpersonal

Um die Verfügbarkeit von Fachpersonal zu approximieren wurde die Anzahl an Informatikarbeitsplätzen pro 100.000 Einwohner gewählt (Häufigkeitszahl). Diese gibt eine Abschätzung ob in einem räumlichen Bereich anteilig zur Bevölkerung ausreichend Fachpersonal verfügbar ist.

Für die Datenerhebung wurden Daten zur Anzahl von Informatikern dem Fachkräftemonitor des Baden-Württembergischer Industrie- und Handelskammertag (BWIHK) entnommen (IHK 2020). Um die Werte der IT-Arbeitsplätze pro 100.000 Einwohner zu normalisieren wurde eine Skala mit zehn 0,1-Stufen gewählt. Die Unterteilung erfolgt an den Dezilen. Es handelt sich folglich um ein relatives Rating.

$$\text{Fachpersonal} \approx \frac{\text{Informatikarbeitsplätze}}{100.000 \text{ Einwohner}} \xrightarrow{\text{Dezentile Normalisierung}} \text{Fachkräfte Rating [0,1]}$$

Die Daten wurden anhand der zwölf IHK-Regionen georeferenziert (siehe Abbildung 33).

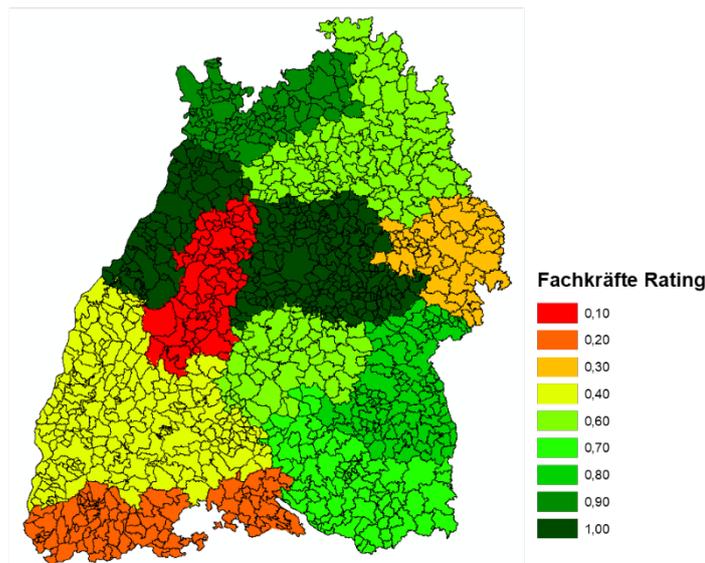


Abbildung 33: Falschfarbendarstellung des Fachpersonalratings [Kreisebene]

### 3.12.1.8 Verkehrsanbindung

Für die Bewertung der Verkehrsanbindung wurden die Abstände zu Autobahnen und Haltestellen von schienengebunden Verkehrsmitteln als Approximation herangezogen.

Für die Datenerhebung wurden Daten aus dem öffentlichen Projekt der OpenStreetMap Foundation (OSM) extrahiert. Berücksichtigt wurden Autobahnen, Bundesstraßen und Haltestellen von Zügen, S-Bahnen und U-Bahnen. Der kürzeste Abstand von den Mittelpunkten der 1x1 km Raster von Baden-Württemberg zur nächsten Straße und schienengebunden Haltestelle wurde berechnet. Beide Werte wurden anschließend in einer Skala in zehn 0,1-Stufen normalisiert und anschließend in gleicher Gewichtung addiert und erneut auf einen Zahlenraum zwischen 0 und 1 normalisiert. Die Stufung der Skala erfolgte absteigend von 1 nach den Abstandswerten 700, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 4000 und 5000 Metern.

$$\text{Verkehrsanbindung} \approx \frac{\text{Abstand Straße} + \text{Abstand Zug}}{2} \xrightarrow{\text{gestufte Normalisierung}} \text{Verkehrsanbindung Rating [0,1]}$$

Die Daten wurden auf Quadratkilometerebene georeferenziert (siehe Abbildung 34).

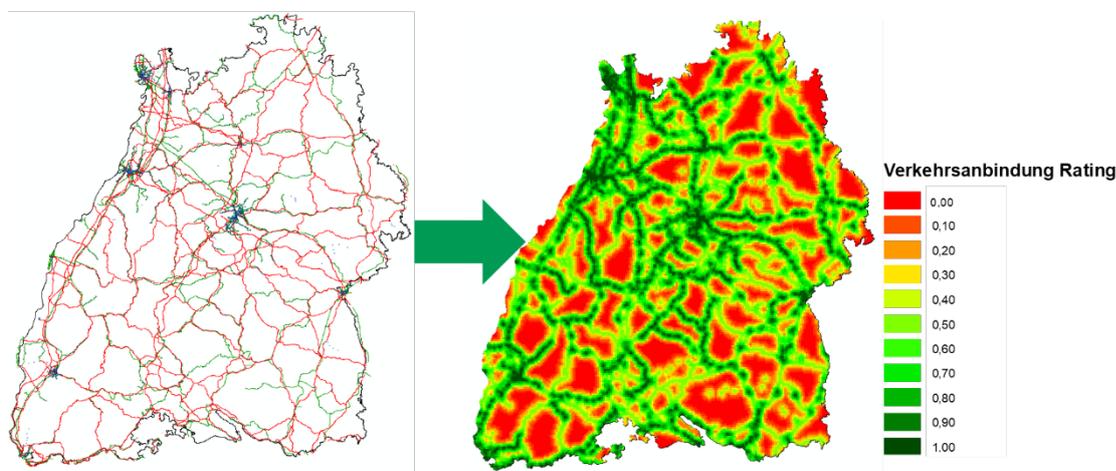


Abbildung 34: Links: Straßennetz (rot), Bahnlinien (grün) und Haltestellen (blau); Rechts: Falschfarbendarstellung des Verkehrsanbindungsratings [Quadratkilometerebene]

### 3.12.1.9 Kundennähe

Für die Kundennähe wurde das Verhältnis aus der Informatiker-Häufigkeitszahl und Arbeitsplatzdichte als Approximation gewählt. Die Arbeitsplatzdichte wird in der Wirtschaftswissenschaft dazu genutzt um Wirtschaftszentren zu identifizieren. Mit steigender Arbeitsplatzdichte wird folglich eine stärkere Nachfrage an Rechenleistung angenommen. Bezogen zur Höhe der Informatiker-Häufigkeitszahl entsteht ein Indikator der um den Faktor korrigiert wird, dass gewisse Branchen (z.B. Landwirtschaft) weniger/keine Rechenleistung nachfragen.

Für die Datenerhebung wurden Angaben zur Arbeitsplatzdichte auf Gemeindeebene vom Statistischen Landesamt Baden-Württemberg bezogen. Die Angaben zur Informatiker-Häufigkeitszahl wurde wie in Kapitel 3.12.1.7 dem Fachkräftemonitor entnommen. Das Verhältnis aus Informatiker-Häufigkeitszahl und Arbeitsplatzdichte wurde in einer Skala in zehn 0,1-Stufen normalisiert. Die Unterteilung der Skala erfolgte an den Dezilen. Es handelt sich folglich um ein relatives Rating.

$$\text{Kundennähe} \approx \frac{\text{Informatiker\_Häufigkeitszahl}}{\text{Arbeitsplatzdichte}} \xrightarrow{\text{dezentile Normalisierung}} \text{Kundennähe Rating [0,1]}$$

Die Daten wurden auf Gemeindeebene georeferenziert (siehe Abbildung 35).

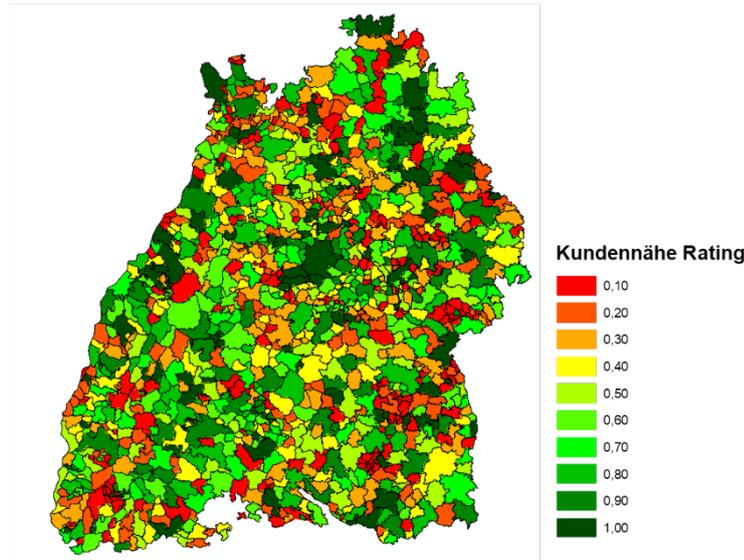


Abbildung 35: Falschfarbendarstellung des Kundennäheratings [Gemeindeebene]

### 3.12.2 Gewichtung

Die Standortindikatoren wurden durch Rechenzentrumsbetreiber im Rahmen einer Befragung gewichtet. Identisch zu der Befragung bezüglich der Gewichtung der Leistungsindikatoren konnten die Befragten für die drei Nachhaltigkeitssäulen jeweils 100 Gewichtungspunkte auf die Standortindikatoren verteilen (siehe Abbildung 36). Insgesamt konnten von sechs (n=6) Branchenexperten Informationen gewonnen werden.

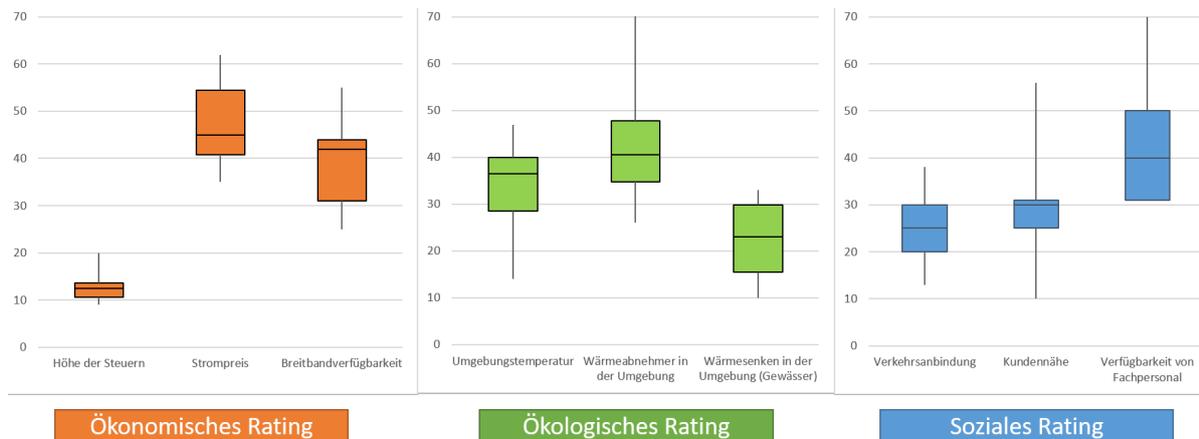


Abbildung 36: Gewichtung der Standortindikatoren für die drei Säulen der Nachhaltigkeit

### 3.12.3 Ergebnisse der Auswertung

Die erhobenen Geodaten erlauben eine Auflösung von 1x1-km. Für eine Darstellung auf Gemeindeebene wurden die Rasterdaten auf Gemeindeebene aggregiert. Additive-, Eliminierende und Summen-Aggregation wurde abhängig vom Indikator eingesetzt. Folgend werden die Auswertungen dargestellt.

#### 3.12.3.1 Ökonomische Auswertung

Der Breitbandausbau in Baden-Württemberg bietet an vielen Standorten eine Ansiedelung von Rechenzentren an. Es besteht jedoch vor allem für ländliche Gemeinden Nachholbedarf im digitalen Infrastrukturausbau. Die Netzentgelte im Bundesland liegen im Deutschlandvergleich im unteren Bereich was Baden-Württemberg auf nationaler Ebene attraktiv macht, jedoch bestehen lokale Unterschiede die eine wirtschaftliche Relevanz auch auf lokaler Ebene darstellen können. Die Gewerbesteuer schwankt landesweit nur im geringen Maße und bietet vor allem im ländlichen Umfeld einen kleinen Vorteil. In den genannten Kriterien erzielten vor allem die Regionen um die zwei großen

Städte (**Karlsruhe** und **Mannheim**) in Baden-Württemberg gute Bewertungen, da hier neben der hohen Breitbandverfügbarkeit der Strompreis im Vergleich zu anderen Regionen gering ist. Der Mittlere Rheingraben und die Gemeinden im Norden der Landeshauptstadt schneiden hier ebenfalls positiv ab. Maßnahmen um den Breitbandausbau voranzutreiben haben hier das größte Potenzial um die Attraktivität von Standorten zu steigern.

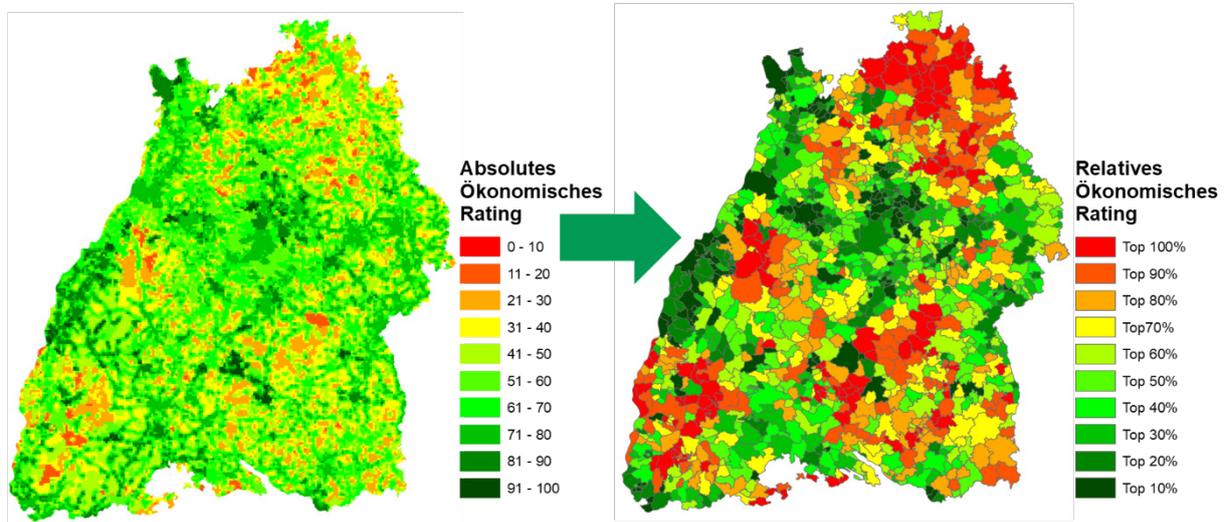


Abbildung 37: Falschfarbendarstellung des Absoluten Ökonomischen Ratings im Quadratkilometerraster (links) und des relativen Ökonomischen Ratings auf Gemeindeebene (rechts)

### 3.12.3.2 Ökologische Auswertung

Baden-Württemberg ist eine der wärmsten Regionen in Deutschland, bietet aber dennoch Potenzial für freie Kühlung welches genutzt werden kann. Grundwasserkühlung ist vor allem im Rheingraben und Oberschwaben eine attraktive Maßnahme. Die hohe Bevölkerungsdichte (Platz 3 der Flächenländer in Deutschland) bedeutet vor allem in Ballungsräumen ein gutes Potenzial für die Abwärmenutzung. In den genannten Kriterien erzielen, von den größten Städten, vor allem **Stuttgart, Ulm und Mannheim** die höchsten Werte, da hier viel Abwärmenutzungspotenzial vorhanden ist. Die höchsten Gesamtbewertungen werden in den Kreisen **Ravensburg, Sigmaringen Zollernalbkreis** und im **Südlichen Schwarzwald** erzielt da hier hohe Grundwasserpotenziale und geringe Jahresmitteltemperaturen zusammenkommen. Die Nutzung von Grund- und Flusswasser zu Kühlungszwecken ist in Baden-Württemberg aufgrund der starken Regulierung und aufwändige Genehmigungsprozesse derzeit realistisch nicht umsetzbar. Hier bietet sich durch Veränderungen im Verwaltungs- und Genehmigungsprozess die Möglichkeit ungenutzte Potenziale zu erschließen.

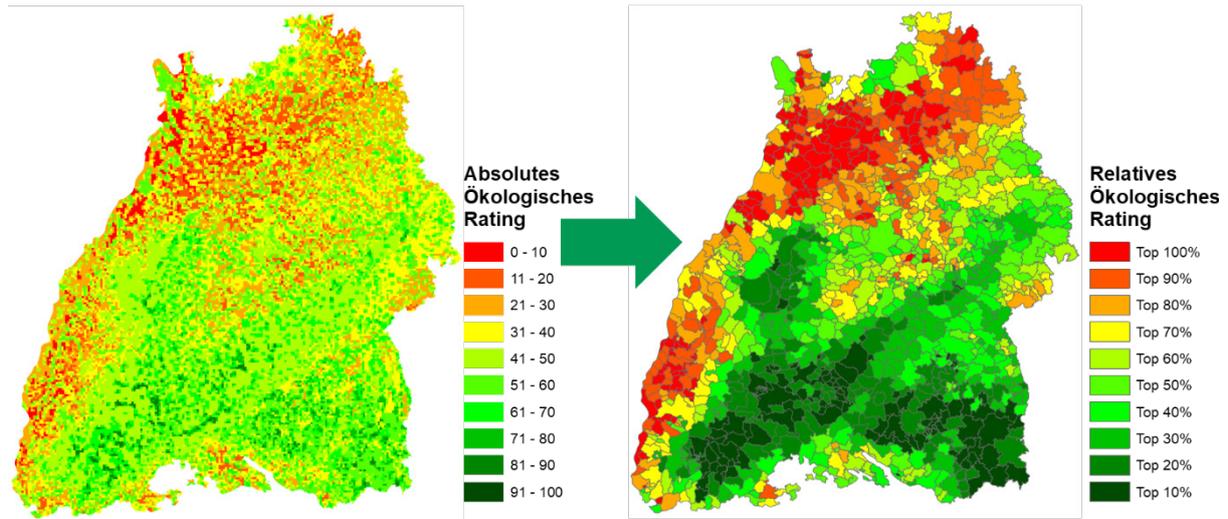


Abbildung 38: Falschfarbendarstellung des Absoluten Ökologischen Ratings im Quadratkilometerraster (links) und des relativen Ökologischen Ratings auf Gemeindeebene (rechts)

### 3.12.3.3 Soziale Auswertung

Baden-Württemberg ist als dicht besiedeltes Bundesland von der Verkehrsinfrastruktur bereits sehr gut erschlossen. Als wirtschaftsstarkes Bundesland und durch fortschreitende Adaption von Digitalisierungsmaßnahmen in Industrie und Gewerbe verfügt Baden-Württemberg über einen wachsenden Kundenkreis für Rechenzentren und die angehängten Dienstleistungen. Die Personalverfügbarkeit für IT-Experten gilt als schwierig da die Nachfrage das Angebot in allen Gebieten übersteigt. In den genannten Kriterien erzielen vor allem die Regionen um die drei größten Städte (**Stuttgart, Karlsruhe, Mannheim**) in Baden-Württemberg die höchsten Werte (siehe Abbildung 39) da hier neben der Straßeninfrastruktur auch der schienengebundene Verkehr sehr gut ausgebaut ist und Personal im Vergleich zu anderen Regionen leicht zu akquirieren ist. Maßnahmen um dem Fachpersonalmangel entgegenzuwirken haben hier das größte Potenzial um die Attraktivität von Standorten zu steigern.

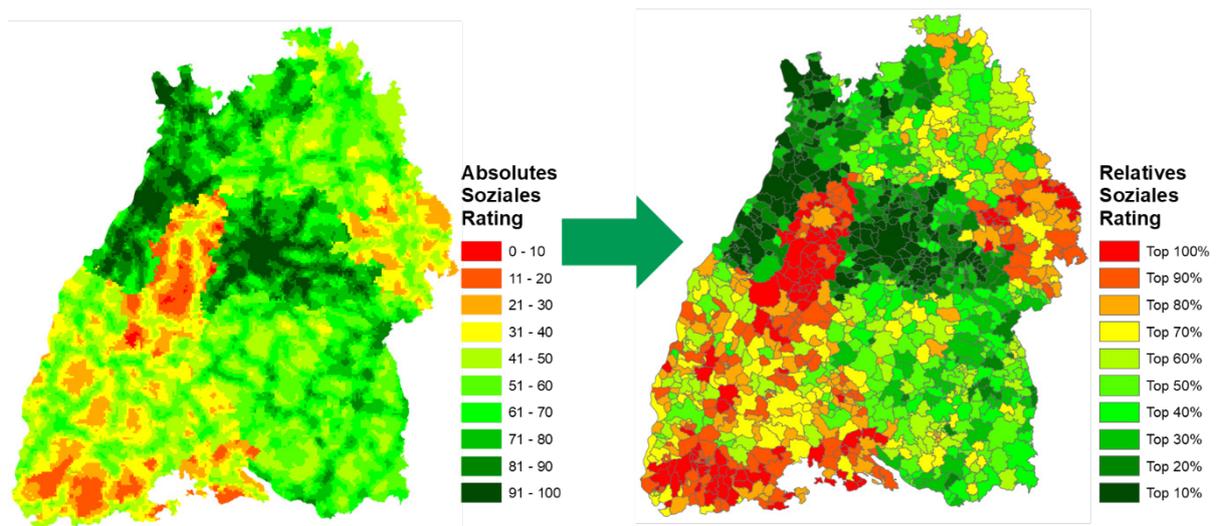


Abbildung 39: Falschfarbendarstellung des Absoluten Sozialen Ratings im Quadratkilometerraster (links) und des relativen Sozialen Ratings auf Gemeindeebene (rechts)

### 3.12.3.4 Gesamt Auswertung

Werden die drei Säulen der Nachhaltigkeit (Ökonomisch, Ökologisch, Sozial) in gleicher Gewichtung aggregiert und die Ergebnisse in einer relativen Betrachtung verglichen (siehe Abbildung 40 (rechts)) erzielen von den großen Städten vor allem **Mannheim** und **Ulm** unter den Top 10 % der Gemeinden die höchsten Werte. Die höchste Gesamtbewertung erhält die Gemeinde Wangen im Landkreis Göppingen da diese, ländliche Aspekte wie z.B. eine geringe Gewerbesteuer mit städtischen Vorteilen wie einer guten öffentlichen Verkehrsanbindung kombiniert. Allgemein schneidet die Metropolregion um die Landeshauptstadt Stuttgart überdurchschnittlich gut ab, da auch hier infrastrukturelle Vorteile der Landeshauptstadt mitwirken und mit ökonomischen und ökologischen Vorteilen der Peripherie kombiniert werden. Die Landeshauptstadt selbst liegt unter den Top 20 % was hauptsächlich an den hohen Strompreisen, Gewerbesteuern und klimatisch nachteiligen Kessellage liegt. Eine Liste der Gemeinden mit den höchsten Bewertungen befindet sich im Anhang E.

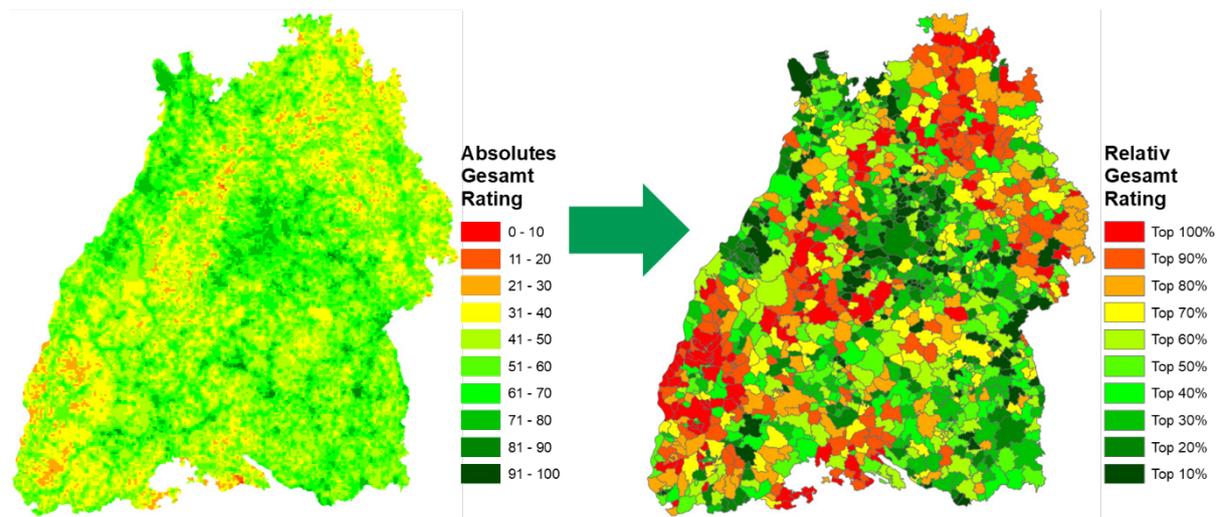


Abbildung 40: Falschfarbendarstellung des Absoluten Gesamt Ratings im Quadratkilometerraster (links) und des relativen Gesamt Ratings auf Gemeindeebene (rechts)

Die hier vorgestellte Nachhaltigkeitsbewertung der verschiedenen Standorte beruht auf den, in dieser Arbeit vorgestellten, neun Standortindikatoren. Es ist anzumerken dass die Berücksichtigung weiterer Indikatoren die Ergebnisse verschieben könnte. Des Weiteren ist anzumerken, dass für die Gewichtung der Indikatoren nur relativ wenige Branchenvertreter eine Rückmeldung gegeben haben. Abhängig von den Anforderungen eines Rechenzentrums kann die Gewichtung, von der hier vorgestellten abweichen. Eine nach Rechenzentrumstyp differenzierte erneute Befragung im Rahmen einer weiterführenden Forschung könnte hier detailliertere Erkenntnisse liefern.

Es wurde eine relative Bewertung der einzelnen Indikatoren angewendet, welche es ermöglicht Standorte bzw. Gemeinden klare gegeneinander zu bewerten. Da es sich bei der Bewertung aber um eine relative Einteilung handelt, steht eine "schlechte" Bewertung im relativen Rating nicht zwangsläufig für einen schlechten Standort. Die 10 % der schlechtesten Standorte (in Abbildung 40 rot markiert) können durchaus als Rechenzentrumsstandort in Frage kommen, da sie unter Umständen nur geringfügig von den anderen Standorten abweichen (siehe Anhang 9.3). Dies ist in einer relativen Bewertung jedoch nicht direkt ersichtlich.

Trotz dieser Unsicherheiten ist es empfehlenswert zu versuchen die als besonders gut identifizierten Gemeinden als Rechenzentrumsstandorte zu etablieren, da diese auf nationaler bzw. internationaler Ebene die besten Chancen haben konkurrenzfähig zu sein. Um dies zu erreichen können verschiedene Maßnahmen ergriffen werden. Beispielsweise können identifizierte Gemeinden in einer weiterführenden Arbeit über die Potenziale informiert werden und Vorschläge erarbeitet werden diese zu nutzen und weiter zu steigern. Über die proaktive Entwicklung von Abwärmenutzungsplänen

in nahegelegenen Gewerbegebieten könnten beispielsweise Rechenzentrumsbetreiber motiviert werden die entstehene Abwärme an Wärmeabnehmer zu liefern und somit Synergien zu nutzen. Deweiteren können identifizierte Gemeinden angeregt werden den Genehmigungsprozess für Rechenzentren proaktiv zu verschlanken um somit Rechenzentrumsbetreiber gezielt an nachhaltigen Stellen anzusiedeln.

#### 4. Bestandsaufnahme der Technologien

Ziel der technischen Analyse in diesem Kapitel ist die Zusammenstellung von derzeitig verfügbaren und zukünftig zu erwartenden Technologien für die RZ Infrastruktur (Wärme, Kälte, Netzersatzanlagen, Gebäude). Zusätzlich werden IT Hardware, Software und Kommunikationstechnik berücksichtigt und eine Bewertung deren Potentiale im Hinblick auf Energieeffizienz, Ressourceneffizienz, Flexibilität und Leistungsfähigkeit gegeben.

Dazu erfolgte in einem ersten Schritt die Identifikation und Analyse von eingesetzten Technologien in Rechenzentren und die Analyse von Integrationsmöglichkeiten von Rechenzentren in die Umgebung des Rechenzentrumsstandorts. Betrachtet werden sowohl die IKT-Infrastrukturtechnologien innerhalb des Rechenzentrums, die Steigerung des Anteils der erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch als auch die Integration in elektrische Energienetze und die technischen Aspekte der Abwärmenutzung.

Wie in Abbildung 41 dargestellt, umfasst die Rechenzentrumsoptimierung folgende Bereiche:

- Energieversorgung: Erneuerbare Energie Integration (Stromerzeugung, Kälteerzeugung)
- Kühlungsinfrastruktur
- Strominfrastruktur
- Rechenzentrum (Größe und Typ)
- Abwärmenutzung



Abbildung 41: Einzelne Bereiche der Rechenzentrum-Infrastruktur und mögliche Maßnahmen zur Effizienzsteigerung

Die zwei wesentlichen Elemente für das Errichten und Betreiben von nachhaltigen Rechenzentren (RZ) sind der Einsatz von energieeffizienten und erneuerbaren Technologien zur Energieerzeugung sowie eine optimale Betriebsweise zur Senkung des Kühlungsbedarfs. Für eine effiziente Kühlung müssen die Bereiche Luftkonditionierung, Kälteverteilung, Rückkühlung und das Gebäude selbst betrachtet werden. Das energieoptimierte Design beginnt bei der Gebäudeplanung und beinhaltet Fragestellungen wie Fensterflächenanteile, leichte oder schwere Bauweise oder optimale Verhältnisse von Transmissionsflächen zum Gebäudevolumen.

Durch eine effiziente Kälteverteilung kann erheblich Hilfsenergie eingespart werden. Die Auswertung erster Fragebögen (AP1) hat gezeigt, dass dieses Thema bei vielen Betreibern von RZ noch nicht genügend Beachtung findet. Weiter kann in einem RZ durch die Berücksichtigung von erneuerbarer Energieerzeugung, effizienter Nutzung von Abwärme, Luft-Konditionierung und Rückkühlung die Energieeffizienz gesteigert werden.

Da in einem RZ der größte Teil der Energie in Form von elektrischer Energie eingesetzt wird, werden sowohl die unterschiedlichen Möglichkeiten wie der Eigenbedarf möglichst lokal gedeckt werden kann als auch das Potential an Energiemärkten teilzunehmen, analysiert. Fragen, die sich in diesem Zusammenhang ergeben, sind beispielsweise: Wie können Verträge zwischen Großabnehmern (RZ)

und Stromlieferanten gestaltet werden und wie groß ist das Flexibilisierungspotential, um z.B. an Day-Ahead oder an Spotmärkten teilzunehmen.

Um eine größtmögliche Flexibilisierung zu erreichen, muss die in einem RZ vorhandene Hardware wie Netzersatzanlagen (NEA) und Einheiten zur unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) berücksichtigt und deren Integrationsmöglichkeiten in ein Gesamtkonzept analysiert werden. Weiter besteht ein hohes Potential durch den Einsatz effizienter Hardware oder deren Optimierung durch Softwareapplikationen. Durch bedarfsgerechte Stromerzeugung- und Speicherung, Strommarktintegration, effiziente IT-Hardware und Management-Software kann eine Flexibilisierung des RZ-Betriebs erreicht werden. In diesem Zusammenhang können z.B. Anlagen wie USV und Netzersatzanlagen (NEA) zur Energieeinspeisung während eines Peak Leistungsbedarfs genutzt werden.

Im nächsten Arbeitsschritt lag der Fokus auf der Integration von erneuerbaren Energien. Nach der Konzeption verschiedener thermischer und elektrischer Erzeugungssysteme wurden die Möglichkeiten zur Integration von Freier Kühlung, Energiespeicherung, Konversion von Wärme in Kälte, Konversion von Wärme in Strom und umgekehrt sowie die Abwärmenutzung zusammengefasst und bewertet.

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse dieser Analysen vorgestellt. Unter Abschnitt 4.1 werden die Energieeffizienzmaßnahmen der Rechenzentrumsinfrastruktur zur Reduzierung der Gesamtlast im Rechenzentrum analysiert. Diese wurde in die Bereiche Kühlungsinfrastruktur, Strominfrastruktur und IT-Infrastruktur unterteilt. Darüber hinaus werden in Abschnitt 4.2 die Möglichkeiten der internen Energiebereitstellung für die RZ-Lasten (natürliche Kühlung, Kälteerzeugung und Stromerzeugung) sowie die Möglichkeiten der externen Versorgung mit erneuerbarer Energie und im Anschluss die Möglichkeiten der Energieflexibilisierung, sowie der externen PPA-Erzeugung diskutiert. In Abschnitt 4.3. wird die Wärmerückgewinnung und die Kaskadennutzung der Abwärme im Detail untersucht und in Abschnitt 4.4. eine Matrix aller möglichen Lösungen mit dem Ziel erstellt, die Technologiekombinationen, als wesentlichen Input für AP 4, zu bewerten.

## 4.1 Analyse der RZ-Infrastruktur

### 4.1.1 Kälteinfrastruktur

Die Arbeitsprozesse von Rechenzentren (RZ) führen zu hohen Wärmelasten. Die Wärmabfuhr kann dabei auf unterschiedlichem Wege erfolgen. In der Vergangenheit wurde hierbei meist Luft als Kühlmedium genutzt und dem gesamten Serverraum vorkonditioniert zugeführt. Durch dieses Klimatisierungssystem wird die am Server anfallende Abwärme an die Raumluft übertragen und durch das Lüftungssystem aus dem Raum geführt. Mittlerweile haben alternative, wasserbasierte Kühlsysteme Einzug gehalten, welche im Vergleich zu den bisherigen Luftsystemen eine höhere Effizienz aufweisen.

Die Kühlungstechnik in RZ kann über verschiedene Parameter charakterisiert werden:

1. Kühlungsanlagen-Konfiguration
  - a. Kältemittel
  - b. Wärmeabfuhr
2. Integration Freie Kühlung
3. Kälteverteilung in Serverraum
  - a. Zuluft und Abluft Konfiguration
  - b. Serverraum Anordnung
4. Kälteübertragung in Server
5. Klimaregelung
6. Gebäudetypologie

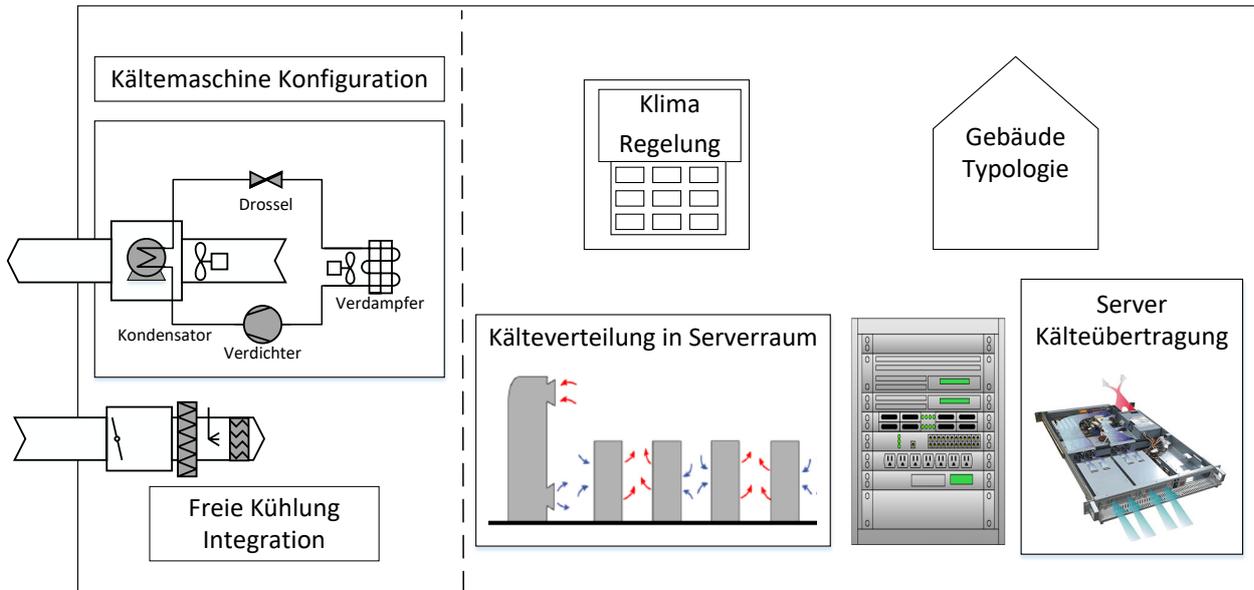


Abbildung 42: Unterschiedliche Ansätze zur Kühlungsoptimierung bei Rechenzentren

Abbildung 42 beschreibt beispielhaft die Arten der verschiedenen Maßnahmen zur Optimierung der Kühlung in einem Rechenzentrum. Für die Kälteerzeugung werden in Rechenzentren größtenteils Kompressionskältemaschinen eingesetzt. Abhängig von der RZ-Größe und Rack-Leistungsdichte werden verschiedene Konfigurationen der Kompressionskälteerzeugung angewendet. Weitere Kälteerzeugungsmethoden und deren Optimierungsverfahren werden im Abschnitt: „Erneuerbare Technologie-Integration“ analysiert. Bei Kompressionskältemaschinen (KKM) kann die Kältemaschine außer- oder innerhalb des RZ oder gesplittet als Innen- und Außengerät installiert werden. In Abbildung 43 werden die unterschiedlichen Varianten der Kältemaschineninstallation dargestellt.

Die Kältemaschine kann als Gesamtgerät in den Serverraum integriert werden, jedoch muss in diesem Fall die Abwärme des Kälteaggregats mit Hilfe eines Raumlüfters aktiv aus dem RZ in die Umgebung ausgeblasen werden. Für kleinere Rechenzentren mit wenigen Racks reicht es aus, zwischen den Racks eine In-Rack-Kühlereinheit zu installieren. Eine weitere Alternative besteht darin, eine Kältemaschine mit Gehäuse im Freien zu installieren und die gekühlte Luft von außen in den Serverraum einzubringen. In diesem Szenario können relativ einfach weitere Kühlereinheiten integriert werden.

Als weitere Alternative sind Split-Systeme verfügbar, bei denen die Kältemaschine in eine Außen- und eine Inneneinheit unterteilt ist. Im Serverraum sind das Drosselventil und der Verdampfer installiert, während sich der Verdichter und Kondensator außerhalb des Serverraums befinden. Das Kältemittel wird zwischen den beiden Einheiten übertragen. Diese Maschinenkonfiguration erlaubt keine Kombination von Einzeleinheiten für höhere Leistungen und für jede Inneneinheit muss eine Außeneinheit vorhanden sein, für die eigene Kältemittelkreise erforderlich sind. Aus diesem Grund wird diese Konfiguration für größere Rechenzentren nicht bevorzugt.

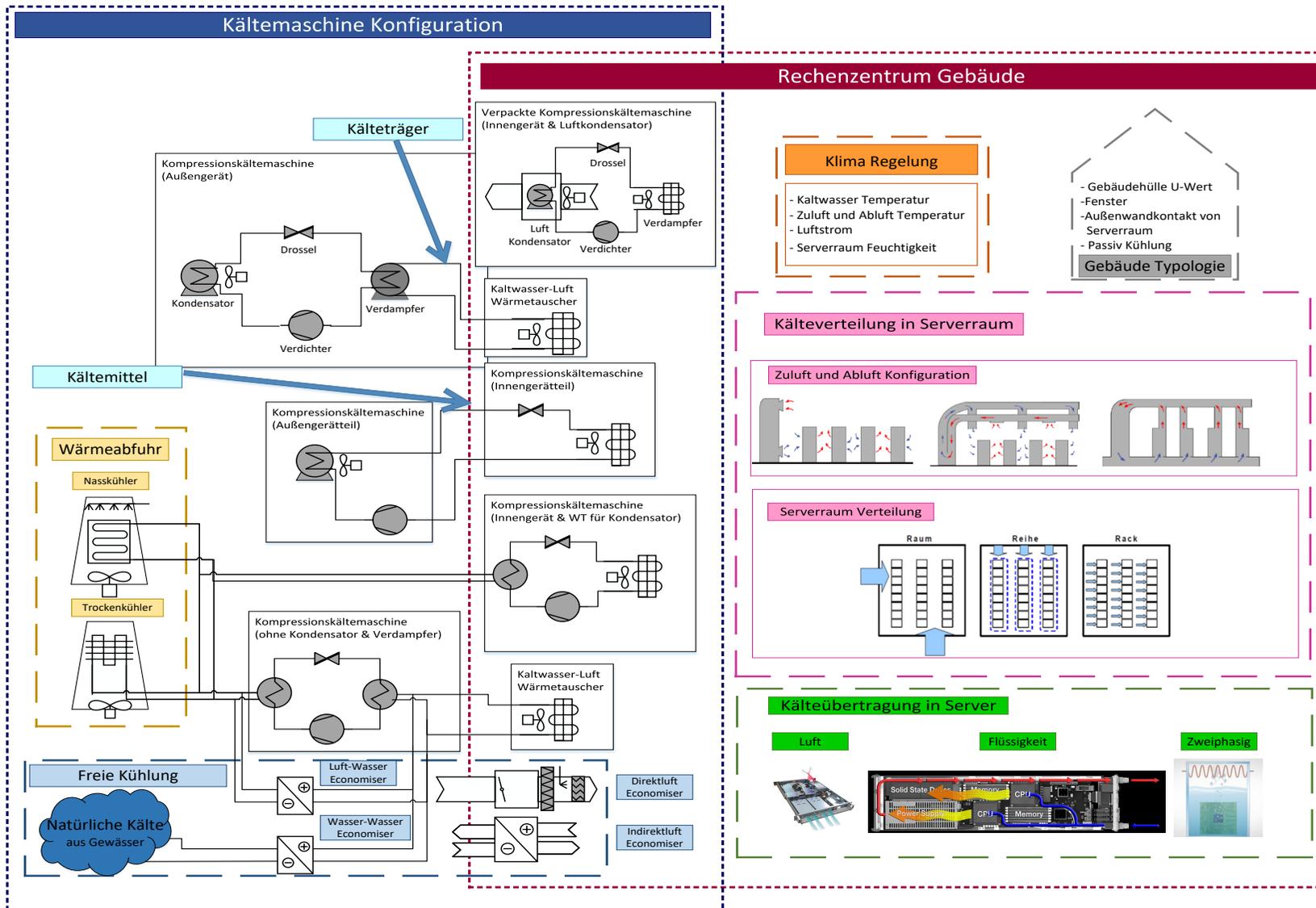


Abbildung 43: Zusammenfassung verschiedener Konfigurationen für die RZ Kühlung

Eine sehr flexible Konfiguration eines Kühlsystems besteht darin, den Kondensator außen, den Verdampfer innen und den Verdichter und die Drossel in einem Gehäuse mit Wärmetauschern für Kühlwasser und Kaltwasser in einem separaten Raum zu installieren. Diese Konfiguration ermöglicht es, dass Kältemaschinen mit dem Kondensator und dem Verdampfer kombiniert werden können und stellt somit eine ideale Konfiguration für größere Rechenzentren dar, mit der auch später mit relativ geringem Aufwand zusätzliche Kältemaschinenleistung hinzugefügt werden kann.

Hinsichtlich der obengenannten verschiedenen Konfigurationen kann die Kühlungstechnik in zwei Hauptvarianten (Luft bzw. Wasser als Kälte Träger mit unterschiedlichen Rückkühlvarianten) aufgeteilt werden. Kriterien für die Unterscheidung stellen das Medium dar, mit Hilfe dessen dem Serverraum Wärme entzogen wird und mit welchen technischen Maßnahmen die Wärme an die Umgebung abgeführt wird.

Unabhängig davon welches Trägermedium (Luft, Wasser oder 2 Phasen) zur Kältebereitstellung für Rechenzentren verwendet wird, muss eine Kälteübertragung vom Verdampfer via Flüssig-Flüssig-Wärmeübertrager (bei Flüssigkeiten) und/oder z.B. einem Gebläsekonvektor (bei Luft) an das Kühlmedium erfolgen. Im Kühlprozess von Rechenzentren kommen in der Regel zwei unterschiedliche Kompressionskühlverfahren zum Einsatz. So erfolgt die Übertragung der Kühlenergie entweder über CRAC (Computer Room Air Conditioner), oder über CRAH (Computer Room Air Handler). Hauptunterschied zwischen CRAC und CRAH ist die Art des Mediums mit der Wärme zum Verdampfer bzw. Kälte zu den Racks geliefert wird. Die Wahl des Verfahrens ist unter anderem abhängig von der Aufstellung des Verdichters (innerhalb oder außerhalb des Serverraums).

In diesem Bericht werden verschiedene Methoden zur Erhöhung der Effizienz der Kältebereitstellung in Rechenzentren erörtert. Die verschiedenen Kältetechniken, wie in Abbildung 43 schematisiert, werden hier nicht im Detail behandelt und der Bericht konzentriert sich auf die Möglichkeiten, erzeugte Kälte effizient, verlustarm und mit den besten Wärmerückgewinnungsmöglichkeiten zu nutzen. Für jeden RZ-Leistungsbereich stehen verschiedene Varianten zur Verfügung. Diese sind in Tabelle 18 zusammengefasst.

CRAC-Systeme werden vorzugsweise in kleinen RZ verwendet und CRAH wird bei großen RZ bevorzugt. CRAH-Systeme weisen den Vorteil auf, mehrere KKM und CRAH im gleichen Verteilsystem koppeln zu können und zu einem späteren Zeitpunkt bei entsprechender Auslegung des Verteilsystems mehr Kälteleistung in das gleiche System einspeisen zu können. Durch die hohe Wärmekapazität des Kühlmediums Wasser im CRAH eignet sich dieses System insbesondere zum Einsatz in Großanlagen. Im Unterschied zum zuvor beschriebenen CRAH System sind beim CRAC-Verfahren Kompressor und Verdampfer direkt in den Kältekreislauf im Serverraum eingebunden. Durch die geringen Wärmekapazitäten des Kühlmediums Luft und die direkte Wärmeabfuhr vom Kondensator benötigt das CRAC System mehr Ventilatorleistung und für jedes CRAC System einen eigenen Außenkondensator. Aufgrund der direkten Nutzung von Kältemittel sind diesem System Leistungsgrenzen gesetzt. Vorteile dieses Systems sind die geringere Anzahl an Teilkomponenten verglichen mit dem CRAH System. Des Weiteren sind sie kostengünstiger als das CRAH-System, jedoch ist dieser Vorteil verbunden mit niedrigerer Energieeffizienz. Die Rückkühlung betreffend, eignen sich Wasserkühler oder Glykol-Trockenkühler für jedes RZ, wobei in kleinen RZ Kältemittel- oder Direktluftkondensatoren einfacher und billiger realisiert werden können.

Tabelle 18: Zusammenfassung verschiedener Energieeffizienzmaßnahmen in der RZ Kühlung

			Leistungsbereich					Rack Leistungsdichte		
			<30 kW	30-50 kW	50-200 kW	200-500 kW	>500 kW	bis 6 kW	6-15 kW	mehr als 15 kW
Kältemaschine Konfiguration	Kältemittel	CRAH			✓	✓	✓		✓	✓
		CRAC	✓	✓	✓			✓	✓	
	Wärmeabfuhr	Kältemittel Kondensator	✓	✓	✓			Unabhängig		
		Wasser-Kühler		✓	✓	✓	✓			
Glykol Trockenkühler			✓	✓	✓	✓				
		Direkter Luft Kondensator	✓				✓			
Freie Kühlung		Luftseitig: Direkt Außenluft	✓	✓				Unabhängig		
		Luftseitig: Indirekt mit Wärmetauscher	✓	✓	✓	✓				
		Luftseitig: Indirekt mit Rotationswärmetauscher			✓	✓	✓			
		Wasserseitig: Indirekt mit Luft-Wasser Wärmetauscher	✓	✓	✓	✓	✓			
		Wasserseitig: Indirekt mit Kühlturm	✓	✓	✓	✓	✓			
		Wasserseitig: Direkt oder indirekt mit Wasser	✓	✓	✓	✓	✓			

		Leistungsbereich					Rack Leistungsdichte			
		<30 kW	30-50 kW	50-200 kW	200-500 kW	>500 kW	bis 6 kW	6-15 kW	mehr als 15 kW	
Kälte- übertragung	Luft	Unabhängig					✓	✓		
	Wasser						✓	✓	✓	
	Andere Flüssigkeiten							✓	✓	
	2 phasig							✓	✓	
Kälteverteilung	Server Raum- anordnung	Raum	✓				✓			
		Reihe	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Rack				✓	✓		✓	
	Luftstrom Architektur	Zuluft geflutet	✓	✓				✓		
		Zuluft lokal geführt	✓	✓	✓			✓	✓	
		Zuluft vollständig geführt			✓	✓	✓		✓	✓
		Abluft geflutet	✓	✓				✓	✓	
		Abluft lokal geführt	✓	✓	✓	✓			✓	✓
		Abluft vollständig geführt			✓	✓	✓			✓
Klima Regelung	Massenstrom	Unabhängig					Unabhängig			
	Kühlungstemperatur									
	Feuchtigkeit									
Gebäude Typologie	Außenwand Fläche	Unabhängig					Unabhängig			
	Thermische Masse und Fenster									
	Infiltration und Ventilation									
	Passiv Kühlung									

Economiser zur direkten freien Kühlung mit Außenluft sind vor allem für kleinere und mittlere RZ geeignet. Obwohl vorgeschaltete Filter die Eintragung von Partikeln reduzieren, besteht bei diesem System ein gewisses Brandrisiko. Durch den Einsatz von Wärmetauschern (Economisern) im Rückkühlkreis für indirekte Freie Kühlung ist ein sicherer Anlagenbetrieb möglich, da das Brandrisiko und die Wahrscheinlichkeit einer Verschmutzung geringer sind. Rotierende Wärmetauscher werden zunehmend eingesetzt und weisen einen besseren Wirkungsgrad als Standardwärmetauscher auf. Rotationswärmetauscher wurden aber bisher in der RZ-Technik mit Ausnahme von Trockenmittelkühlsystemen (DEC) selten eingesetzt, sind jedoch in Zukunft vermehrt zu erwarten. Viele dieser Systeme können miteinander gekoppelt werden. Beidseitig luftgeführte Economiser sind für MW-RZ eher ungeeignet, da immense Luftmengen für den Wärmetransport erforderlich sind, was voluminöse Installationen nach sich zieht. Bei beidseitig wassergeführten bzw. Wasser-Luft-Economisern werden die Server indirekt mit Oberflächen- oder Grundwasser gekühlt und sind für jeden RZ-Typ effizient, aber mit hohen Investitionskosten verbunden.

### Flüssigkeitsgeführte Systeme

Mit wachsender RZ-Größe und der Zunahme der Leistungsdichten der Racks, stoßen Luftsysteme an Kapazitätsgrenzen. Eine Grenze der Wärmeabfuhr über Luft wird bei 37 W/cm<sup>2</sup> Server CPU Leistung gezogen (Ohadi et al. 2012). Demgegenüber weisen neue Racks eine Wärmeproduktion von mehr als 100 W/cm<sup>2</sup> auf. So werden zukünftig andere Technologien, wie die Flüssigkühlung oder 2-Phasenkühlsysteme, in der RZ-Kühlung Anwendung finden. Um ein CPU bei 70-80°C zu halten, sollte bei luftgeführten Systemen die Zuluft bei 20-27°C gehalten werden und bei wassergeführten Systemen die Vorlauftemperatur ca. 13-20°C betragen. Bei Verwendung von Flüssigkeiten zur Rackkühlung im RZ kann die Vorlauftemperatur bis zu 45°C mit einer Rücklauftemperatur von ca. 50-75°C betragen. Diese relativ hochwertige Abwärme kann dann entweder für andere Zwecke genutzt oder direkt über einen Luft-Flüssigkeitswärmetauscher auf 40°C gegen Außenluft gekühlt werden, so dass auch im Sommer freie Kühlung möglich sein kann. Bei der Rackkühlung über Wasser oder anderen Flüssigkeiten gibt es zwei Ansätze bei der technischen Ausführung. Zum einen das Mikrokanal- und zum anderen das Immersionsverfahren. Bei der Mikrokanalkühlung wird die Flüssigkeit in kleinen Rohren durch die Bauteiloberfläche geleitet und führt auf diese Weise die Wärme der IT-Komponente ab. Bei der Immersionskühlung wird die gesamte IT-Komponente in einem dichten Gehäuse in der Flüssigkeit gekühlt und die erforderliche Kühlflüssigkeitstemperatur wird durch einen sekundären Wärmeübertragungskreis gehalten. IBM, HP, Dell, Intel, Lenovo, 3M und Huawei arbeiten alle an Ein- oder Mehrphasen-Flüssigkühlservern. Die in Hongkong ansässige Bitfury Group hat zusammen mit 3M die Novec 7100 Flüssigkeit für ihre 2-Phasen-Immersionenkühlracks entwickelt und erfolgreich eingesetzt. Sie konnten in (3M Novec Engineered Fluids 2015) nachweisen, dass mit der 2-Phasen-Tauchkühlung eine Power Usage Effectiveness für Kühlung (PUE<sub>Kühlung</sub>) von 1,02 erreicht werden kann und planen ein 40 MW RZ als Demonstrator für dieses Verfahren mit einer Leistungsdichte bis zu 100 kW/m<sup>2</sup> zu errichten. Durch die hocheffiziente Wärmeübertragung kann ein dT von 2-5°C angehalten werden und die Vorlauftemperatur zu den Servern mit Hilfe der Novec-Technologie bei Immersionenkühlung auf bis zu 75°C erhöht werden.

### Luftgeführte Systeme

Traditionell wird bei der Raumkühlung durch einzelne oder parallel arbeitende CRAC oder CRAH kalte Luft in eine Seite des Raumes eingeblasen und die warme Abluft an der Decke abgesaugt. Bei der Auslegung besteht das Hauptziel darin, den Raum möglichst geschichtet in bestimmten Temperatur- und Feuchtigkeitsbereichen zu halten. Obwohl das Raumvolumen z.B. auf 20°C gehalten wird, können die Server jedoch deutlich heißer sein. Infolgedessen kann es bei Servern zu lokalen Überhitzungen (Hotspots) kommen, die die Lebensdauer der Server nachhaltig verkürzt. Bei der reihenbasierten Kühlung wird in jeder Reihe kalte Luft durch die Racks geblasen. Mit diesem Verfahren können Racks mit hoher Leistungsdichte gekühlt werden und es wird eine geringe Lüfterleistung benötigt. Diese Methode funktioniert dann optimal, wenn ein zentraler Kühlkreislauf vorhanden ist und die Luft für jede Reihe gut verteilt werden kann. Die Rack-basierte Architektur ordnet jedem einzelnen Rack Kaltluft zu. Die CRACs werden in jedem Rack untergebracht. Hier wird Kältemittel oder Kaltwasser direkt zur Tür des Racks geleitet, das dann über einen Wärmetauscher in Kaltluft umgewandelt und

durch die Server geblasen wird. Diese Methode kann hohe Leistungen (bis zu 50 kW) für jedes Rack bereitstellen. Bei diesem System treten weniger Kälteverluste auf, da die Kühlung über Luft nur im Rack stattfindet. Schwierigere Redundanzplanung für den Fall, dass die Kühlung in einzelnen Racks ausfällt, sind ein Nachteil dieses Systems. So ist in den meisten Fällen neben der Rackkühlung in der Regel eine raumbezogene Klimaanlage als Redundanzsystem vorhanden. Weiter sind die Instandhaltungskosten der Rackkühlung hoch, da für Wartung und Instandsetzung unter anderem Fachpersonal mit Kenntnissen der Klimatechnik und der IT-Komponenten benötigt wird. Bei der Kühlluftverteilung in Serverräumen wird derzeit meist eine reihenbasierte Kühlstrategie verfolgt. Raumbasierte Kühlung, ist nur für Serverräume mit geringer Leistungsdichte anwendbar und wird aufgrund ihrer geringen Effizienz nur noch selten angewendet. Rack-basierte Kühlung ist energieeffizient, benötigt aber viele Komponenten und verursacht hohe Investitionskosten.

In Bezug auf die Luftstromführung ist es effizienter, ein komplettes Kühlgehäuse (Kaltgang/Warmgang) vorzusehen bzw. die Zuluft oder Abluft mit lokal geführten Kanälen in die Serverracks zu- bzw. abzuführen. Bei der "direkt geflutet"- Methode wird die Zuluft in einigen Kanälen zum unteren Teil des Raumes in den Raum eingeblasen und die Wärme von oben abgeführt. Mit dem "lokal geführt"- Verfahren wird ein Wärme- oder Kaltgang geschaffen und die Zu- oder Abluft in die Nähe der Server geführt. Wenn z.B. über ein Gehäuse noch präziser geführt wird, spricht man von der "vollständig geführten"- Methode. Im besten Fall sollte die Kälte über einen Doppelboden abgegeben und die Wärme mit Hilfe einer abgehängten Decke aufgenommen werden. Dies kann jedoch nicht in jedem RZ und RZ Typ umgesetzt werden. Bei großen RZ wird der Kaltluft einlass über das Gehäuse und über einen Doppelboden gewährleistet. Die Abluft wird an der Oberseite des Gehäuses ausgeblasen und steigt konvektiv im Raum nach oben. In diesem Fall ist der Raum vollständig mit Abluft gefüllt und damit heißer als die Luft im Server oder im Kaltluftkanal. Auch ohne Doppelboden ist es sinnvoller einen Kanal zur Kälteversorgung einzusetzen. Für RZ > 50 kW und Rackleistung > 6 kW ist die Verwendung eines vollständig geführten Kaltgangs und eines lokal geführten Warmgangs wirtschaftlich sinnvoll.

Weiter werden Luftmanagement und Gebäudetypologie als weitere Optimierungsfaktoren in diesem Arbeitspaket analysiert und bewertet. Bei der Luftkühlung, der derzeit gebräuchlichsten Kühlmethode, spielen die Kühltemperatur und der Massenstrom eine große Rolle für den Hilfsenergiebedarf. Die Größe und Beschaffenheit der Fläche für die Kältemittel-Luft-Wärmeübertragung ist für die energetische Effizienz ebenfalls von hoher Bedeutung und hat einen großen Einfluss auf den erforderlichen Luftmassenstrom. Mit geringer, aber dennoch turbulenter Luftströmung wird die Wärmeübertragung von Servern an die Luft effizienter und vermeidet Hotspots durch z.B. Venturieffekte. Für eine gleichmäßige Verteilung des Luftstroms in Doppelböden stellen die Abmessungen des Luftkanals sowie die Größe und Ausführung der Öffnungsflächen im Boden wichtige Parameter dar. Mit Luftstrom- und CRAH-Optimierung kann die Hilfsenergie für die Kühlung signifikant (um bis zu 15 %) reduziert werden. Die Norm der American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) TC9.9 2016 und die Normen VDI 2054 & EN 50600 geben Empfehlungen für die klimatischen Bedingungen in Rechenzentren. Die Normversionen von 2016 erlaubten eine Zulufttemperatur zum Rack von max. 27°C, die mit einer gut ausgelegten Architektur der freien Kühlung, bei 20°C Außenluft erreicht werden kann. Bei entsprechender Auslegung geht als Richtwert beim Rückkühler 2°C, beim Wasser-Luft Wärmetauscher 1-2°C und durch Leitungsverluste und Pumpenwärmezufuhr 1-2°C verloren. Trotz der durch die Norm zugelassenen Zulufttemperatur von 27°C, wurde bei den meisten Bestands-RZ 20°C als Zulufttemperatur festgelegt. Daraus folgend kann eine freie Kühlung nur bis ca. 13°C Außenlufttemperatur betrieben werden. Bezogen auf Stuttgarter Wetterdaten bedeutet dies einen 1800 Stunden längerer Kompressionskühlungsbetrieb über das Jahr.

#### Feuchtigkeit im Serverraum

Das Risiko einer zu hohen Luftfeuchtigkeit im Serverraum muss ebenfalls in Betracht gezogen werden. Unter sehr trockenen Bedingungen können an Racks elektrostatische Aufladungen auftreten, die zu Kurzschlüssen und Ausfällen führen können. Weiter bei hohen Taupunkttemperaturen kann Wasserdampf an kühlen Flächen kondensieren und die elektronischen Komponenten beschädigen (Kurzschlüsse, Leiterbahnkorrosion, etc.). Laut ASHRAE-Vorschrift kann die relative Luftfeuchtigkeit in

RZ zwischen 20 % und 80 % liegen, es wird jedoch empfohlen, die Luftfeuchtigkeit auf 40-50 % zu regeln, damit weniger Hilfsenergie benötigt wird (Evans).

#### 4.1.2 Strominfrastruktur

Rechenzentren haben einen hohen Bedarf an elektrischer Energie. Damit sie ihre Beiträge zur Energiewende liefern können, ist ein möglichst effizienter und nachhaltiger Betrieb das Ziel. Um das zu erzielen, ist es notwendig die in den Rechenzentren eingesetzten Technologien zu bestimmen. Auf Grund dessen ist es möglich, Potentiale zur Minimierung von Verlusten bzw. zur Steigerung von Wirkungsgraden zu identifizieren.

In einem Rechenzentrum kann die elektrische Energie als Ausgangsrohstoff angesehen werden. Sie wird in erster Linie zum Betrieb der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) benötigt. Außerdem ist sie auch für die Klimatisierungssysteme erforderlich, die für die Bereitstellung von Kälte und dem Abtransport von Wärme von der IKT verantwortlich sind. Des Weiteren ist elektrische Energie für das Wandeln und Gleichrichten von Strom erforderlich. Dieser wird in einem Rechenzentrum in verschiedensten Spannungsebenen und –arten benötigt, da es einerseits unterschiedliche Philosophien und andererseits Anforderungen zur Versorgung der einzelnen Anlagen existieren. Der Einsatz all der benötigten Technologien ist verlustbehaftet. Das spiegelt sich sowohl in den einzelnen Wirkungsgraden der Anlagen als auch in den Leistungsindikatoren des Rechenzentrums wieder.

Die Steigerung der Effizienz und die Flexibilisierung des Rechenzentrumsbetriebs sind zwei Aspekte, die als Beitrag zu Energiewende wichtig sind. Ein anderer ist die Nutzung nachhaltig erzeugten elektrischen Stroms. Dabei existieren unterschiedliche Modelle, mit denen ein Rechenzentrumsbetreiber einen Beitrag zur Energiewende liefern kann.

In dem folgenden Abschnitt werden die Technologien, die zur Stromversorgung eingesetzt werden, und deren aktueller Stand der Technik sowie die Möglichkeiten der Energieversorgung betrachtet. Außerdem werden auf die potentiellen Möglichkeiten zur Flexibilisierung der Strominfrastruktur des Rechenzentrums eingegangen.

##### 4.1.2.1 Elektrische Versorgung des Rechenzentrums

In der Regel erfolgt die Versorgung von Rechenzentren mit elektrischer Energie über das öffentliche Verteilnetz. Die Versorgung des Rechenzentrums kann sowohl direkt aus der Mittelspannungs- (MS) oder aus der Niederspannungsebene (NS) erfolgen. Dies ist der Fall bei großen Rechenzentren. Grundsätzlich ist die elektrische Anbindung an das öffentliche Netz von der Unternehmensgröße, der Organisationsstruktur und dem Bedarf des Rechenzentrums abhängig, wie in Abbildung 44 dargestellt.

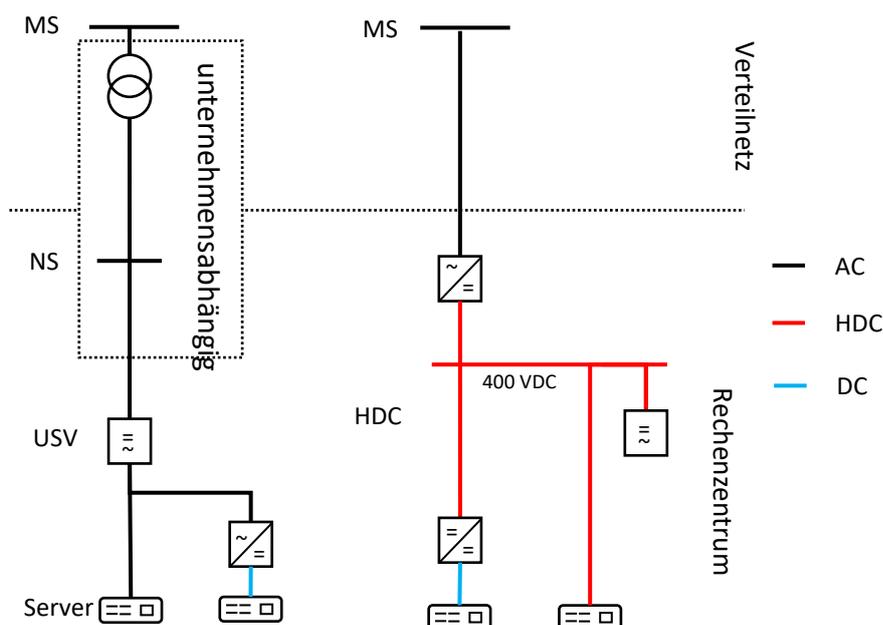


Abbildung 44: Versorgungsoptionen für Server und andere IT-Infrastruktur in Rechenzentren

Generell benötigt IT-Hardware Gleichstrom (DC). Dafür muss Wechselstrom gleichgerichtet werden. In herkömmlichen Rechenzentren erfolgt die finale Gleichrichtung erst durch die Netzteile (Power Supply Unit - PSU) der Server. Anstelle eines eingebauten Netzteiles werden auch separate Gleichrichter verwendet. Alternativ besteht auch die Möglichkeit die Spannung aus der Nieder- oder Mittelspannungsebene direkt gleichzurichten. In dem Fall werden die Server entweder mit einer höheren Gleichspannung (HDC) oder über zusätzliche Gleichspannungswandler mit elektrischer Energie versorgt. Dies wurde bereits in verschiedene Rechenzentren, wie zum Beispiel in der Schweiz 2012 (Sperlich 2018) und in China 2016 (ZTE 2016; Marwan 2016) umgesetzt.

Die Verwendung von Gleichspannung im Rechenzentrum außerhalb der Server hat das Ziel Wandlungsverluste zu reduzieren. Diese entstehen bei jedem Arbeitsschritt im Rechenzentrum bei dem die Spannung verändert wird. Dies beginnt bei der Transformation der Netzspannung in der USV-Anlagen, die intern auch eine Gleichspannung benötigen, bis hin zu den Netzteilen der IKT. Die Investition in ein effizienteres DC-Backbone sind zwar höher als die konventionelle Variante jedoch sind hiermit Effizienzgewinne bei dem elektrischen Energiebedarf von bis zu 20 % möglich (Hanstein 2018; Sperlich 2018). Dass solche Systeme marktreif sind, zeigen die Angebote von verschiedenen Hersteller (ELTEK DEUTSCHLAND GMBH 2020; Delta Power Solutions 2018 2020). Projekte, in denen auch Verbesserung wie die Einbindung einer Gleichspannungsversorgung für die Kühltechnik untersucht werden sollten, wurden bereits 2015 beim deutschen Rechenzentrumspreis eingereicht (Vogel Communications Group GmbH & Co. KG 2020).

#### 4.1.2.2 USV + Batterie (Netztrennung und Kurzzeitiges Backup)

Zu jeder Zeit sind Rechenzentren auf elektrische Energie angewiesen. Zentrale Elemente zu Sicherstellung des Rechenzentrumsbetriebs sind deswegen unterbrechungsfreie Stromversorgungsanlagen (USV). Sie sollen die IT-Infrastruktur bei einem möglichen Störfall mit Hilfe eines Batteriespeichers für einen kurzen Zeitraum (5-10 min) mit Strom versorgen und sicherstellen das die IT-Infrastruktur nicht durch Schwankungen im Netz beschädigt wird. Störfälle können sehr unterschiedlich sein. Dazu zählen neben Stromausfälle auch Spannungsabfälle und -einbrüche, Überspannungen und Überspannungsspitzen, elektrische Störsignale, Frequenzabweichungen und harmonische Verzerrung (Eaton Electric GmbH 2018; Warkentin 2014; Milad und Darwish 2015).

Für den Einsatz im Rechenzentrum gibt es drei verschieden USV-Klassen, die entsprechend der IEC 62040-3 eingestuft werden (Muttenthaler 2016; Eaton Electric GmbH 2018). Die Klasse 1 (Voltage and Frequency Independent – VFI) stellt Spannung und Frequenz unabhängig vom Netz der IKT zur Verfügung. Sie hat die höchste Verfügbarkeit und arbeitet in einem Doppelwandlermodus (Abbildung 45).

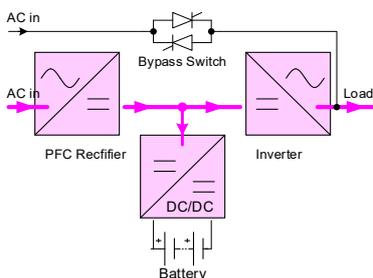


Abbildung 45: Prinzipdarstellung Doppelwandler-USV

Die Klasse 2 (Voltage Independent – VI) arbeitet in einem verbesserten Eco-Modus und ist in der Lage den Wechselrichter netzparallel zu betreiben. Bei der Klasse 3 (Voltage and Frequency dependent - VFD) arbeitet die USV im „klassischen“ Eco-Mode. Dabei sind Gleich- und Wechselrichter ausgeschaltet und die IKT wird über einen statischen Schalter vom Netz versorgt. Generell sind statische USV gut skalierbar und besitzt einen besseren Teillastwirkungsgrad als eine dynamische USV sowie eine höhere Überbrückungszeit als ein alternatives Schwungrad. Die Vor- und Nachteile der Klassen sind in der Tabelle 19 aufgeführt.

Tabelle 19: Vergleich der drei verschiedenen USV-Klassen

	Klasse 1 (VFI)	Klasse 2 (VI)	Klasse 3 (VFD)
Geregelte Spannung <sup>1</sup>	Ja	Nein	Nein
Geregelte Frequenz	Ja	Nein	Nein
Batterie wird geladen <sup>2</sup>	Ja	Ja	Nein
Last PFC <sup>3</sup>	Ja	Ja	Nein
Keine Umschaltzeit	Ja	Ja	Nein
Wirkungsgrad: 96+%	Ja	Nein	Nein
Wirkungsgrad: 99+%	Nein	Ja	Ja
<b>pPUE<sup>4</sup></b>	<b>1,051</b>	<b>1,036</b>	<b>1,029</b>

1 Die Spannung wird permanent auf Einhaltung der zulässigen bzw. einstellbaren Toleranzen überwacht und bei Bedarf in den Doppelwandlermodus (VFI) umgeschaltet.

2 Modellabhängig kann eine Batterieladung erfolgen

3 PFC: Power Factor Correction / Leistungsfaktorkorrektur

4 durchschnittlicher pPUE über 20 Jahren ohne Kühlung- Statische USV mit 20 Minuten Batteriekapazität – (Berechnet mit dem Modell Eaton 93PM,500kVA)

Mit der gewünschten Verfügbarkeit der IKT steigt auch der PUE des Rechenzentrums. Deswegen ist es empfehlenswert verschiedene USV-Managementmodi zu nutzen. Auf Grund der sehr guten Frequenz- und Spannungsstabilität im deutschen Stromnetz ermöglicht es, die USV über 99 % der Zeit im VI- oder VFD-Modus zu betreiben. Im Jahr 2018 belief sich die durchschnittliche Versorgungsunterbrechung je angeschlossenen Letztverbraucher auf 13,91 min (Bundesnetzagentur 2019) bzw. 0,0026 %.

#### 4.1.2.3 Netzersatzanlagen (NEA)

Um bei einem Netzausfall mit einer längeren Dauer sind Netzersatzanlagen notwendig. Diese sollen die Versorgung der IKT übernehmen, sobald die Speicherkapazität der USV zur Neige geht. Als Netzersatzanlagen werden entweder Diesel- oder Gasaggregate eingesetzt. Alternativ können auch nachwachsende Rohstoffe als Brennstoff verwendet werden (innovIT AG 2020).

In der Regel werden die NEA nur im Notfall oder zu Wartungszwecken betrieben. Um den Betriebskosten entgegen zu wirken und einen Beitrag zur Energiewende zu liefern, bieten Netzbetreiber und andere Unternehmen an, die NEA für die Teilnahme am Regelenergiemarkt einzusetzen (MTU Onsite Energy 2016; RWE Supply & Trading GmbH 2016; Next Kraftwerke GmbH 2019).

#### 4.1.2.4 Power Distribution Units (PDU)

Die Power Distribution Units sind für die Stromverteilung nach den USV verantwortlich. Sie sind vergleichbar mit herkömmlichen Steckdosenleisten nur, dass sie ein Vielfaches (>50 kW) der üblichen Energie den angeschlossenen Geräten zur Verfügung stellen können. PDU gibt es als einfachen Ausführungen, bei denen LEDs Störungen anzeigen, bis hin zu intelligenten Varianten, die über eine Netzwerkschnittstelle besitzen. Über diese Schnittstelle können sowohl Störungen als auch Energieverbräuche übertragen werden. Einerseits werden Betreiber dadurch befähigt Überlastungen frühzeitig zu erkennen und Störungen, wie zum Beispiel defekte Gleichrichter, schnellstmöglich zu identifizieren. Andererseits können mit Hilfe von intelligenten PDU die bezogenen Energiemengen den jeweiligen Verbrauchern zugeordnet und somit die damit zusammenhängenden Kosten abgerechnet werden. Energie lässt sich mit intelligenten PDU dadurch sparen, dass sie schaltbare Steckdosen besitzen. Dies ermöglicht es vorübergehend nicht benötigte Geräte abzuschalten und somit den Standby-Verbrauch zu vermeiden (Rüdiger und Ostler 2020; Hensel und Ostler 2018; Hanstein 2020).

#### 4.1.2.5 Power Supply Units (PSU)

Die IKT benötigt Gleichstrom in verschiedene Spannungshöhen zum Arbeiten. Für die Bereitstellung ist das Netzteil bzw. die Power Supply Unit (PSU) verantwortlich. Dieses richtet Strom gleich und passen über Wandler die Höhe der Gleichspannung an. Bei der Beschaffung von PSUs können durch die entsprechende Auswahl große potentielle Energieeinsparungen im späteren Betrieb erzielt werden. Dies gilt insbesondere für den Fall, dass die Gleichrichtung des Stroms bereits vorher erfolgte und wie

im vorigen Abschnitt mit einer HDC gearbeitet wird (Schramm 2008). Damit die Effizienz von verschiedenen Geräten verglichen werden kann, wurde die Initiative 80PLUS gegründet. Nach deren Vorgaben kann die Zertifizierung einer PSU erfolgen (CLEAResult Consulting Inc. 2020).

Wenn der Stromverbrauch des Rechenzentrums als Grundlage für die Ermittlung des PUE verwendet wird, dann kann sich der Einsatz von sehr effizienten PSUs negativ auf diese Kennzahl auswirken. Dies wäre der Fall, wenn der Energieverbrauch der PSUs zuvor zum Energiebedarf der IKT ( $E_{IT}$  in Formel 25) gerechnet wurde. Dann würde der neue prozentuelle Stromverbrauch der restlichen Infrastrukturanlagen den PUE erhöhen, da auch der Gesamtstromverbrauch ( $E_{RZ}$  in Formel 25) steigt. Jedoch sollte im Hinblick auf die Nachhaltigkeit eines Rechenzentrums immer die Minimierung des Gesamtstromverbrauchs die oberste Maxime sein und nicht die Optimierung einer Kennzahl.

### 4.1.3 IT Infrastruktur

Im Folgenden sollen Technologien auf der IT Seite vorgestellt werden, die der Erhöhung der Effizienz und der Flexibilisierung im Rechenzentrumsbetrieb dienen. Dabei wird neben der Beschreibung der Technologie bzw. Maßnahme, wo es möglich ist, auch eine Diskussion möglicher Kosten, des Installationsaufwands und der Einspar- bzw. Flexibilisierungspotenziale angeschlossen.

#### 4.1.3.1 Bewertungswerkzeuge und Benchmarks

In diesem Abschnitt sollen Instrumente, Zertifizierungen und Benchmarks vorgestellt werden, welche einem IT-Verantwortlichen Hilfestellungen bzw. Orientierung bei der Auswahl energieeffizienter Komponenten geben können.

Die *SPECpowerBenchmarks für Server (SPECpower<sub>ssj2008</sub>) (SPEC 2019)* stellen ein Benchmarksystem zur Evaluierung der Leistungs- und Performanz Charakteristik von Servern bereit. Die Resultate des benchmarkings verschiedenster Server-Systeme sind auf der homepage frei verfügbar und bieten eine unternehmensinterne Evaluierung der Benchmark-Resultate und Abgleich der Benchmark Workload Charakteristik mit der im eigenen RZ zu erwartenden Workload Charakteristik an. Im Falle des im Vorfeld Vorhandenseins von Informationen über den zu erwartenden workload der Rechenzentrumsanwendungen, können besagte benchmarks bei der Auswahl energieeffizienter Servertypen helfen.

Energy-Star (EnergyStar 2020) zertifizierte Server-Modelle gewährleisten durch Einhaltung bestimmter Anforderungen eine erhöhte Energieeffizienz. Die Anforderungen gliedern sich in folgende Bereiche:

- Effizienz der Stromversorgung
- Stromverbrauch im Idle-Betrieb
- Messbarkeit bestimmter Parameter

Ein Rechenzentrumsbetreiber hat hier die Möglichkeit, nach Prüfung der technischen Anforderungen, einen Preis-Leistungsvergleich zwischen einem nicht-zertifizierten und einem zertifizierten Model anzustellen. Eine Entscheidung für ein zertifiziertes Model garantiert im Allgemeinen in der Zeit des operativen Betriebs niedrigere Energieaufnahmen. Im Zusammenhang mit der Energy Star Zertifizierung steht auch das SERT (SPEC 2020) (Server Efficiency Rating Tool, entwickelt von SPEC) Software Werkzeug, welches im Zertifizierungsprozess verwendet und zur Evaluierung der Energie Effizienz von Servern herangezogen wird.

Mit dem „80 Plus“-Label gibt es die Möglichkeit besonders effizienter Netzteile auszuwählen. Anforderungen zur Erhaltung des Labels sind ein Wirkungsgrad von mindestens 80 Prozent, bei Auslastungen von 20, 50 und 100 Prozent. Des Weiteren sind verschiedene Abstufungen möglich, e.g. 80 Plus Bronze oder 80 Plus Gold. Rechenzentrumsbetreiber können über TCO Berechnungen bei vorliegender Kompatibilität abschätzen, ob eine Neuanschaffung bzw. Umrüstung von Netzteilen rentabel ist. Aus ökologischer Sicht ist eine Anschaffung zertifizierter Netzteile im Allgemeinen empfehlenswert. Der Installationsaufwand und mögliche Nicht-Verfügbarkeiten sollten in diesem Fall ebenfalls moderat ausfallen.

#### 4.1.3.2 Steuerung der Betriebsmodi der IT-Komponenten

In diesem Abschnitt sollen verschiedene Betriebsmodi der IT-Komponenten diskutiert werden. Abhängig der momentan anfallenden Arbeitslast können bestimmte Komponenten in verschiedene energiesparende Modi versetzt werden. Somit kann abhängig von einem ganzheitlichen, smarten und

dynamischen Einsatzkonzept dieser Modi im Rechenzentrumsbetrieb Energie eingespart werden ohne die Performanz signifikant zu beeinträchtigen

Viele Servermodelle besitzen einen integrierten „Sleep-Modus“ bei Nicht-Nutzung der Komponente. Ist die IT-Komponente über längere Zeit in einem inaktiven Zustand, kann damit Energie gespart werden, indem die Leistungsaufnahme reduziert wird. Dieses Verhalten kann oft automatisch aktiviert werden, wenn der Server in einer fest definierten Zeitspanne nicht genutzt wurde.

In der Praxis muss für diese Anwendungszwecke eine sinnvolle „Policy“ entwickelt werden, nach der die Komponenten in den „Sleep-Modus“ versetzt werden. In vielen Fällen ist dies einfach über eine grafische Oberfläche konfigurierbar. Der Verantwortliche sollte hier jedoch mögliche Performanzeinbußen im Auge behalten, die mit einem Hochfahren der Komponente aus dem Sleep-Modus verbunden sind. Unterschiede in der Leistungsaufnahme im Sleep-Modus und im hochausgelasteten Fall können bis zu 50 % betragen.

Noch restriktiver ist die zeitgesteuerte Ab- und Anschaltung bestimmter IT-Komponenten. Um Energie zu sparen, können bspw. während der Nacht- oder Ferienzeiten IT-Komponenten vollständig abgeschaltet werden. Der Verantwortliche muss hier mögliche Lizenzkosten für Verwaltungs- und Managementsoftware sowie eine sinnvolle „Policy“, nach der die Komponenten abgeschaltet werden, im Auge behalten. Ebenfalls sollte hier eine systematische Analyse möglicher Performanzeinbußen vorgenommen werden, da ein komplettes Hochfahren der Komponente schwerwiegender als das Wecken aus dem „Sleep-Modus“ ist.

Das gezielte Abschalten von CPU-Kernen (Core-Parking) ist eine Funktionalität, die vornehmlich in Windows Server<sup>3</sup> Produkten integriert ist. Dabei wird vom Betriebssystem dynamisch bestimmt, welche CPU-Kerne momentan verfügbar sind und benötigt werden, um Lasten abzuarbeiten. Nicht benutzte Kerne werden in einen Zustand mit geringer Leistungsaufnahme versetzt. Abhängig von der Art der eingesetzten Applikationen und dem Einsatz von Software aus der Windows Server Familie können sich Szenarien ergeben, die zu einem energieeffizienteren Betrieb der Anwendungen im Rechenzentrum beitragen.

ACPI stellt eine standardisierte Schnittstelle auf Betriebssystemebene dar, über welche definierte Geräte- und Systemzustände gesteuert werden können, um Energie- und Wärmemanagement, abhängig von bereitgestellten Funktionalitäten der Hardware, zu betreiben. ACPI Unterstützung sollte in den Betriebssystemen aktiviert und damit verknüpfte Anwendungen je nach Anwendungszweck und festgelegter „Energiespar Policy“ eingesetzt werden.

#### 4.1.3.3 Werkzeuge zur Inventarverwaltung

In diesem Abschnitt sollen Werkzeuge zur Inventarverwaltung, die vor allem für IT-Verantwortliche mit Beschaffungs- und Verwaltungskompetenzen relevant sind, diskutiert werden. Im Allgemeinen dienen diese Komponenten dazu, Verwaltung, Planung und Abhängigkeiten innerhalb der Gebäudeinfrastruktur und der IT ganzheitlich und effizient zu verwalten.

Das sogenannte „Asset und Lifecycle-Management der IT-Komponenten“ ist oft mit einer Softwarelösung zur Verwaltung des IT-Inventars, wie Hardware und Software, sowie damit verbundener Lizenzierungen verknüpft. Ebenfalls werden Änderungen der Komponenten Parameter im Laufe des Lebenszyklus erfasst. In vielen Fällen ist ein solches Verwaltungswerkzeug Teilfunktionalität einer größeren DCIM-Lösung. Bei effizienter Anwendung können Wartungs- und Austauschzeitpunkte einzelner Komponenten geschätzt werden. Die Effizienz dieser Methodik kann zukünftig durch KI-basiertes „Predictive Maintenance“ noch einmal verbessert werden.

Das Ziel von Data Center Infrastructure Management (DCIM). Systemen ist es, sowohl die Verwaltung und Planung der Gebäudeinfrastruktur wie auch die der IT-Komponenten zu erfassen. Sinn und Zweck ist es, effizient die Überwachung, das Management und die Kapazitätsplanung der gesamten IT- (und Gebäude-) Infrastruktur durchzuführen. Funktionalitäten sind u.a:

- Erfassung der Server und Speicher Auslastungen
- CFD (Computational Fluid Dynamics) Werkzeug zur Bestimmung von Kühlineffizienzen
- Automatisches Tickettool

---

<sup>3</sup> <https://www.microsoft.com/en-us/windows-server>

- uvm.

Auf der einen Seite erfordert das Gesamtsystem (Software, Hardware, Sensorik, Elektronik, etc.) einen hohen Installationsaufwand und Betriebskosten. Auf der anderen Seite bietet es auch ein extrem hohes Kosten-/Energieeinsparpotential bei effizienter Überwachung des Gesamtsystems und dessen Prozesse.

Servermanagement-Tools bieten die Möglichkeit zum Management der Hardware und insbesondere zur Erhöhung der Verfügbarkeit des Gesamtsystems. Im Allgemeinen sind diese Werkzeuge mit einer bestimmten Server-Familie eines bestimmten Herstellers verknüpft. Dies eröffnet weitere Möglichkeiten, wie die Verwaltung der Verträge und Garantievereinbarungen mit dem Verkäufer, sowie die Möglichkeit des „Remote-Support“. Beispiel für solche Systeme ist der HPE Systems Insight Manager (SIM). Rechenzentrumsverantwortliche sollten überprüfen, ob diese Werkzeuge einen operativen Mehrwert darstellen und in diesem Fall eine Integration in den Betrieb in Erwägung ziehen. Kapazitätsplanungswerkzeuge gestalten sich ähnlich wie DCIMs und wurden im Allgemeinen dafür entwickelt um Trends im Ressourcen Verbrauch zu erkennen und um zu bestimmen, wann weitere Ressourcen benötigt werden. Außerdem sollen mit ihrer Hilfe Aussagen getroffen werden können, wie groß das (IT-)System dimensioniert werden muss um künftige IT-Lasten zu befriedigen. Ein Beispielwerkzeug stellt der „HP Capacity Advisor“ dar.

#### 4.1.3.4 Energieeffiziente Hardware

Seit Dekaden entwickeln Hersteller nicht nur inhärent immer effizientere Hardware-Komponenten, sondern auch zusätzliche Methodiken und Konzepte, die diese Effizienz zusätzlich steigern. Diese Konzepte sollen in diesem Abschnitt diskutiert werden.

Energy-Star zertifizierte Server sind Modelle, welche die in Kap. 4.1.3.1 diskutierte Zertifizierung erfolgreich durchlaufen haben. Wie ebenfalls erwähnt, ist für die erfolgreiche Zertifizierung notwendig, dass SERT Test-Resultate vorliegen, um Vergleiche bzgl. der Server Effizienz in verschiedenen Test-Szenarien zu ermöglichen.

Blade Server bzw. Dual- und Multi-Node-Systeme besitzen i.A. eine etwas höhere Energieeffizienz als Rack-Server Modelle, falls das Powermanagement und die Kühlung optimiert sind. Außerdem besitzen diese Modelle größere, jedoch weniger Netzteile als Rack-Server Modelle. Größere Netzteile sind i.A. effizienter als kleine und tragen dadurch zu einer gesteigerten Energieeffizienz bei. Des Weiteren besitzen Blade-Systeme i.A. im unteren Lastbereich ein effizienteres Power Management als Standard Server Modelle. Auf der anderen Seite muss der Rechenzentrumsverantwortliche sich auch im Klaren sein, dass Blade-Server im Allgemeinen etwas teurer und aufgrund höherer Integrationsdichte schwieriger zu kühlen und zu vernetzen sind.

Ebenfalls gibt es für Speicherlösungen eine Energy-Star Zertifizierung. Sogenannte energieeffiziente „online data-storage“ Lösungen können eine Energy-Star Zertifizierung erhalten, falls folgende Anforderungen erfüllt werden:

- Vorhandensein einer effizienten Stromversorgung, welche Stromwandlungsverluste minimiert.
- Vorhandensein interner Lüfter für die Kühlung, welche mit variabler Geschwindigkeit betrieben werden können.
- Bereitstellung von Funktionen, welche beim Management der Daten helfen, um das Speichervolumen zu reduzieren und somit in der Folge Energie einzusparen.

Wie im Falle der Energy-Star zertifizierten Server sollte ein Rechenzentrumsbetreiber eine Anforderungs- und Kostenanalyse betreiben, die Aufschluss über eine mögliche Anschaffung liefert. Aus Sicht der Energieeffizienz ist die Anschaffung eines derart zertifizierten Modells gegenüber der eines vergleichbare herkömmlichen Modells im Allgemeinen vorzuziehen.

Redundant Array of Independent Disks (RAID) ist eine Speichertechnologie, welche mehrere Speicherplatten in einer einzigen logischen Entität vereint. RAID ist eine bevorzugte Technologie, wenn es um die redundante/performante Speicherung von Daten geht. Falls eine RAID Technologie verwendet wird, ist RAID 5 aus Sicht der Energie-Effizienz am geeignetsten, da der Schutz der Daten bei Ausfall einer einzelnen Platte bestehen bleibt, indem die verlorengegangene Information durch verteilte Informationen auf den übrigen Platten rekonstruiert werden kann. Die Effizienz liegt darin begründet,

dass lediglich eine redundante Platte, unabhängig von der Gesamtanzahl an Platten im RAID Verbund, benötigt wird. Der Einsatz einer speziellen RAID-Technologie im Rechenzentrumsbetrieb hängt stark vom jeweiligen Anwendungsfall ab. Bei RAID1 muss mit zusätzlichen Kosten entsprechend den ursprünglichen Einkaufskosten der Speicher Disks gerechnet werden. Es muss immer auf ein Gleichgewicht zwischen Kosten, Verfügbarkeit und Energieeffizienz geachtet werden. Außerdem ist eine Migration herkömmlicher Speichertechnologien auf RAID mit größerem Aufwand verbunden.

Massive Array of Idle Disks (MAID) stellt eine energieeffiziente Lösung, die häufig im Zusammenhang mit Tier 3 storage (Daten mit seltenem Zugriff) verwendet wird. MAID spart Energie, indem unbenutzte Platten abgeschaltet und nur dann wieder aktiviert werden, wenn die Daten von einer Applikation angefordert werden. Die Marktdurchdringung dieser Technologie ist eher gering einzuschätzen, kann jedoch vom Rechenzentrumsbetreiber als Alternativlösung zu Bandsystemen evaluiert werden.

Solid-State Drives (SSDs) besitzen im Gegensatz zu herkömmlichen Speicher Modellen keine rotierende Platte und bieten eine bis zu 10-mal höhere Lesegeschwindigkeiten. Im Vergleich zu einer 7.2 K rpm SATA Platte verbraucht eine SSD nur ein Neuntel der Energie pro gespeichertem Byte (Pflueger 2008). Für hoch performante datengetriebene Anwendungen sollte ein Rechenzentrumsbetreiber nach Möglichkeit von SSDs Gebrauch machen. Nachteilig an der SSD Technologie sind lediglich die hohen Investitionskosten.

Hard-Disk Drives (HDDs) sind aufgrund wesentlich geringerer Anschaffungskosten im Vergleich zu SSDs vor allem als Tier 2 storage nach wie vor verbreitet. Um die Energieeffizienz zu erhöhen, können bspw. Daten an bestimmten Plattenbereichen abgespeichert werden, um den mechanischen Aufwand beim Zugriff auf die Daten zu verringern. Außerdem lassen sich über eine variable Rotationsgeschwindigkeit der Platten und der Reduktion des Stromverbrauchs während des Leerlauf Einsparungen erzielen. Für sogenannte „warme Daten“, also Daten die nicht hoch-performant geschrieben und gelesen werden müssen und nicht archiviert werden, sind HDDs immer noch das Mittel der Wahl für Rechenzentrumsbetreiber.

Hybrid-Hard Drives (HHDs) entsprechen HDDs mit einem zusätzlichen Puffer aus permanentem Flash-Speicher, was zu einer Reduktion der Lese-/Schreib-Operationen auf der HDD führt, da bereits gelesene Daten vorgehalten werden können. Die HDD kann somit längere Zeit im Ruhezustand bleiben. Dies führt zu einem geringeren Energieverbrauch. HHDs stellen ein Nischenprodukt dar, könnten für bestimmte Anwendungsfälle, vor allem beim Fokus auf einen energieeffizienten Betrieb, jedoch eine praktikable Alternative darstellen.

Ein Bandarchivsystem stellt ein energieeffizientes Medium für Backup und Archivierung großer Datenmengen in Rechenzentren (Tier 3 storage, sehr seltene Zugriffe) dar. Bandarchivsysteme verbrauchen bis zu 290 Mal weniger Kosten für Energie als HDD Systeme und sollte im Bereich der Datenarchivierung im Rechenzentrumsbetrieb immer Mittel der Wahl sein.

Lower speed drives sind für Anwendungen interessant, welche es aufgrund geringerer I/O-Anforderungen gestatten, auf 15K rpm [SAS] HDDs zu verzichten, da eine höhere Rotationsgeschwindigkeit einen höheren Energieverbrauch impliziert. In solchen Fällen sind bspw. 7.5K rpm [SATA] HDDs vorzuziehen.

2,5-Zoll HDDs sind Laufwerke mit großer Kapazität und kleiner Baugröße. Diese Speicher sind ungefähr viermal kleiner als 3,5-Zoll HDDs und weisen damit einen geringeren Energieverbrauch auf, da Motoren und Plattenarme kleiner sind. Ebenfalls wird weniger Abwärme entwickelt. Ermöglichen es die Einschübe in die Serverschränke und werden die Kapazitätsanforderungen erfüllt, stellen diese Speicher für Rechenzentrumsbetreiber eine energieeffiziente Alternative dar.

Spezialisierte Hardware wie FPGAs oder Hardware-Beschleuniger können in bestimmten Anwendungsfällen eine besonders hohe Flexibilität und auch Energieeffizienz bereitstellen. Ein FPGA bspw. ist prinzipiell nichts Anderes als ein „frei programmierbarer“ Hardware Baustein, der sich für paralleles „stream-processing“ besonders eignet. Diese Komponenten bieten erhebliche Performanz- und auch Energieeffizienzpotenziale, müssen von den Administratoren jedoch in einen homogenen, konsistenten Anwendungsverwaltungskontext integriert werden, was sich als sehr komplexe Herausforderung darstellen kann.

#### 4.1.3.5 Flexibilisierung des Server Betriebs

Auf Serverebene bietet sich die Möglichkeit vor allem durch Anpassung der Prozessorfrequenzen flexibel auf zu erwartende Arbeitslasten zu reagieren. Da damit Energieeinsparnisse verknüpft sind, sollen diese Möglichkeiten in diesem Abschnitt diskutiert werden.

Manche Prozessorenfamilien bieten einen „Turbo Modus“ für bestimmte Anwendungs-/Anwendergruppen an. Über diese Funktionalität kann der Prozessor eines Servers in den höchsten Performanz-Zustand (definiert über das ACPI) gebracht werden. Die Taktfrequenz wird erhöht und in der Folge lassen sich Lastanfragen schneller abarbeiten. Folglich wird durch diesen Modus die Flexibilität der Last-Abarbeitung erhöht. Vor allem für Applikationen aus dem HPC Bereich ist dieser Modus interessant, da das Lastprofil bei vielen Anwendungen schon a-priori bekannt ist und somit proaktiv für bestimmte Zeiträume dieser Modus gewählt werden kann.

Dynamic Voltage and Frequency scaling (DVFS) ist eine Technik, mit der sich die Frequenz und/oder die elektrische Spannung eines Prozessors abhängig von den Performanz-Anforderungen zu einem bestimmten Zeitpunkt steuern lassen. Dies stellt den allgemeinen Fall des oben angesprochenen „Turbo-Modus“ dar und bietet in Fällen in denen hinreichend Informationen über die anfallende Last a-priori vorliegen eine Erhöhung der Möglichkeiten zur Flexibilisierung und Energieeinsparung.

#### 4.1.3.6 Effiziente Methoden der Speicherverwaltung

Nicht nur auf Serverebene finden sich spezielle Technologien und Methodiken zum effizienten und flexiblen Betrieb, auch im Speicherbereich sind solche Technologien vorhanden. Diese sollen im folgenden Abschnitt diskutiert werden.

Automated storage provisioning ist eine Technik welche die effiziente Einbindung von Server Storage-Kapazitäten in ein Speichernetzwerk umfasst. Im Speziellen geschieht dies durch korrekte Dimensionierung von Speicherkapazität, Identifizierung und Wiederbenutzung von ungenutztem Speicher und einer Erhöhung der Server Storage-Kapazität durch Konsolidierung des momentanen Speicherzustands. Eine optimale, jedoch oft komplexe Implementierung, gestattet dem Rechenzentrumsbetreiber sowohl eine starke Erhöhung der Flexibilität und der Energieeinsparpotenziale als auch die Möglichkeit zur Konsolidierung.

Deduplication software spürt redundant gespeicherte Daten in einem IT-System bzw. Netzwerk auf und löscht diese. Vorsätzlich erstellte Daten-Backups sollten von dieser Strategie ausgenommen werden. Nach Schätzungen verbrauchen redundante Kopien mehr als die Hälfte des typischen Datenbestands eines Unternehmens. Richtig eingesetzt und implementiert, bietet diese Software-Art große Möglichkeiten zur Konsolidierung und Erhöhung der Energieeffizienz. Vor dem Einsatz im Produktivbetrieb sollten Rechenzentrumsverantwortliche den Einsatz in einem isolierten Teilabschnitt gründlich testen bzw. von Drittanbietern umsetzen lassen, da diese Software mit dem Löschen von Daten verknüpft und im Schlimmsten Fall zu nicht wiederherstellbarem Datenverlust führen kann.

Thin provisioning. Beim Thin provisioning wird versucht, bezogen auf die jeweilige Anwendung, vordefinierte, aber nicht verwendete Kapazitäten zu eliminieren. Es wird dann Speicherplatz zur Verfügung gestellt, wenn Daten geschrieben werden müssen. Die von der Anwendung geforderte Reservekapazität entsprechend dem maximalen Speicherbedarf der Anwendung wird nicht allokiert. Eine Erweiterung der Speicherkapazität findet im laufenden Betrieb dynamisch, abhängig von den momentanen Schreibanforderungen der Anwendung statt. Folglich sind Energieeinsparungen möglich, da überdimensionierte Speicherkapazitäten für Anwendungen wegfallen. Auch hier ist von einer komplexen Umsetzung dieser Technologie in den Produktivbetrieb auszugehen. Außerdem sollte sich der Rechenzentrumsbetreiber im Voraus Gedanken machen bzw. testen inwiefern sich durch die Umsetzung das Performanz-Energieaufnahme Verhältnis der Anwendungen ändert.

Tiering storage (bereits angesprochen im Zusammenhang mit SSDs, HDDs und Magnetbändern) ist ein Mechanismus welcher die Speicher-Medien in verschiedene Ebenen einteilt. Dabei werden Daten, auf die selten zugegriffen werden, auf tiefer liegenden Ebenen abgespeichert. Auf diesen Ebenen ist es somit möglich, Technologien zu verwenden, die eine hohe Energieeffizienz aufweisen (bspw. Bandarchivsysteme), wohingegen auf höheren Ebenen Technologien mit höherer Performanz (bspw. HDDs) bevorzugt werden. Der Einsatz im Produktivbetrieb ist komplex, da neben der passenden

Verwaltungssoftware, die Ressourcenprofile der Anwendungen genau gekannt werden müssen und die Kapazitäten der verschiedenen Speichertechnologien sorgfältig a-priori gewählt werden müssen. Popular Data Concentration (PDC) ist eine Technik, die im Zusammenhang mit der Verwendung von Platten Arrays (bspw. RAID, MAID) zum Einsatz kommt. Dabei werden häufig verwendete Daten in einer Untergruppe gespeichert oder dorthin migriert. Folglich wird die Wahrscheinlichkeit erhöht Teile der übrigen Platten in einen Energie Spar-Modus versetzen zu können. Hier gibt es ähnliche Potenziale und Hemmnisse wie im Bereich des Tiering-storages.

Beim Thema Konsolidierung auf Speicher- und Strukturebene spielen sogenannte Storage Area Networks (SANs) eine wichtige Rolle. Diese vereinen Platten-Arrays mehrerer Server an einer zentralen Stelle und geben Zugriff darauf über ein lokales privates Netzwerk. Das heißt, es findet ein Übergang von direkt verbundenem Speicher (DAS) zu Speichernetzwerken statt. Dadurch können bspw. durch die Elimination redundant gespeicherter Daten Energieeffizienz Gewinne erzielt werden. In diesem Zusammenhang gibt es auch von Hersteller Seite Überlegungen, Netzwerk Equipment kompatibel zu mehreren Speicher Protokollen zu machen, um damit Komponenten und folglich auch Energie einsparen zu können. Eine Migration hin zum stärkeren Einsatz von SANs stellt im Produktivbetrieb einen komplexen Prozess dar und kann auch zu möglichen Performanzeinbußen führen. Auf der anderen Seite kann dadurch Flexibilität gewonnen und Kapazitäten wie auch Energie eingespart werden.

#### 4.1.3.7 Konsolidierung auf Netzwerkebene

Rechenzentrumsnetzwerke sind im Allgemeinen hochkomplexe Mischungen aus verschiedenen Ebenen, Topologien und verwendeten Übertragungstechniken. Auch hier gibt es verschiedene Möglichkeiten und Technologien zum Erhöhen der Flexibilität und der Effizienz. Dies gilt vor Allem im Hinblick auf Konsolidierungsmöglichkeiten des Netzwerk-Equipments. Dieser Abschnitt hat zum Ziel, diese verschiedenen Optionen näher zu beleuchten.

Konsolidierung ist nicht nur im Spezialfall der Speicher-Netzwerke, sondern ganz allgemein möglich und wird unter dem Begriff I/O Konsolidierung zusammengefasst. Die Vereinheitlichung der Traffic Classes (i.e. I/O Konsolidierung) bietet die Möglichkeit eines Switches oder eines Host Adapters, die gleiche physikalische Infrastruktur zu nutzen, um heterogene Datenströmen zu transportieren. Damit können die Anzahl physikalischer Komponenten und die Gesamt-Netzwerkkapazität reduziert und somit Energie gespart werden. In der Praxis bedeutet dies, dass Multifunktions-Netzwerk/Speicher-Adapter anstelle der spezifischen Netzwerkkarten eingesetzt werden können, was auf der einen Seite einen hohen Installationsaufwand, auf der anderen Seite hingegen Vorteile wie weniger Switch-Ports, weniger Verkabelung und Stromverbrauch bedeutet.

Mittels Aggregation mehrerer Switches können mehrere physikalische Switches in einem logischen Element vereint werden. Damit lassen sich die Switches effizienter betreiben, da Leerlaufphasen reduziert werden. Auf der anderen Seite muss sich der Verantwortliche bewusst sein, dass bei Aufrechterhaltung der gleichen Funktionalität häufig eine VLAN Fähigkeit vorhanden sein muss (um die vorherige physikalische Netzwerktrennung zu emulieren) und außerdem die vorhandene Rechenzentrumsinfrastruktur kompatibel sein muss (e.g. Einschübe in Racks).

Unter Reduzierung der Ebenen/TIERS versteht man die Technik, mit Hilfe eines aggregierten Switches mehrere Switch-Ebenen zu ersetzen unter der Bedingung der Einhaltung der Netzwerkdienste und Sicherheitsanforderungen. Neben bereits erwähnten Einsparungen durch die Reduzierung von Switch-Hardware muss sich der Rechenzentrumsbetreiber auch bewusst sein, dass bei derartigen Migrationen die Netzwerkarchitektur und Topologie völlig erneuert werden muss, was sich in der Praxis als hochkomplex darstellen kann.

Unter einer Zusammenführung von LAN- und SAN-Netzwerken versteht man die Kopplung von SAN- und LAN (Local-Area-Network) Netzen. Die meist übliche Trennung impliziert eine große Anzahl an Adaptern, Kabeln und Switchanschlüssen, die zum direkten Anschluss jedes Servers mit den entsprechenden LAN und SAN notwendig sind. Die Vereinigung dieser beiden Netzwerktechnologien könnte große Teile dieser Komponenten und somit auch Energie einsparen. Potenziale und Hemmnisse sind hier ähnlich zu bewerten wie im Absatz *Konsolidierung auf Netzwerkebene*.

Converged Networking Technologies stellen Technologien dar, die auf die Vereinheitlichung von Speicher(SAN) und Server(LAN) Netzwerken abzielen. Zu nennen sind hierbei:

- iSCSI
- Fibre Channel over Ethernet (FCoE)
- Data Center Bridging (DCB)

Potenziale und Hemmnisse sind hier ähnlich zu bewerten wie im Absatz *Konsolidierung auf Netzwerkebene*

#### 4.1.3.8 Virtualisierung

Unter Virtualisierung versteht man im IT-Bereich im Allgemeinen das Konzept des Platzierens verschiedener virtueller Ressourcen, wie zum Beispiel mehrere virtuelle Server, auf eine oder mehrere physikalische Komponenten, beispielsweise einem „echten“, physikalischen Server. Die damit verknüpften Vorteile wie erhöhte Flexibilität und Auslastung der Komponenten sollen in diesem Abschnitt diskutiert werden.

Mit Hilfe der Server Virtualisierung werden Lasten auf weniger physischer Hardware verteilt und dadurch der Energieverbrauch, der Kühlaufwand und die IT-Kapazitäten stark reduziert. Im Speziellen werden bei dieser Technik virtuelle Maschinen (VM) genutzt, die geschützt auf gemeinsam genutzter Hardware betrieben werden. Des Weiteren lassen sich durch diese Technik weitere starke Vereinfachungen und Flexibilisierungen des gesamten Lebenszyklus von Software Produkten (Entwicklung, Test, Anwendung, Wartung, etc.) erzielen. Virtualisierungstechniken sind im heutigen Rechenzentrumsbetrieb nicht mehr wegzudenken, nichtsdestotrotz werden viele Potenziale, insbesondere die Anwendung moderner Cloud-Paradigmen (e.g. Autoskalierung, Elastizität), nicht umgesetzt. Rechenzentrumsbetreiber sollten versuchen, auch mit Hilfe von Dritten, alle Möglichkeiten der Servervirtualisierung, e.g. Einsatz moderner Cloud-Paradigmen auszuschöpfen, was sowohl Erhöhung der Performanz und Verfügbarkeit als auch Energieeinsparungen impliziert.

In vielen Virtualisierungslösungen sind bereits Werkzeuge zur Überwachung der Leistung von VMs integriert. Zur Erhöhung der Verfügbarkeit und ganz allgemein zur Umsetzung moderner Cloud-Paradigmen sollten Rechenzentrumsbetreiber solche Werkzeuge als notwendige Grundlage nach Möglichkeit immer integrieren.

Speichervirtualisierung ist eine Technik mit der sich Plattenpools und virtuelle Plattenspeicher erzeugen und verwalten lassen, deren Kapazitäten und Zuteilungen sich je nach Anforderungen der Anwendungen steuern lassen. Im Allgemeinen lässt sich damit der Speicherbedarf verringern, Energieeinsparungen erzielen und zusätzlich die Flexibilität erhöhen. Die initiale Integration solcher Werkzeuge kann unter Umständen komplex sein, sollte aber als state-of-the-art Technologie von jedem Rechenzentrumsbetreiber umgesetzt werden. Beispielsweise liegt die typische Effizienz traditioneller Speicher-Arrays im Bereich zwischen 30 und 40 %. Untersuchungen zufolge kann durch Speichervirtualisierung die Effizienz bis zu 70 % oder noch mehr erhöht werden.

Virtualisierung von Speicherebenen, oder auch hierarchisches Speicher Management (HSM) genannt, soll den Prozess der Migration von Daten zwischen den verschiedenen Speicherebenen softwaregestützt automatisieren. Damit kann der Stromverbrauch reduziert werden, indem nur oft benötigte Daten auf hochperformanten Datenspeichern gelagert werden und weniger oft gebrauchte Daten auf energieeffizienteren Speichern abgelegt werden. Wie im Absatz über *tiering storage* beschrieben, sind damit große Energieeinsparungen möglich, wenn „heiße“, „warme“ und „kalte“ Daten auf den entsprechenden Ebenen automatisiert abgespeichert werden. Falls die Rahmenbedingungen und heterogenen Technologien auf Hardware-Ebene vorhanden sind, sollte eine derartige Lösung von Rechenzentrumsbetreibern umgesetzt werden.

Mithilfe der Netzwerkvirtualisierung werden Netzwerkressourcen als logische Einheiten unabhängig von ihrer physischen Topologie verwaltet. Neben einer erhöhten Flexibilisierung ergeben sich ebenfalls Möglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz, indem Router, physikalische I/O-Ports und zusätzliche Hardware für spezifische Netzwerkdienste konsolidiert werden. Hemmnisse und Potenziale sind analog den Ausführungen des Absatzes über Servervirtualisierung zu betrachten.

#### 4.1.3.9 Energiemanagement Werkzeuge

Auf dem Markt gibt es verschiedene Werkzeuge und Lösungen (hardware- und softwareseitig) mit der ein gezieltes Energiemanagement im Rechenzentrumsbereich betrieben werden kann. Diese sollen in diesem Abschnitt diskutiert werden.

Energiemanagement Suites sind meist Hardware-/Software-Lösungen und in vielen Fällen Teil eines übergeordneten DCIM Systems. Sinn solcher Systeme ist es, sämtliche energetische Kennzahlen, wie die der Klimatisierungstechnik, kontinuierlich zu erfassen. Dadurch wird ermöglicht, ungenutzte Potenziale und Optimierungsmöglichkeiten schneller sichtbar zu machen und dementsprechend auszunutzen. Potenziale und Hemmnisse solcher Werkzeuge sind im Absatz über DCIMs in Kap. 4.1.3.3 zu finden.

Die Idee des Power Capping ist es, Power Budgets an Server aktiv zuzuteilen. Damit können entsprechend den in der Praxis wirklich vorkommenden Leistungsaufnahmen der Server Power Caps festgelegt werden. Dynamisches Power Capping reduziert Spitzenlasten und kann damit helfen die Dimensionierung der Stromversorgung zu optimieren. Falls Rechenzentrumsbetreibern vorab Informationen über die zu erwartenden Ressourcenauslastungen vorliegen (bspw. im HPC Bereich), sollten diese evaluieren, ob über das Power-Capping Regeln eingeführt werden können, die Leistungsaufnahmen reduzieren und gleichzeitig die Performanz der Anwendungen nicht signifikant beeinträchtigen.

#### 4.1.3.10 IT-Last Management

Es gibt verschiedene intelligente technische Lösungen und Konzeptionen, anfallende Arbeitslasten im Rechenzentrumsbetrieb zu verteilen. Diese sollen in diesem Abschnitt diskutiert werden.

Lastmanagement innerhalb eines Rechenzentrums (bspw. mittels spezieller Managementsoftware) kann helfen, IT-Lasten effizient auf die verfügbaren (virtuellen) Server zu verteilen. Damit kann neben der Erhöhung der Verfügbarkeit ebenfalls Strom eingespart werden, indem VMs effizient zu jedem Zeitpunkt auf bestimmten Servern gestartet oder eliminiert werden. Beispiele hierfür sind Orchestrierungssoftware im Enterprise-Bereich oder bestimmte Scheduler im HPC Bereich. Ist Hochverfügbarkeit eine essenzielle Anforderung, sollten Rechenzentrumsbetreiber immer derartige Werkzeuge im Produktivbetrieb einsetzen.

Lastmanagement zwischen verteilten Rechenzentren eines Unternehmens hat als zugrundeliegende Idee das Konzept, Lasten in jenem (zum Unternehmen gehörenden) Rechenzentrum abzarbeiten, das neben der Erfüllung der Dienst Anforderungen die energetisch besten Rahmenbedingungen bietet. Ein Beispiel hierfür wäre, ein Großteil der IT-Last in ein Rechenzentrum zu verschieben, in dem es momentan möglich ist, freie Kühlung zu benutzen. Diese Idee ist momentan eher noch als Zukunftsvision zu betrachten aufgrund verschiedenster technischer Hürden (e.g. Verschiebung großer Datenmengen über mögliche nieder performante Leitungen), rechtlicher Einschränkungen (Brechen von Service-Level-Agreements, e.g. Datenschutz oder abnehmende Applikationsverfügbarkeit) und den beschränkten geographischen Rechenzentrumsstandorten des Unternehmens.

## 4.2 Betrachtung der nachhaltigen Energieversorgung

Um nachhaltig zu werden, müssen Rechenzentren effizientere Energiesysteme integrieren, in denen Kälte und Strom möglichst umweltfreundlich erzeugt werden. Sie basieren nicht nur auf der Nutzung erneuerbarer Energien, sondern auch darauf, wie der erzeugte Strom oder Wärme gespeichert und später bei Bedarf im Rechenzentrum genutzt wird. Da die Verfahren der Wärmegewinnung effizienter als die der Stromerzeugung sind, kann es, abhängig von den Gegebenheiten, sinnvoll sein am Standort des RZ Wärme zu erzeugen und diese vor Ort in Kälte oder Strom umzuwandeln. In diesem Kapitel, wie in Abbildung 46 dargestellt, werden die verschiedenen Technologien zur Erzeugung, Speicherung und Konversion erneuerbarer Energien im Hinblick auf die Verfügbarkeit in Baden-Württemberg, in welchen Größenordnungen sie eingesetzt werden können und was die Anforderungen an sie sind, diskutiert. Weiter werden sie in diesem Abschnitt hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit, ihrer Marktreife und Sicherheit analysiert.

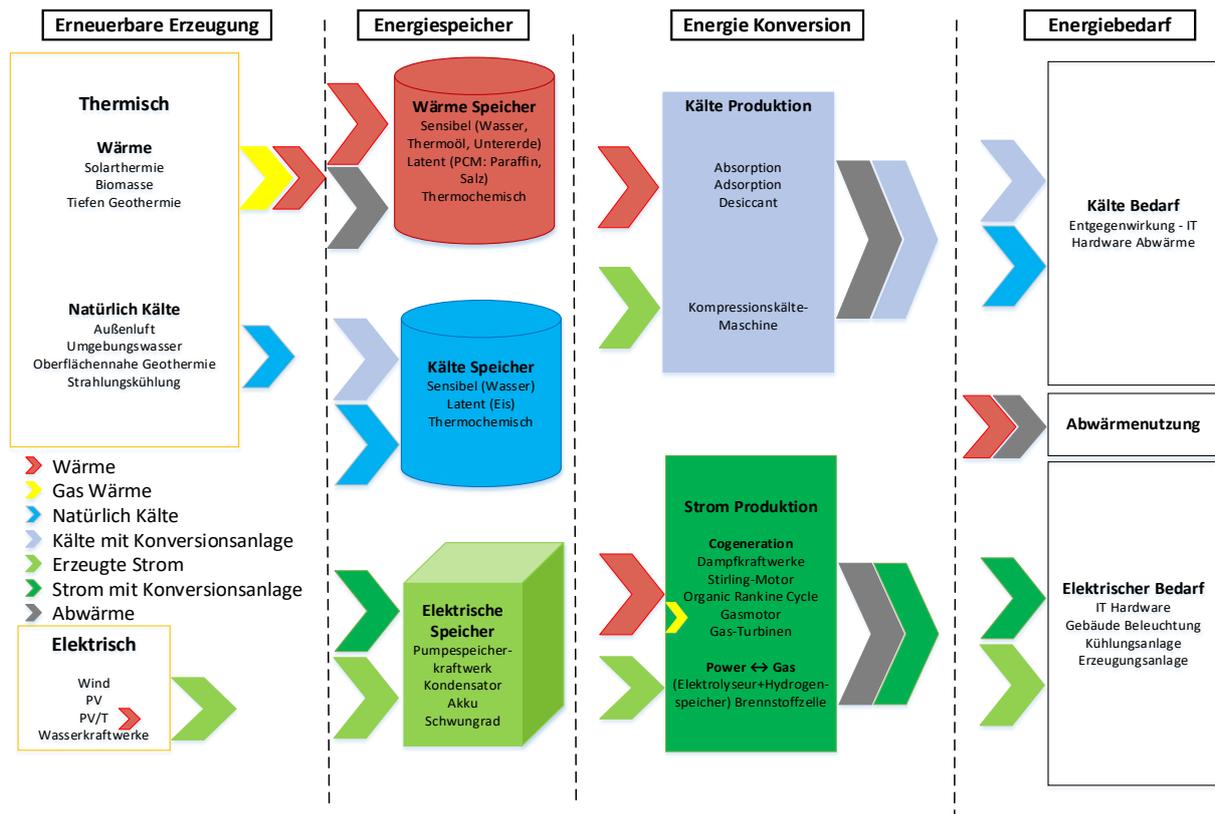


Abbildung 46: Überblick über die Integrationsmöglichkeiten erneuerbarer Energien bei Rechenzentren

#### 4.2.1 Energiebereitstellung vor Ort

Üblicherweise wird im Rechenzentrum eine Energiekonversion durchgeführt, so dass der Strom- und Kältebedarf zur Kühlung des Rechenzentrums gewährleistet wird. Zunächst wird in diesem Unterabschnitt auf die Möglichkeit der Nutzung der natürlichen Kühlung, anschließend auf die Erzeugung von Kälteenergie mittels Strom und Wärme und abschließend auf die möglichen Wege der Stromerzeugung eingegangen.

##### 4.2.1.1 Natürliche Kühlung

Die freie Kältenutzung stellt eine der wichtigsten Maßnahmen dar, um ein RZ nachhaltiger zu gestalten. Eine Zusammenfassung der verschiedenen Methoden zur natürlichen Kühlung ist als Überblick in der Abbildung 47 und in einer SWOT-Analyse in der Tabelle 20 aufgeführt. Schon 3/4 der neuen RZ integrieren Außenluftkühlung, sind aber in der Nutzung des Potenzials begrenzt, da im Sommer in vielen Fällen während des Tages die Außenlufttemperatur höher als die zulässige Kühllufttemperatur des RZ ist. In der Regel wird dann die Abwärme an die Außenluft über einen Rückkühler abgegeben, der, wenn er als Nasskühler betrieben wird, zusätzlich Wasser benötigt und mit hohem Genehmigungsaufwand verbunden ist (Legionellenproblematik). Der größte Vorteil der Nutzung von trockener freier Kühlung stellt die Tatsache dar, dass keine bürokratischen Schwierigkeiten bei Erwärmung von Außenluft zu erwarten sind. Im Gegensatz dazu sind die bürokratischen Hürden bei Nutzung von öffentlichen Gewässern wie Flüssen, Seen, Grundwasser oder Abwasser, bei theoretisch hohem Nutzungspotential hoch. Aufgrund gesetzlicher Vorgaben, niedrigem erlaubten dT der eingespeisten Wärme ins Grundwasser und der Zulässigkeit von nur wenigen kW Einspeiseleistung pro Anlage, stellt sich die Nutzung von Grundwasser als sehr kritisch dar. Seen haben das Kühlpotential um kleine RZ zu versorgen, erfordern aber zur Abmilderung ökologischer Auswirkungen häufig weitere technische Maßnahmen, wie z.B. die Vorkühlung des Rücklaufs über Erdreichwärmetauscher. Seewasserkühlung ist aus diesem Grund für große RZ im MW-Bereich untauglich und kleinere Seen weisen im Hochsommer Temperaturen über 25°C auf, was eine direkte Kühlanwendung ebenfalls auch für kleinere RZ erschweren kann.

Für die direkte natürliche Kühlung von großen RZ sind Flüsse perfekt geeignet, da fließendes Wasser niedrige Temperaturen aufweist und eine Möglichkeit für hohe Kühlleistungen bei niedrigen  $dT$  der eingespeisten Wärme bietet. Bei der Planung eines flussgekühlten RZ muss die Gefahr von Überschwemmungen in Betracht gezogen werden, die durch eine geeignete Standortwahl mit damit verbundenen längeren Kühlwasserleitungen, vermieden werden kann. Eine weitere, noch wenig genutzte Wärmesenke, sind Abwasserkanalnetze und erst langsam werden Wärmepumpen mit Abwassersystemen kombiniert, in denen die Temperaturen auch im Winter noch bei ca.  $10^{\circ}\text{C}$  liegen. Als Betreiber eines Rechenzentrums kann der Abwasserkanal als Wärmesenke genutzt werden, und es könnten Verbraucher an dieses Abwassernetz angeschlossen werden, die ihre dezentralen Mikro-Wärmepumpen mit einer höheren Temperatur der Wärmequelle betreiben können

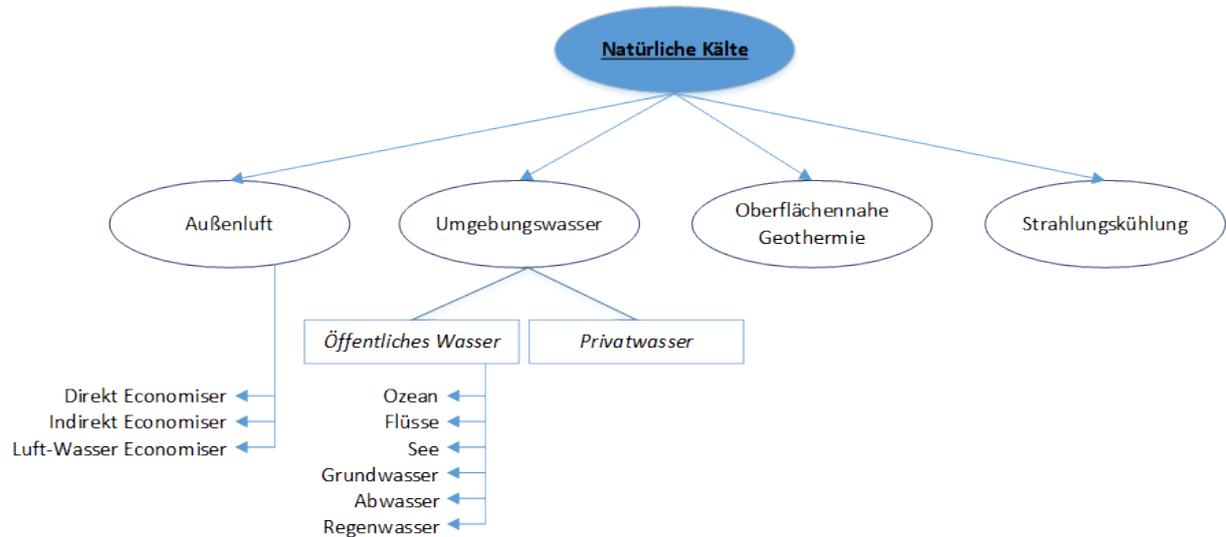


Abbildung 47: Überblick über die verschiedenen Möglichkeiten der natürlichen Kälteerzeugung

Tabelle 20: SWOT Analyse verschiedener Freie-Kälte Lösungen

	Stärken	Schwächen	Chancen	Gefahren
Außenluft	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reife Technologie</li> <li>• Keine Bürokratie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nicht nutzbar im Sommer</li> <li>• Nasskühler benötigen viel Wasser</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einfache Integration in bestehende RZ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Keine Abwärmenutzung möglich</li> <li>• Legionellenproblematik</li> </ul>
Flüsse	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Viel Potenzial in Verbindung mit kleinem dT</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• RZ sollte neben Flüssen liegen</li> <li>• Kleines dT</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mehr Freie Kühlungsstunden im Sommer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Überschwemmungsgefahr</li> <li>• Kompliziertes Genehmigungsverfahren</li> <li>• Gefahr für Wasserlebewesen</li> </ul>
See	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Für Standortwahl größere Auswahl als bei Flüssen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperaturerhöhung abhängig von Größe des Sees</li> <li>• Nicht für große MW-RZ tauglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Attraktive Umgebung (Biotop)</li> <li>• Mit Abwärmenutzung oder langen Leitungen kann Rücklauftemperatur reduziert werden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• In Sommer kann Temperatur höher als 25°C sein</li> <li>• Gefährdung der Wasserökologie</li> </ul>
Grundwasser	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Großes Potenzial trotz der Hindernisse mit weniger dT</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Strenge Grundwassergesetzgebung und mit hoher Priorität geschützt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Auch im Sommer im Vollbetrieb nutzbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grundwassernahe Gebiete sind geschützt und Tiefbohrungen teuer</li> </ul>
Abwasser	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Noch ungenutztes Potenzial</li> <li>• Wird interessant für Sektorkopplung mit dezentrale WP</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Im Stadtgebiet einsetzbar</li> <li>• Erwärmungseffekte in Abwasser noch nicht bekannt, weil bisher nur für Abkühlung mit WP genutzt.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schon bestehende Abwassernetze</li> <li>• Unter 20°C auch im Sommer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nicht für alle RZ einsetzbar</li> </ul>
Regenwasser	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kann ein Teil des Kühlturm Verbrauchs ersetzen und kann in unterirdischen Speichern genutzt werden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wasserertrag nur mit Terrasse Fläche des RZ sind nicht ausreichend</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bei kleinen gebäudeintegrierten RZ, kann Gebäudedach für Regenwassernutzung ausreichen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wasser braucht Filterung und bei Langzeitspeicher Biologische Verschmutzung möglich.</li> </ul>
Privatwasser	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nicht abhängig von öffentlichen Wasserquellen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gewässer muss gepflegt werden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ansprechend und Sicherheitserhöhung durch Wasserteich vor RZ.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Braucht viel Fläche</li> <li>• Wasserverlust durch Verdunstung kann höher als Kühlturm bzw. freie Kühlung sein.</li> </ul>
Oberflächennahe Geothermie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einfache realisierbares Potenzial bei jeder RZ Größe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kann mehr als konventionelle Kühlung kosten</li> <li>• Wenig dT erlaubt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relativ einfaches Genehmigungsverfahren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lokale Potenzialanalyse ist nötig</li> </ul>
Strahlungskühlung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Viel Potential bei geringem Stromverbrauch</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nicht bei jedem Klima einsetzbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Effiziente indirekte Freie Kühlung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Noch nicht ausgereift und Zukunft unklar</li> </ul>

dT = delta T: Differenztemperatur, die erlaubt oder möglich ist

Als eine unbürokratische Lösung für die Wassernutzung ist der Selbstbau eines privaten Gewässers denkbar, was aber betriebswirtschaftlich oft keine vorteilhafte Lösung darstellt, wenn das Gewässer nicht multivalent genutzt werden kann. Oberflächennahe Geothermie mit Erdwärmetauschern und Regenwasserspeichern sind eine weitere praktikable Möglichkeit zur RZ Kühlung. Regenwasser kann den Trinkwasserverbrauch für die nasse Rückkühlung stark reduzieren, führt aber zu geringeren monetären Einsparungen bei den RZ. Die Variante Strahlungskühlung ist technisch interessant, befindet sich aber noch in der Entwicklungsphase, hat noch keinen wirklichen Markt und kann vor allem in bewölkten Nächten nur eine geringe Kühlleistung erbringen. Auch wird für die Strahlungskühlkollektoren eine große Dachfläche (Wärmeabstrahlung ca. 100-300 W/m<sup>2</sup>) und ein Redundanzkühlsystem benötigt.

#### 4.2.1.2 Kälteerzeugung

Für die Kälteerzeugung in RZ ist die Kompressionskältetechnologie am weitesten verbreitet. Für den Betrieb der Kompressionskälteanlagen muss, zusätzlich zu dem bereits hohen Strombedarf von RZ, weiterer Strombedarf einkalkuliert werden. Daher werden auch andere Technologien wie die thermisch betriebene Absorptions-, Adsorptionskältetechnik und DEC-Kühlung eingesetzt, obwohl sie einen niedrigeren COP aufweisen. Ein weiterer Vorteil dieser Alternativen ist die Verfügbarkeit von regenerativer Wärme über z.B. thermische Solarkollektoren als Antriebsenergie, wenn Klimatisierung erforderlich ist.

Wie oben erwähnt, erfolgt die Kälteerzeugung für RZ zurzeit hauptsächlich mit Kompressionskältemaschinen. Aufgrund der grundsätzlich bereits vorhandenen Power Backup- und Stromversorgungsinfrastruktur für den RZ-Betrieb ist es einfach, Kompressionsmaschinen in ein RZ zu integrieren. Auf der anderen Seite erhöhen Kompressionsmaschinen den Stromverbrauch von RZ und USV sowie NEA müssen demzufolge auf eine höhere Leistung ausgelegt werden. Absorptionskältetechnik ist eine ausgereifte Technologie, die allerdings höhere Antriebstemperaturen als die beiden anderen thermischen Alternativen erfordert. Das Adsorptionsverfahren ist im Fall von RZ ebenfalls sehr gut geeignet und kann mit erneuerbarer Energie auch bei relativ niedrigeren Temperaturen betrieben werden. Abgesehen von der Tatsache, dass die DEC-Technologie stark von der Außentemperatur und der Luftfeuchtigkeit abhängig ist, stellen die luftgeführten DEC-Systeme aufgrund ihrer niedrigen Antriebstemperaturen für die RZ-Kühlung eine interessante Variante dar. Fernkälte ist vor allem dann sinnvoll, wenn RZ sich in einem Industriegebiet befinden und im Gebiet Abwärme zum Betrieb einer zentralen thermischen Kältemaschine zur Verfügung steht oder konventionell in Großanlagen Kälte mit hohem Wirkungsgrad erzeugt werden kann. Eine Zusammenfassung ist in der Abbildung 48 und in einer SWOT-Analyse in der Tabelle 21 aufgeführt.

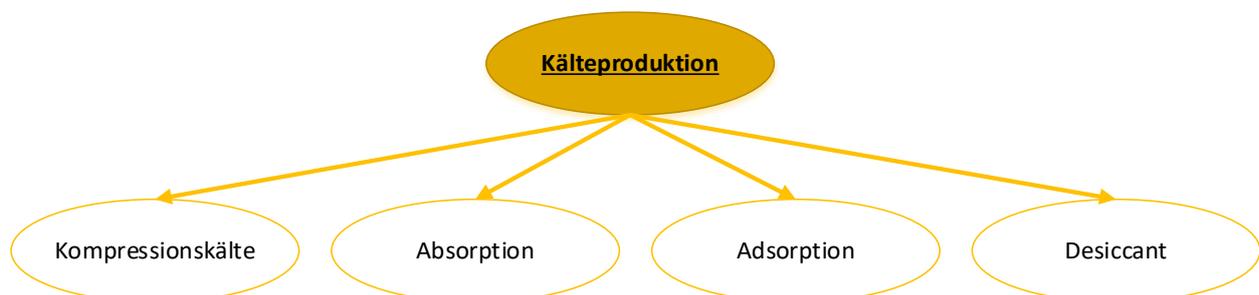


Abbildung 48: Übersicht der verschiedenen gebräuchlichen Kälteerzeugungsverfahren

Tabelle 21: SWOT Analyse verschiedener dezentraler Kälteerzeugungssysteme

	Stärken	Schwächen	Chancen	Gefahren
Kompressionskältemaschine	<ul style="list-style-type: none"> <li>Marktreif und einfache Integration</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nutzt Strom und erhöht erforderliche USV und NEA Leistung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mit Grünstrom aus PV/Wind problemlos und einfache Freie Kühlungsintegration</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Steigender Strompreis erhöht Kosten</li> </ul>
Absorption	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dezentral mit Wärme zu betreiben</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Geringere Effizienz als Kompressionskälte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erneuerbare Wärme ist effizienter als Stromerzeugung. Abwärme bedingt integrierbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Effizienz steigt primär mit höherer Temperatur</li> </ul>
Adsorption	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bessere Effizienz und mit niedriger Temperatur zu betreiben</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Weniger Effizienz als Kompressionskälte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erneuerbare Wärme ist effizienter als Strom Erzeugung. Abwärme integrierbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Komplexes System und noch nicht marktreif</li> </ul>
Dessicant	<ul style="list-style-type: none"> <li>Effizienter als Sorptionssystem und Freie Kühlung ist integriert</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Außenklima abhängig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Regenerative Wärme mit Abwärmenutzung sehr gut integrierbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Neue Technologie am Markt und noch wenige Beispiele bei RZ</li> </ul>
Fernkälte	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kälte kann zentral effizienter als dezentral produziert und per Kältenetz geliefert werden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nicht in großen Netzwerken realisierbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Im Winter freie Kühlung und im Sommer regenerative Kälte integrierbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sehr hohe Kosten und Standort orientiert</li> </ul>

#### 4.2.1.3 Strom- oder Strom & Wärmeerzeugung

Die Stromerzeugung ist gegenüber der Kälteerzeugung für Rechenzentren von größerer Bedeutung, da Rechenzentren ohne Kühlung bis zu 30 Minuten betrieben werden können, jedoch der RZ-Betrieb ohne Strom mit entsprechenden Folgen sofort eingestellt werden muss. Die dezentrale Stromerzeugung für Rechenzentren aus fossilen oder erneuerbaren Brennstoffen erfolgt in thermischen Kraftwerken bzw. BHKWs, dabei fällt Abwärme an. Stromerzeugungsanlagen können mit unterschiedlichen Brennstoffen betrieben werden und werden nicht nur für dezentrale Off-Grid-Lösungen, sondern auch für Back-up-Lösungen und Spitzenlast-Shaving eingesetzt.

Im Hinblick auf die RZ kann es für große RZ sinnvoll sein, neben dem RZ ein unabhängig betriebenes effizientes Kraftwerk für Strom und Wärme (möglichst aus erneuerbaren Quellen z.B. Biomasse) im hohen Leistungsbereich anzusiedeln, so dass sich die RZ-Betreiber nicht um eine nachhaltige Stromversorgung kümmern müssen. Für RZ im kW-Leistungsbereich stehen Mikro- und Minikraftwerke zur Verfügung, die von der RZ selbst betrieben werden können. Bei der direkten Nutzung von Strom, bei der Erzeugung von Strom durch Wärme, Kühlung durch Wärme und für die natürliche Kühlung ist immer eine Redundanzenergieversorgung für RZ-Strom und -Kühlung erforderlich. Zu diesem Zweck werden in der Regel Gas- bzw. Dieselmotoren oder Gasturbinen mit Generatoren als Netzersatzanlagen (NEA) eingesetzt. Als Zusammenfassung werden alle Erzeugungstechnologien in Abbildung 49 aufgeführt und mit ihren wichtigsten Parametern in Tabelle 22 dargestellt.

Tabelle 22: Überblick über wichtige Parameter der Stromproduktionstechnologien

Technologie	Effizienz	Elektrische Effizienz	Thermische Effizienz	Größe	Betriebs Temperatur	Wärme-abgabe Temperatur
Dampf-kraftwerk	~90 %	~30-45 %	~30-45 %	100 kW – 100 MW	150-600 °C	50-100 °C
Gas-Motor	~70-90 %	~19-49 %	~31-82 %	1 kW – 10 MW	400-1500 °C	50-100 °C
Gas-Turbine	~75-93 %	~24 % - 33 %	~48 % - 60 %	50 kW – 100 MW	400-1500 °C	50-100 °C
Organic Rankine Cycle	~5-25 %	~5-25 %	-	100 MW – 10 MW	Wärmequelle: 32 – 350 °C	50-100 °C
Stirling Motor	~80-93 %	~10-18 %	~60-75 %	1 kW – 250 kW	400-1500 °C	50-150 °C
Brennstoff-zelle	~75-95 %	35-60 %	20-50 %	1 kW – 250 kW	100-1000 °C	30-70 °C

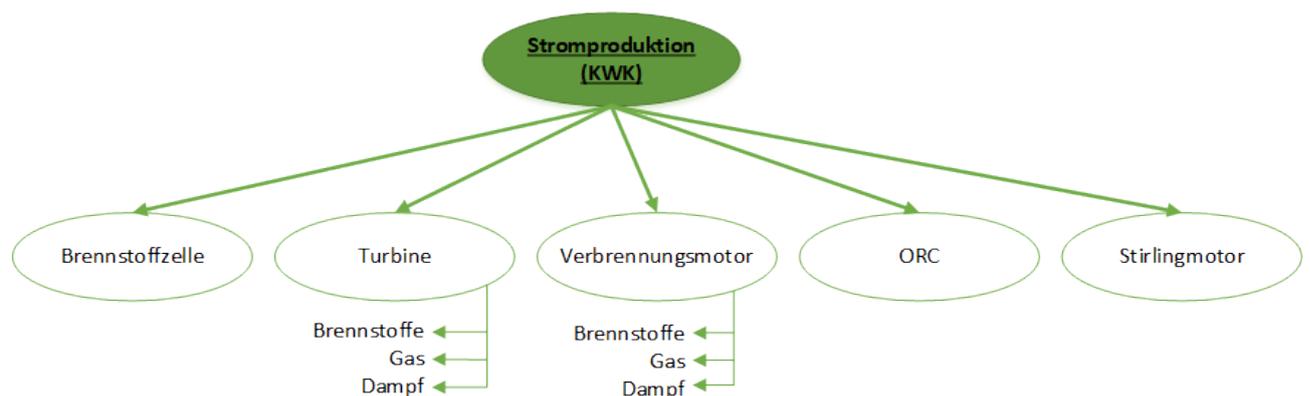


Abbildung 49: Übersicht über die verschiedenen Stromerzeugungsverfahren

Die Stromerzeugung oder die Gewinnung von Strom aus z.B. Abwärme ist in jedem Fall in einem Rechenzentrum als NEA notwendig. Darüber hinaus ist die Stromerzeugung auch dann interessant, wenn dezentrale regenerative Wärme zur Verfügung steht. Eine Zusammenfassung der Stromerzeugungstechnologien für RZ mit einer SWOT-Analyse ist in der aufgeführt.

Tabelle 23: SWOT Analyse verschiedener Stromerzeugungstechnologien

	Stärken	Schwächen	Chancen	Gefahren
Dampfkraftwerk	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mit Hochtemperatur Wärmequelle kombinierbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nicht dezentral als Großanlage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>PPA mit lokalem Dampfkraftwerk aus erneuerbaren Quellen möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Keine einsetzbare dezentrale Lösung für RZ</li> </ul>
Gas/Diesel-Motor	<ul style="list-style-type: none"> <li>In verschiedenen Größen erhältlich. Kurze Anfahrtzeit und bessere Teillast Effizienz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Weniger elektrische Effizienz bei kleinen Leistungen (BHKW) und hoher Flächenbedarfe pro kW</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mit erneuerbaren Brennstoffen kombinierbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Emissionen sind problematisch</li> </ul>
Gas Turbine	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kurze Anfahrtzeit und bessere Teillast Effizienz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>geringere Strom Effizienz als Gasmotor und hohe Betriebskosten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mit erneuerbaren Brennstoffen kombinierbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nur für mittlere und große RZ</li> </ul>
Organic Rankine Cycle	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mit Niedertemperatur wärmequelle nutzbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Noch in Entwicklung und niedrige Effizienz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Regenerative Wärme mit Abwärmenutzung integrierbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Neue Technologie im Markt und noch keine ausreichenden Ansätze für RZ</li> </ul>
Stirling Engine	<ul style="list-style-type: none"> <li>Als Kompletteinheit verfügbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Niedrige Strom Effizienz und Unreife Technologie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mit konzentrierter Solarthermie nutzbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sehr hohe Kosten und nicht interessant für RZ</li> </ul>
Brennstoffzelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kombinierbar mit Power-to-Gas Anwendung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sehr niedrige Abwärme Temperatur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>höhere Strom Effizienz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Unreife Technologie und noch in Entwicklung</li> </ul>

Aus der SWOT-Analyse in Tabelle 23 ist erkennbar, dass die Stirlingmotor- und Dampfkraftwerkstechnik für RZ schwer integrierbar und demzufolge uninteressant ist. Der Stirlingmotor ist technologisch noch unreif und hat kaum Anwendungsvorteile. Für Dampfkraftwerke bestehen kaum Chancen für einen dezentralen Betrieb. Eine PPA-Lösung mit einem lokalen Dampfkraftwerk ist denkbar, benötigt letztendlich jedoch eine Netzinfrastruktur. Gasmotor und Gasturbine sind allgemein die beste Lösung für die dezentrale Stromerzeugung in RZ. Gas- und Dieselmotoren weisen aufgrund ihres hohen Stromerzeugungsanteils und ihrer vielfältigen Kapazitätsoptionen einen höheren Integrationspotential auf. Der ORC-Prozess erscheint für die Abwärmenutzung von RZ interessant und gewinnt zunehmend an Bedeutung. Die Brennstoffzellentechnologie ist eine geeignete Option für die dezentrale Stromerzeugung mit erneuerbarem Gas. Obwohl derzeit technologisch nur mit großem Aufwand für RZ einsetzbar, scheint der Markt für die Brennstoffzellentechnologie zu wachsen.

## 4.2.2 Externe Energieversorgung

### 4.2.2.1 Erneuerbare Energie-Erzeugung

**Solar:** Solarenergie kann genutzt werden, um thermische Energie über solarthermische Kollektoren oder um mit Hilfe der Photovoltaik Strom zu erzeugen. Wärme kann mit thermisch betriebenen

Kälteerzeugern zur Erzeugung von Kälte genutzt werden, die zur Kühlung des Rechenzentrums verwendet werden kann. Für thermische Kälteverfahren sind mindestens 50°C als Antriebstemperatur erforderlich. Die Kühlung mit der Desiccant Evaporative Cooling (DEC)-Technik erfordert min. 50°C, die Adsorptionskältetechnik min. 65°C und Absorption min. 85°C Antriebstemperatur. Die Antriebsenergie für die DEC-Kühlung als luftgeführtes System kann auch mit Hilfe von Luftkollektoren bereitgestellt werden. Aufgrund ihres höheren Temperaturniveaus werden für die Absorptionskühlung Röhrenkollektoren empfohlen und Flachkollektoren sind für den Adsorptionskühlprozess ausreichend. Ein Vorteil der Solarthermie stellt ihr hoher Wirkungsgrad (60-90 %) dar (Duffie und Beckman 1980). Bei der solaren Energieerzeugung sind ein saisonaler und täglicher Abgleich von Verbrauch und Produktion über geeignete Speicherverfahren erforderlich. In der Winter- und Übergangszeit sollten demzufolge aus ökonomischer und ökologischer Sicht für RZ-Kühlzwecke wann immer möglich, freie Kühlverfahren eingesetzt werden. Einen Nachteil der Solarthermie in Kombination mit Kälteproduktion stellen die relativ geringere Systemeffizienz und der höhere Wartungsaufwand dar. Eine weitere Möglichkeit der Nutzung von Solarenergie ist die Photovoltaik (PV). Mit PV-Modulen kann Strom mit einem Wirkungsgrad von 10-25 % (KIT-Zentrum Energie 2016) erzeugt werden. Mit PV-Strom können sowohl Server als auch Kompressionskältemaschinen zur RZ-Kühlung betrieben werden. Im Vergleich zur Solarthermie sind die Erzeugung pro m<sup>2</sup> und der Wirkungsgrad jedoch gering. Dennoch ist es möglich und unter Nachhaltigkeitsaspekten sinnvoll, Strom selbst im MW-Bereich mit der entsprechenden Anzahl von Modulen zu erzeugen. Ein Vorteil ist, dass PV an jedem Ort an das Stromnetz angeschlossen und als Off-Site-Anlage oder über PPA genutzt werden kann. Für die PV-Anlagen wird aufgrund des niedrigen Wirkungsgrads viel Fläche benötigt und in Bezug auf die erforderliche Leistung kann die PV für große RZ nur auf großen Freiflächen oder in Kombination von Freifläche und Dachfläche installiert werden. Laut Energieatlas der LUBW (Energieatlas - Energieatlas 2018) sind in BW nur noch 20 km<sup>2</sup> freie Fläche für PV-Installationen vorhanden (ca. 1,1 TWh/a)

**Biomasse:** Als Biomasse werden Stoffe bezeichnet, die einen pflanzlichen oder tierischen Ursprung haben. Dazu zählen beispielsweise Holz und Dung, aber auch Pflanzenöl und Stroh. Biomasse im Sinne der Biomasseverordnung sind biologisch abbaubare Anteile von Abfällen aus Haushalten und Industrie, Deponiegas, Klärgas, Klärschlamm im Sinne der Klärschlammverordnung und Pflanzenölmethylester. Biomasse wird in fester, flüssiger und gasförmiger Form zur Strom- und Wärmeerzeugung sowie zur Herstellung von Biokraftstoffen genutzt. Auf die gesamte Endenergie (Strom, Wärme, Kraftstoff) aus erneuerbaren Energiequellen bezogen, nimmt die energetische Nutzung von Biomasse in BW einen Anteil von rund 70 % ein (Energieatlas - Energieatlas 2018). Im Jahr 2011 wurden rund 78.000 Hektar bzw. 9,4 % der Ackerfläche in Baden-Württemberg zur Erzeugung von Biogas genutzt (Energieatlas - Energieatlas 2018). Eine weitere Steigerung erscheint aus Gründen der Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion und hinsichtlich der Biodiversität nur noch in geringem Umfang möglich. Mit verschiedenen Biomasse-Technologien können mit der erzeugten Wärme und/oder dem Strom, Kühlungstechnologien betrieben und der Strom für den RZ-Betrieb bereitgestellt werden. Die gebräuchlichsten Biomasseenergieerzeugungsverfahren stellen Bio-Erdgas oder Biogas betriebene KWK-Anlagen dar. Biomasse-KWK in Kombination mit RZ stellen in ländlichen Gebieten eine mögliche Variante dar. Für große RZ ist es eventuell sinnvoll, Biomasse-Strom- und -Kälteerzeugung auszulagern, da professionell betriebene Großanlagen eine höhere Effizienz aufweisen. Aufgrund ihrer hohen Flexibilität können Biomasseanlagen in Spitzenlastzeiten Strom oder Wärme ins Netz einspeisen, für die sie Prämien erhalten können. Andererseits wird zusätzliche Lagerfläche benötigt und es ist aus wirtschaftlichen Gründen nur in Ausnahmefällen sinnvoll Biomassekraftwerke mit weniger als 500 kW Leistung zu bauen (Eltrop et al. 2006).

**Geothermie:** Im Untergrund werden Sonneneinstrahlung, Erdwärme und Grundwasserwärme gespeichert und als Geothermie bezeichnet. Die Temperatur geothermischer Wärmequellen wird in der Regel mit zunehmender Tiefe höher. Oberflächennahe Geothermie ermöglicht eine direkte Nutzung von Niedrigtemperaturwärme (5-25°C). Dieses Niedertemperaturwasser aus geothermischen Quellen kann, abhängig vom Temperaturbereich, auch zur Kühlung von RZ verwendet werden. Ausgehend von einer Jahresmitteltemperatur von 8,5°C in Deutschland und einem geothermischen Gradienten von 3°C/100 m liegt die Untergrundtemperatur beispielsweise in 100 m Tiefe bei etwa 11–

12°C (Erneuerbare Energien 2018). Typische Systeme der Oberflächennahen Geothermie sind Erdkollektoren, Erdwärmesonden, Grundwasserbrunnen oder auch erdberührte Betonbauteile ("Energiepfähle"). In Baden-Württemberg gibt es im Vergleich zu anderen Bundesländern nur ein kleines Potenzial für Tiefengeothermie, da es nur wenige Gebiete gibt (Region Oberrhein-Graben), in denen Tiefengeothermie zur Wärmegegewinnung möglich ist. In BW gibt es laut Energie Agentur für erneuerbare geothermische Energie nur 0,4 MW installierte Kraftwerksleistung und nur ein Potential für insgesamt 5,5 MW geothermische Kraftwerksleistung. Fast 90 % der geothermischen Anlagen sind unter 200 m tief und werden hauptsächlich für Thermalbäder und Fernwärme genutzt (Agentur für Erneuerbare Energien). Darüber hinaus wird oberflächennahe Geothermie heutzutage häufig für Sole- und Wasser-Wasser-Wärmepumpen eingesetzt (Erneuerbare Energien 2018). Als derzeit beste Lösung für RZ, um Serverräume im Sommer zu kühlen, steht im Bereich Geothermie verschiedenen Verfahren der oberflächennahen Geothermie zur Verfügung.

**Wind:** In Nordeuropa und Deutschland spielt die Windenergie die wichtigste Rolle bei der Integration erneuerbarer Energien in die Stromversorgungsstrategien. In Deutschland machten Windkraftanlagen 2017 fast 10 % der gesamten Stromerzeugung aus (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE). Das Potenzial im BW ist jedoch relativ gering und macht nur bisher 2 % der gesamten jährlichen Stromerzeugung BWs aus (Energieatlas - Energieatlas 2018). Nach der Bewertung der verfügbaren Fläche unter Berücksichtigung der Eignungsfaktoren wird geschätzt, dass 1.532 km<sup>2</sup> oder 4,3 % der Fläche Baden-Württembergs für die Nutzung von Windenergie zur Stromerzeugung geeignet sind (Bundesverband WindEnergie e.V.). Der Großteil dieses Potenzialgebietes liegt im Nordosten des Landes, auf der Schwäbischen Alb und im Südwesten im Schwarzwald (Bundesverband WindEnergie e.V.). Die begrenzte Standortverfügbarkeit in BW und das erhöhte Risiko bei On-Site Installationen qualifizieren PPA Off-Site Lösungen als die geeignetsten Variante für die Windstromversorgung von RZ.

**Wasserkraft:** Derzeit stammen 7 % der Bruttostromerzeugung oder 30 % des EE-Stroms in BW aus Wasserkraft (Agentur für Erneuerbare Energien). Das Potenzial der Wasserkraftwerke in BW wird mit 1,2 GW beziffert, von denen 0,9 GW bereits installiert sind. Ein Großteil dieser Projekte entfällt auf die Regionen Laufenburg und Iffezheim. Ein Nachteil ist die Größe der potentiellen Wasserkraftwerke. Es gibt weniger als 100 große Wasserkraftwerke mit einer Leistung von mehr als 1 MW (Erneuerbare Energien 2018). Auf den 9.347 identifizierten Standorten für Wasserkraft befinden sich fast 5.300 kleine Kraftwerke mit weniger als 8 kW Leistung (Agentur für Erneuerbare Energien). Ein weiteres Problem der Wasserkraftnutzung sind ökologische Auswirkungen auf Fische, Gartenbau und Landwirtschaft und damit verbundene, aufwendige Antrags- und Genehmigungsverfahren. Dies und das geringe ungenutzte Potential in BW lassen Wasserkraft als Lösung zur regenerativen Strombereitstellung für RZ wenig geeignet erscheinen.

#### 4.2.2.2 Flexibilisierung des Energiebedarfs

Die Versorgungsstabilität im Elektrizitätssystem basiert auf einem Gleichgewicht zwischen Erzeugung und Verbrauch. Im fossilen Stromerzeugungssystem wird die Erzeugungsseite entsprechend dem Verbrauch gesteuert. Mit zunehmendem Anteil an erneuerbaren Strom aus Sonnen- und Windenergie muss die Verbraucherseite Flexibilität zeigen, um einen maximalen Anteil der fluktuierenden Stromerzeugung direkt verbrauchen zu können und damit den Bedarf an steuerbarer Ausgleichsenergie aus konventionellen Kraftwerken zu reduzieren.

Die Frage ist, wie Rechenzentren durch entsprechende Infrastruktur zu flexiblen Verbrauchern oder gar Erzeugern von Energie gemacht werden können. Hier bietet sich das zeitliche und räumliche (bei vernetzten Rechenzentren) Lastmanagement der IT Rechenleistung an oder die Erzeugung von Kälte durch den Einsatz von thermischen Speichern. Des Weiteren kann durch die Nutzung eines lokalen BHKWs zur Stromerzeugung, das Rechenzentrum in Zeiten eines hohen Angebots an erneuerbarer Energie aus Sonne und Wind aus dem Netz den Strom beziehen, und zu Zeiten eines niedrigen Angebots, Strom aus einem BHKW nutzen. Durch die Kopplung des BHKWs an ein lokales Wärmenetz kann der eingesetzte Brennstoff mit einem hohen Wirkungsgrad zur Deckung von Strom und Wärmebedarf genutzt werden.

Flexibilität im Energiebereich wird als „die Veränderung von Einspeisung oder Entnahme in Reaktion auf ein externes Signal (Preissignal oder Aktivierung), mit dem Ziel eine Dienstleistung im Energiesystem zu erbringen“ definiert. Die Parameter, um Flexibilität zu charakterisieren beinhalten die Höhe der Leistungsveränderung, die Dauer, die Veränderungsrate, die Reaktionszeit, den Ort, usw. Bei hoher Residuallast (bei der eine hohe Stromnachfrage mit einer geringen Produktion von Wind- und Sonnenstrom zusammenfällt) wird es immer wichtiger, dass flexible Erzeuger, Speicher oder auch Stromimporte, insbesondere aber auch flexible Verbraucher, die ihre Stromnachfrage reduzieren, dazu beitragen, Angebot und Nachfrage zur Deckung zu bringen (Agora Energiewende 2018). Im umgekehrten Fall einer geringen Residuallast (mit niedriger Stromnachfrage, aber hoher Erzeugung von Wind- und Sonnenstrom) kann es neben Speicherung und Export sinnvoll werden, flexiblen Verbrauch in diese Zeiten zu verlagern (Agora Energiewende 2018). Flexibilität hat neben den positiven ökologischen Effekten auch einen erheblichen kommerziellen und gesellschaftlichen Wert. Wird der Stromverbrauch flexibel angepasst und die Kosten optimiert, werden die Netze entlastet, Spitzenlasten werden minimiert und die Kosten für Kapazitätserhalt und Netzausbau reduziert.

Auf der Lastseite des Rechenzentrums, wie in Abbildung 50 dargestellt, sind verschiedene Energieeffizienzmaßnahmen wie effiziente Kühlung, effiziente IT-Hardware, IT-Lastmanagement (Software), Konsolidierung, sowie die digitale Vernetzung Faktoren, die die Flexibilität erhöhen können. Redundanzsysteme wie Backup-Kühlsysteme, USV und Notstromaggregate können zu aktiven Komponenten der Energieflexibilisierung mit großem Potenzial werden. Eine weitere Möglichkeit der Flexibilität ist die Virtualisierung der IT-Last durch räumliche Verteilung in einen anderen Teil der Welt, in dem billiger erneuerbarer Strom verfügbar ist. Auf diesen Aspekt wird hier jedoch nicht näher eingegangen.

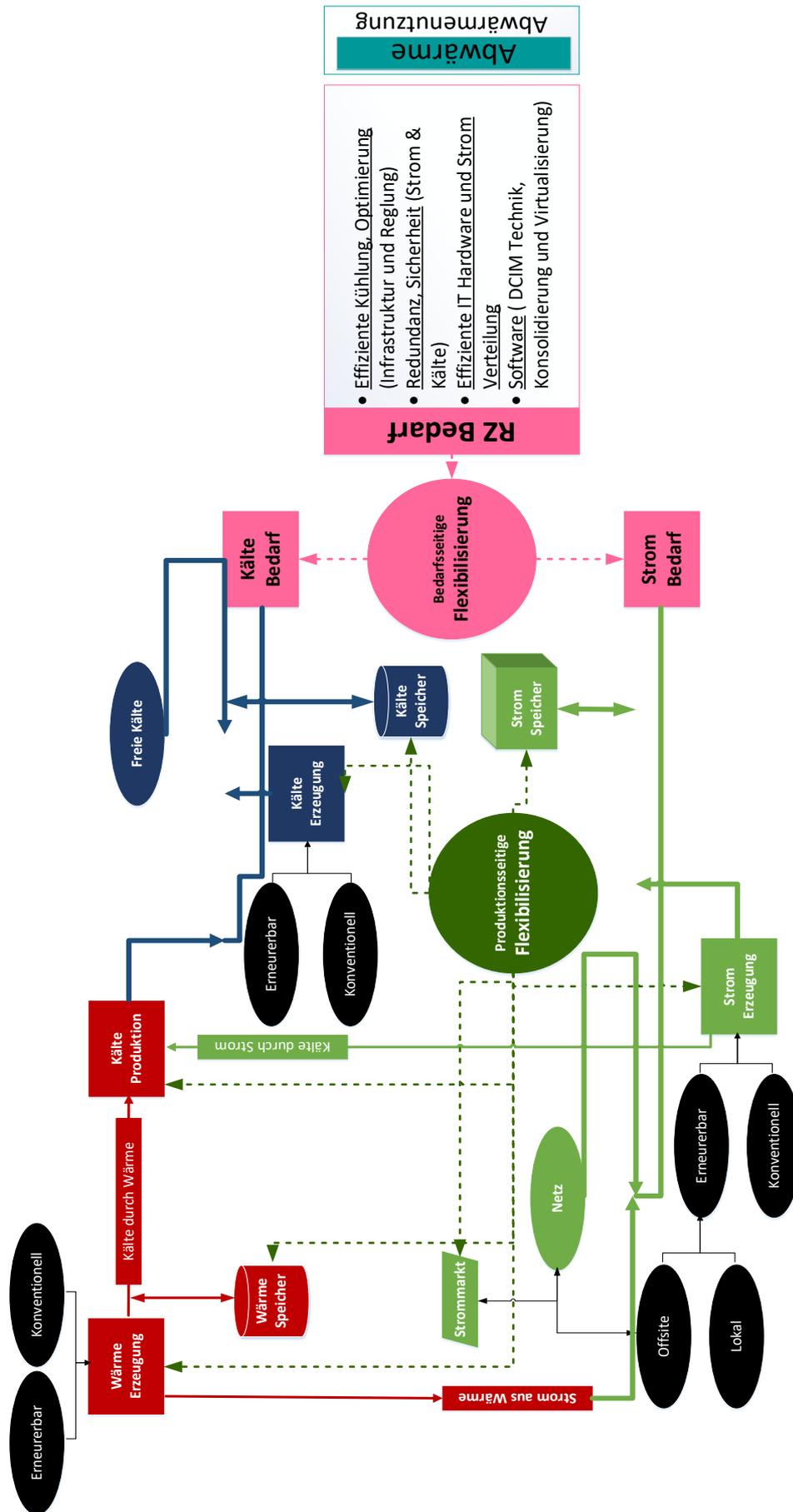


Abbildung 50: Überblick über die verschiedenen Möglichkeiten zur Flexibilisierung in Rechenzentrum

#### 4.2.2.2.1 Bedarfsseitige Flexibilisierung

Demand Side Management (DSM) ist eine Systemdienstleistung zur Bereitstellung von Regelenergie mit dem Ziel, die Frequenz im Stromversorgungsnetz bei 50Hz zu halten (WSW Wuppertaler Stadtwerke GmbH). Möchte ein RZ Regelenergie mit vorhandenen flexiblen Prozessen bereitstellen, so muss es aufgrund von Schaltsignalen Dritter, ohne vorherige Ankündigung, sofort die jeweiligen Prozesse An- bzw. Abschalten (WSW Wuppertaler Stadtwerke GmbH). Diese Regelenergieprodukte stellen teils hohe technische Anforderungen an die jeweiligen Prozesse. So muss beispielsweise bei einem Regelenergieabruf nach 30 Sekunden (PRL), 5 Minuten (SRL) bzw. 15 Minuten (MRL) 100 % der vermarkteten Regelleistung zur Verfügung stehen. Außerdem muss die vermarktete Regelenergie zu jedem Zeitpunkt des Vermarktungszeitraums vorgehalten werden. Erfüllt ein RZ nicht die technischen Anforderungen der jeweiligen Regelenergieprodukte, so können diese nicht über das DSM vermarktet werden. Durch die hohen technischen Anforderungen der Regelenergieprodukte sind bei weitem nicht alle flexiblen Industrieprozesse für DSM geeignet. Für flexible RZ, welche die technischen Anforderungen erfüllen, ist DSM jedoch eine sehr lukrative Möglichkeit, die jeweilige Flexibilität eines Prozesses zu vermarkten.

Anforderungen an das Demand Side Management:

- Alle technischen Überwachungs- und Steuerungsmechanismen für den Lastbedarf müssen vorhanden sein, um die Einhaltung eines Rahmenvertrages auf beiden Seiten überwachen zu können (SCADA-Lösung).
- Für Netzbetreiber und Kraftwerksbetreiber kann anstelle der Umverteilung als Alternative zur Netzstabilität als Gegenleistung für einen Ertrag zu einer Lastabschaltung vom Netz in EZ vertraglich ein nachfrageseitiges Management angeboten werden.
- Mindestens 5 MW Leistung und im Rahmen der Sekundärreserve (30 Sekunden bis 5 Minuten Aktivierungsdauer) und der Minutenreserve (5 Minuten bis 15 Minuten Aktivierungsdauer).
- Steuerbarkeit, d.h. kontinuierliche oder inkrementelle Regelung

Es gibt verschiedene Möglichkeiten für RZ am Demand Side Management teilzunehmen:

1. Strombörse: die Preise pro MWh für den Day-Ahead-Handel, d. h. den Handel für den nächsten Tag an den europäischen Strombörsen.
2. Für RZ größer als 20-30 MW können schaltbare Lasten im Sinne der AbLaV ab 5 MW (AbLaV 2017) vermarktet werden und ermöglichen so eine Entlastung des Stromnetzes durch die gezielte, ferngesteuerte Leistungsumschaltung ihrer Verbrauchsprozesse (schnell schaltbare Lasten: 15 Minuten Reaktionszeit). Dazu werden ihnen die Bereitstellung des Abschaltpotenzials (500 Euro pro MW und Woche) und zusätzlich ein separater Arbeitspreis (400 Euro pro MWh) für Abschaltbefehle gutgeschrieben.
3. Die am häufigsten verwendete Methode stellt der 'Regelenergiemarkt' dar, bei dem der Teilnehmer pro Zeitschritt entscheidet, ob er am Markt teilnehmen will oder nicht. Nach AbLaV gibt es sowohl einen Leistungspreis als auch einen Arbeitspreis. Der Teilnehmer bestimmt seinen Leistungspreis und Arbeitspreis und bietet seine Leistung täglich an und die Kaufentscheidung wird vom Übertragungsnetzbetreiber (TSO) getroffen.

Demand Response (DR) hingegen ist kein Systemdienst, sondern eine (freiwillige) Optimierung als Reaktion auf externe Signale, wie beispielsweise dynamische Stromtarife aus Spotmärkten.

#### 4.2.2.2.2 Produktionsseitige Flexibilisierung

Wesentliche Voraussetzung für einen flexiblen Betrieb elektrischer Aggregate im Rahmen eines Demand Side Management sind Zwischenspeicher, die zeitlichen Verschiebungen innerhalb eines Prozesses auffangen können. Zu Zeiten hoher Einspeisung erneuerbarer Energien und niedriger Nachfrage kann es zeitweise zu negativen Strompreisen kommen. Im gegensätzlichen Fall kommt es zu Zeiten niedriger Einspeisung erneuerbarer Energien und hoher Nachfrage zu sehr hohen Strompreisen.

#### 4.2.2.2.1 Kälte

Für die Kühlung der Server wird ein kaltes Medium benötigt, das entweder durch passive Nutzung der Außentemperatur im Winter oder aktiv durch Nutzung von Wärme oder Strom im Sommer bereitgestellt werden kann. Ein Maximum an Flexibilität wird durch die Nutzung der natürlichen Kühlung über die Außenluft oder mit Hilfe eines Gewässers oder der Geothermie erreicht. Beim Einsatz von Luft-Wasser Economisern kann in der Übergangszeit außerdem überschüssige Kälteenergie der Nacht durch einen Zwischenspeicher später in Zeiten hohen Bedarfs verschoben werden, so dass bestenfalls keine aktive Kälteerzeugung erforderlich ist. Im Sommer kann derselbe Speicher genutzt werden, um Kälte zu erzeugen und zu speichern, wenn erneuerbare Ressourcen oder billiger Netzstrom zur Verfügung stehen.

Mit Kältespeichern kann z.B. eine Kompressionsmaschine in Zeiträumen, in denen die Stromkosten günstige sind mit einem Einsparpotential von bis zu 25 % der Kühlkosten betrieben werden. Weiter können ebenfalls die Kühlpumpenbetriebskosten reduziert werden, wenn eine hohe Wärmelast vorhergesagt wird und der Server bereits vorher bei günstigen Strompreisen auf ein tieferes Niveau gekühlt wird. Eine ähnliche Flexibilität bietet auch die Wärme-Kälte-Produktion. Die Kälteerzeugung erfolgt mit einem bestimmten Durchfluss, Eingangstemperatur und Sollwerten. Wenn ein Kurz- oder Langzeitwarm- und Kältespeicher zur Verfügung steht, wirkt sich die schwankende erneuerbare Wärmeerzeugung und der schwankende Bedarf nicht auf die Erzeugung aus und die Kälteerzeugung kann unabhängig von den Bedarfsbedingungen auch nachts oder bei konstanter Last kostengünstig erfolgen.

#### 4.2.2.2.2 Strom

Die Strominfrastruktur in RZ ist deutlich sensibler als die Kälteinfrastruktur. Die zeitliche Verschiebung der IT-Lasten durch Software und IT-Arbeitslastverlagerung wird von der Universität Ulm analysiert. Alle großen RZ verfügen über eine NEA, die das Potenzial hat, über mehrere Stunden bis zu mehreren Tagen die Stromversorgung sicherzustellen. Des Weiteren ist in jedem RZ eine USV vorhanden, die in einigen Millisekunden aktiviert werden und üblicherweise 5 bis 30 Minuten lang Strom liefern kann.

Die Stromversorgung von RZ kann auf drei Arten erfolgen. Zum einen über das konventionelle Stromnetz (als Hauptanbieter oder Backup). Zum andere über erneuerbare Energien (als Hauptlieferant vor Ort, co-lokalisiert oder extern über das Netz) und über konventionelle Notstromaggregate (mit fossiler Energie oder erneuerbaren Brennstoffen). Darüber hinaus stehen erneuerbare Energiespeicher und USV-Backups, die auch als Beitrag zur Flexibilität genutzt werden können, zur Verfügung.

Die Backup-Infrastruktur ist meist vorhanden, unabhängig davon, ob es eine Netzverbindung oder eine Onsite-Produktion mit erneuerbaren Energien gibt. Dies könnte das Herzstück des Flexibilitätspotenzials auf der elektrischen Seite sein. Es ist jedoch zu beachten, dass nicht alle, vor allem kleine, RZ eine USV und zusätzlich eine NEA besitzen. Für diese RZ ist die USV das einzige Backup und es ist unwahrscheinlich, dass solche RZ diese Backup-Leistung für einen höheren Gewinn oder einen anderen Zweck als den eigenen einsetzen möchten. (Urgaonkar et al. 2011) hat gezeigt, dass auch die Verwendung dieser 5-30-minütigen Backup-Technologie dazu beitragen kann, die Preise für Spitzenleistungen von RZ zu senken. Für eine NEA werden in der Regel 24-72 Stunden Reserve-Generator-Kraftstoff bevorratet und es ist möglich diese zur Senkung der Spitzenleistung von Kühl- und Gebäudetechnik einzubeziehen. Der DIN 590 erlaubt 7 % Biodieselanteil in Dieselaggregaten und schreibt vor, dass mindestens alle 3 Monate der Kraftstofftank vollständig geleert wird und in der Folge der Kraftstoff erneuert und die Notstromversorgung getestet wird. Anstatt nach einem vorgegebenen Zeitmuster aktiviert zu werden, besteht jedoch die Möglichkeit die NEA so zu betreiben, dass sie mit der hochpreisigen Netzleistung harmonisiert oder, wenn eine Biogas-NEA verfügbar ist, diese dann betrieben wird, wenn der erneuerbare Anteil in der Netzleistung gering und demzufolge Strom teuer ist. Große und energieintensive RZ, die einen eigenen Bilanzkreis verwalten, können ihre flexiblen Lasten zumeist selbst vermarkten. Für RZ mit geringeren Lasten ist es sinnvoll, sich für die Vermarktung ihrer flexiblen Lasten bzw. Erzeugungseinheiten einem Lastenpool anzuschließen. Den Aufbau und die Vermarktung des Pools übernimmt in diesem Fall ein spezialisiertes Dienstleistungsunternehmen (Aggregator).

#### 4.2.2.3 Direktvermarktung – Power Purchase Agreement Offsite Lösungen

Ein Power Purchase Agreement (PPA), ist ein langfristiger Stromliefervertrag, der direkt (bilateral) zwischen einem Käufer (Stromabnehmer) und einem Verkäufer (Anlagenbetreiber) abgeschlossen wird (Huneke et al. 2018), (siehe Abbildung 51). Dieser Vertrag regelt die Lieferung einer Strommenge zu einem definierten Preis oder einem äquivalenten finanziellen Ausgleich. Das Profil der Strommenge muss dabei nicht unbedingt bekannt sein. PPAs bieten nicht nur dem Käufer, sondern auch dem Verkäufer zahlreiche Vorteile.

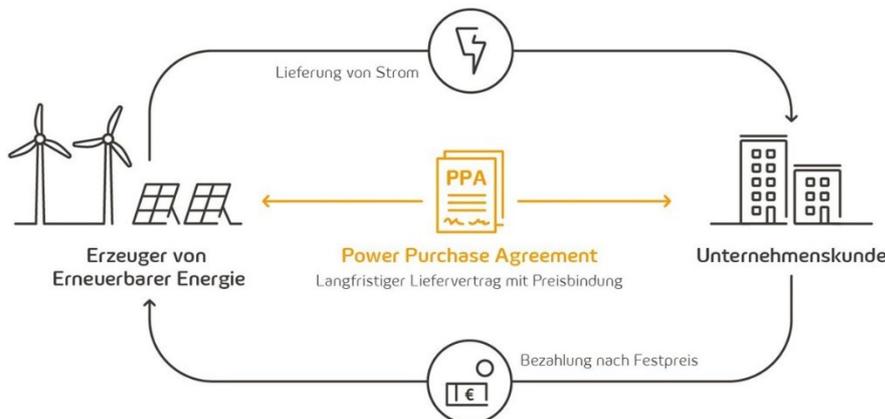


Abbildung 51: Schematische Darstellung eines PPA nach (Guttek)

Aus Sicht des Stromabnehmers (RZ) besteht der Vorteil darin, dass sie unabhängig von den variablen Strompreisen des Spotmarkts- und CO<sub>2</sub>-Kompensationsgebühren sind. Energieproduzenten wiederum haben durch PPAs einen gesicherten Profit und sind nicht auf den Day-Ahead- oder Spot-Marktpreise angewiesen. Da im Strompreis die Kosten für die angebotenen Dienstleistungen des Systemanbieters eingeschlossen sind, sind keine Vorabinvestitionen erforderlich, was die PPAs zusätzlich attraktiv und planbar macht.

##### 4.1.1.1.1 Alternative Marktmodelle in Deutschland

In Deutschland werden weitere Marktmodelle genutzt, jedoch ist bei diesen Modellen immer ein Stromanbieter zwischen Anlagenbetreiber und Kunde geschaltet. Dabei es auch möglich, dass ein Stromanbieter selbst Stromerzeugungsanlagen betreibt. Seit 2014 existiert z.B. das Grünstrom-Marktmodell (Abbildung 52). Mit diesem Modell können Stromanbieter ihren Kunden direkt grünen Strom anbieten. Hier wird an Stelle des EEG-Umlagen-Systems ein direkter Stromkauf von EEG-Anlagen möglich gemacht. Auf Jahresbasis soll in diesem Modell ein Teil des an den Kunden gelieferten Stroms aus Grünstrom bestehen (z.B.: 44 % EEG Anlagen und 31 % von fluktuierenden EEG Anlagen) (GreenpeaceEnergy). Im Grünstrom-Modell ist keine Strombörse erforderlich. Wenn bei einem Stromanbieter jedoch Überschüsse im 15 Minuten Zeitraum anfallen, kann er diese Überschüsse an der Strombörse verkaufen. Für diese Aktion fallen zurzeit jedoch 2 ct/kWh als Gebühren an. Eine detaillierte Studie zum Grünstrommodell wurde durch das UBA durchgeführt (GreenpeaceEnergy). In 2017 wurde im EEG eine verpflichtende Gebotsabgabe eingeführt, damit der EEG Strompreis für eine Anlage entscheidend wird.

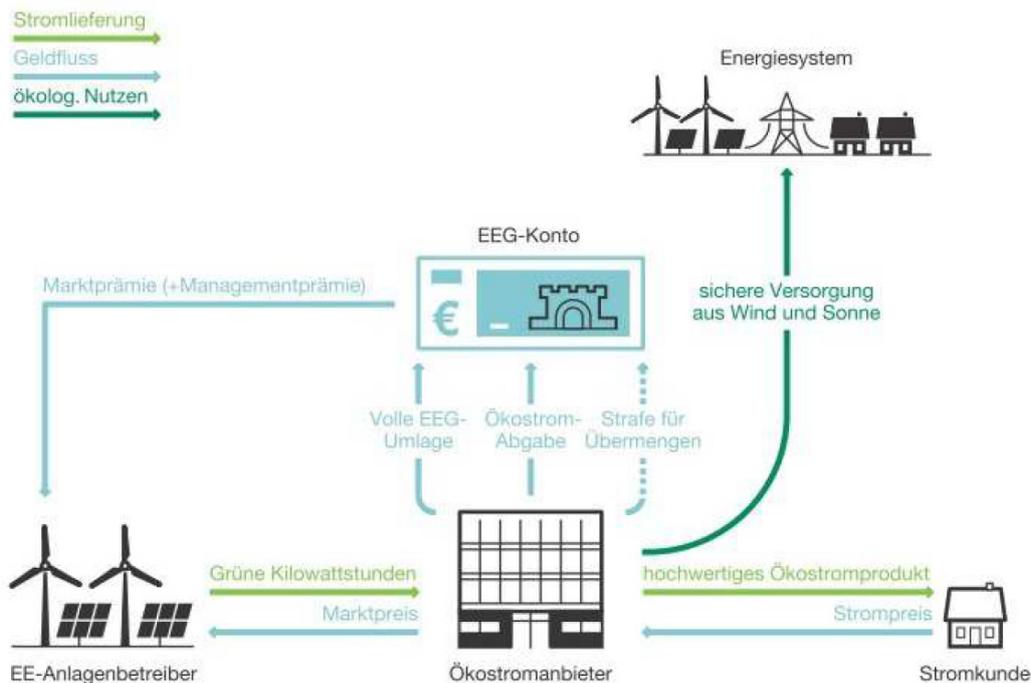


Abbildung 52: Grünstrom Marktmodell im Rahmen des EEG 2014 Gesetzes mit EE Direktvermarktung (Meunier 2014)

Weiter wurde mit dem EEG 2017 eine neue Kennzeichnungsoption für Strom aus regionalen EEG-Anlagen eingeführt. Dies gilt für jede Kilowattstunde Strom, die an Endverbraucher in der Region geliefert wird, die dafür eine Prämie in Höhe von 0.1 ct/kWh erhalten (EEG 2017: Die wichtigsten Änderungen 2016).

#### 4.1.1.1.2 Marktmodelle im Bereich Rechenzentren

Derzeit steigen zunehmend große IT Firmen wie Google, Apple und Microsoft in Off-Site/PPA (Power Purchase Agreements) ein und zeigen damit ihr Interesse an Erneuerbaren Energien. Ein einfacher Weg sind PPA Verträge, in denen IT Firmen Verträge mit EE-Kraftwerken schließen und damit die bezogene PV- oder Wind-Energie in die Energiebilanz des Rechenzentrums geht. Vorteil für die RZ ist, dass sie EE nicht lokal am RZ erzeugen, also als RZ keine Kraftwerke selbst bauen und betreiben müssen. Auch die zeitliche Bilanz von Erzeugung und Verbrauch spielt dann keine Rolle, da bei PPA nur jährlich bilanziert wird. Da jedoch erneuerbare Energie Kraftwerke über PV/Wind fluktuierend Energie erzeugen, werden weiterhin fossile Brennstoffe im Zeitraum ohne erneuerbare Produktion benötigt. In diesem Szenario steht die Belastung der Stromnetze durch RZ daher weiterhin in der Diskussion. CO<sub>2</sub> neutraler Strom, standortunabhängiger, erneuerbarer Strom, abgesicherte Preise und fehlende Anfangsinvestition sind jedoch klare Vorteile von PPA für die RZ Betreiber.

Energiesysteme unterschiedlicher Art können RZ verschiedenen Typs und Ausrichtung versorgen, z.B. wird Strom von Windkraftwerken im Norden Deutschlands in RZ in Stuttgart verbraucht. Die konventionelle Stromerzeugung ist als Backup über das Stromnetz verfügbar, so dass die Zuverlässigkeit von solchen Off-Site Systemen nicht entscheidend ist. Wegen der Möglichkeit von Netzausfällen sind jedoch immer noch Netzersatzanlagen (NEA) notwendig. Die Verbesserung des CO<sub>2</sub>-Footprint ist das wichtigste Motiv für den Abschluss von PPA Verträgen und das Verfahren ist ausgereift und einsetzbar.

#### 4.1.1.1.3 Case Studies

Bereits im Jahr 2009 hat Internet Villages International 400 MW PPAs im Süden Schottlands mit Wasserkraft-, Wind- und Biogaskraftwerken unterzeichnet und damit insgesamt 280.000 m<sup>2</sup> IT-Serverfläche mit Grünstrom zur Verfügung gestellt (Schwan 2009). Google hat den Net Zero Carbon Footprint im Jahr 2007 versprochen und 2017 auch nahezu über Abschlüsse von PPAs erreicht. Google unterzeichnete 2011 eine 20-jährige PPA für einen 114-MW-Windpark in Iowa, USA und zusätzlich eine

100 MW Windpark PPA in Oklahoma (Google 2013). In Schweden unterzeichnete Google in 2013 eine PPA mit einem 72-MW-Windpark, der ein RZ in Finnland mit Strom versorgen soll (Google 2013). Weiter hat Google in Texas für das Oklahoma RZ eine weitere 240 MW PPA für Windenergie unterzeichnet. Seit Februar 2017 plant Google den Bau eines Rechenzentrums in Schleswig-Holstein, das voraussichtlich Grünstrom in Form von PPA aus Windparks in Norddeutschland beziehen soll (Germany, Kiel, Schleswig-Holstein, Kieler Nachrichten). Im Jahr 2017 hat Apple 921 Millionen Dollar in Dänemark für ein RZ investiert, das ab 2019 zu 100 Prozent mit Grünstrom betrieben wird (Apple to build second renewables-powered data center in Denmark 2017). Facebook und Amazon beteiligen sich ebenfalls mit der Ankündigung von PPA-Investitionen für Windparks in Höhe von 200 MW in Texas und North Carolina im Jahr 2015 (Cleaning Up Data Center Power is Dirty Work 2015). Google allein hat 18 PPA-Verträge mit Energieerzeugern abgeschlossen, die 2,5 GW an erneuerbarer Energiekapazität ausmacht (davon ca. 500 MW in Norwegen) (New Windfarms to Power Google Data Centers in Europe 2016). Auch Microsoft hat an einem Windpark PPA in den Niederlanden teilgenommen (180 MW On-Shore) (Powering Ahead with Microsoft's Second Wind Project in Europe 2017).

Kleine RZ kaufen in der Regel Grünstrom von Stromanbietern, die wiederum von verschiedenen Erzeugungsanlagen Naturstrom kaufen.

#### 4.2.3 Zusammenfassung – Energie Technologie

Die erneuerbare Energieerzeugung erfolgt grundsätzlich entweder direkt als Strom oder über Wärme. Wird Wärme genutzt, gibt es die Möglichkeit, diese in Kälte oder in Strom umzuwandeln. Daneben kann erneuerbarer Strom in Gas umgewandelt und saisonal gespeichert werden. Die regenerative Wärmeengewinnung, maßgeblich Solarthermie und Biomasse, sind für Rechenzentren in BW von großem Interesse, da Biomasse- und Solarwärmepotential in BW durchaus vorhanden ist. Bei Biomasse besteht als einziger regenerativer Energiequelle die Möglichkeit, bedarfsgerecht erneuerbaren Strom zu erzeugen. Wasser und Wind sind weitere verfügbare erneuerbare Ressourcen, bei denen BW in der Energieerzeugung über Wasserkraft in Deutschland führend ist. Nachteilig für die RZ-Integration dieser beiden Technologien ist, dass Windenergie und Wasserkraft sehr standortabhängig sind. Universelle Lösungen liegen bislang nicht vor. Wind- und Wasserkraftanlagen zur Energieerzeugung für Rechenzentren sind daher vor allem über PPAs attraktiv. PV-Strom in großen Rechenzentren ist aufgrund der benötigten Fläche und der saisonalen Verfügbarkeit ebenfalls schwierig in die Energieversorgung von RZ zu integrieren. Als Quelle für direkt genutzte Kälte wurden die Außenluft, das Umgebungswasser, oberflächennahe Geothermie und Strahlungskühlung betrachtet. Da die Außenluftmöglichkeiten bereits im Teil "Effiziente Kühlung" tiefergehend analysiert wurden, wurde hier nicht näher darauf eingegangen. Geothermie zeigt ein höheres Potenzial als die Außenluft und demzufolge gibt es immer mehr Rechenzentren, die sich in Richtung, vor allem oberflächennahe, Geothermie bewegen. Abgesehen von komplexen Genehmigungsverfahren sind Gewässer eine sehr geeignete Kühlquelle. Die öffentlichen Gewässer wie Seen, Flüsse, Abwässer haben ein immenses Potential und mit vereinfachten Verfahren zur Genehmigung, könnte die regenerative Rechenzentrumswirtschaft in BW maßgeblich gefördert werden. Die Regenwassernutzung mit Speicherung kann sich als eine weitere effektive Methode in kleineren RZ erweisen, um den Wasserverlust in Nasskühltürmen zu decken und teilweise zur direkten Kühlung eingesetzt zu werden. Die Strahlungskühlung stellt eine neue Technologie dar, für deren Einsatz jedoch noch einige Jahre an Entwicklungszeit seitens der Kälteindustrie erforderlich sind.

Die thermischen und elektrischen erneuerbaren Erzeugungstechnologien mit Ausnahme der Biomasseverfahren erfordern Speicherlösungen, um die Flexibilität zu erhöhen und die Nachfrage mit der Erzeugung abzugleichen. Als thermischer Speicher ist die Verwendung von Wasser eine universelle und effiziente Lösung ohne umweltbelastende Folgen. Als Speicherung werden neben oberirdischen Tanks, unterirdische Speichermethoden analysiert, die in der Regel machbar, aber für RZ derzeit nicht wirtschaftlich sind. Darüber hinaus werden Latentspeicherverfahren mit Eis und PCM-Materialien zunehmend eingesetzt. Als neue Technologien werden Sorptionstechnologien untersucht, die sich jedoch noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium befinden und derzeit nicht in den RZ eingesetzt werden. Elektrische Speicher spielen eine entscheidende Rolle, da sie während eines Ausfalls des

Netzes und zur dezentralen Produktion benötigt werden. Wie für die USV sind auch für die regenerative Stromerzeugung die Speichertechnologien Kondensator, Schwungrad und Batterie möglich. Derzeit werden jedoch nur Batteriesysteme für die Speicherung erneuerbaren Stroms in Rechenzentren verwendet. Power to Gas wurde ebenfalls betrachtet, ist aber aufgrund der bisher niedrigen Gesamteffizienz und den hohen Kosten im Moment noch nicht realisierbar.

Für die Kälteerzeugung waren die Kompressionskältemaschinen bisher die erste Wahl für die konventionelle RZ-Kühlung, aber mit der zunehmenden Tendenz zur Flüssigkeitskühlung von Servern und mit steigender Zuverlässigkeit nimmt die Bedeutung der Ad- bzw. Absorptionskältetechnik am Markt zu. Eine weitere praktikable und wirtschaftlich interessante Technologie sind offene und geschlossene luftbasierte Sorptionssysteme, die ebenfalls analysiert wurden. Auch Fernkälte wird erörtert, die aber aufgrund ihrer eingeschränkten Anwendbarkeit in BW nicht vertieft wurde.

Die dezentrale Stromproduktion bietet derzeit nicht viele Alternativen, da die Brennstoffzelle und ORC für diese Zwecke noch nicht ökonomisch darstellbar sind. Stirlingmotor- und Dampfkraftwerke bieten praktisch keinen Ansatz, um sie in Rechenzentren in BW zu implementieren. Die herkömmliche Methode ist die Nutzung des Stromnetzes, was in den meisten Fällen auch umgesetzt wird. In anderen Fällen, in denen eine dezentrale Produktion wirklich notwendig ist, wurden bisher entweder Gasmotoren- oder Gasturbinentechnologien eingesetzt. Die Verwendbarkeit verschiedener fester oder flüssiger Brennstoffe und ihre Skalierbarkeit stellen einen Vorteil dieser Technologien dar. Auch für NEA sind diese Technologien weit verbreitet im Einsatz. Es wurde auch analysiert, wie die NEA für die Strommarktteilnahme genutzt werden könnte.

Ein Power Purchase Agreement ist bei weitem die derzeit beste und praktikabelste Option für die Nutzung erneuerbarer Energien in RZ. Für das Rechenzentrum entfallen die Verantwortung und der Aufwand für den Betrieb einer eigenen Anlage, es ist nicht notwendig, dass sich die Anlage in der Nähe des Rechenzentrums befindet und gleichzeitig erhöht sich der Anteil der erneuerbaren Energien. Allerdings ist zu erwähnen, dass dies keine Dauerlösung darstellen kann, da das zeitliche Gleichgewicht von Produktion und Nachfrage bei den PPA keine Rolle spielt.

Rechenzentren steht eine Infrastruktur zur Verfügung, um Flexibilität in Produktion und Nachfrage zu erreichen. Auf der Lastseite des Rechenzentrums sind verschiedene Energieeffizienzmaßnahmen wie effiziente Kühlung, effiziente IT-Hardware, IT-Lastmanagement (Software), Konsolidierung usw. Faktoren, die die Flexibilität erhöhen können. Redundanzsysteme wie Backup-Kühlsysteme, USV, Notstromaggregate können zu aktiven Komponenten der Energieflexibilisierung mit großem Potential werden. Eine weitere Form der Flexibilität ist die Virtualisierung der IT-Last durch geografische Verlagerung der RZ in Regionen in denen billiger erneuerbarer Strom verfügbar ist. All diese Maßnahmen können bereits in Bestands-RZ umgesetzt werden. Jedoch benötigt die Flexibilisierung der Produktionsseite zusätzliche Speicheroptionen, mit denen der erzeugte erneuerbare Strom und die aus Wärme oder Strom erzeugte Kälte gespeichert werden können. Hintergrund dieser Maßnahmen ist die Senkung der Energiekosten des RZ oder die Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien.

### 4.3 Abwärmennutzung

Einer der wichtigsten Faktoren zur Steigerung der Energieeffizienz von Rechenzentren ist die Abwärmennutzung, die Parameter wie Energy Reuse Efficiency (ERE) und Energy Reuse Factor (ERF) verbessert. Die Energieeffizienzoptimierung in Rechenzentren lässt sich in drei Maßnahmenpakete unterteilen: Effiziente IKT-Komponenten, effiziente Kühlung und Abwärmennutzung. Die Entwicklung bei Rechenzentren ist neben ihrer Größe auch mit der Entwicklung von Servern mit hoher Leistungsdichte verbunden. Vor 2010 verbrauchte ein Rack nur 6 kW aber mittlerweile gibt es Racksysteme auf dem Markt, die 25-35 kW verbrauchen und deren Leistung bis 2025 auf 50 kW erhöht werden soll (Emerson Network Power). Viele Mikroprozessoren im RZ haben eine Leistungsdichte von bis zu 100-200 W/cm<sup>2</sup> Prozessoroberfläche. Im Vergleich zu einem Induktionsherd mit 8 W/cm<sup>2</sup> (2000 W auf 18 cm Durchmesser) hat ein Intel Xeon E5-2699 v4 145 W auf 456 mm<sup>2</sup> Oberfläche oder 31 W/cm<sup>2</sup>. Damit weisen CPUs von RZ eine viermal höhere Leistungsdichte als eine Heizplatte auf (Cloud&Heat Blog 2016). Hinzu kommt die Abwärme aus Speicher, Festplatte, Verteiler und Netzwerk.

In der aktuellen Generation von RZ sind maximale Temperaturen für Serverkomponenten bis 85°C und von Festplatten im speziellen bis 45°C zulässig.

Eines der größten Probleme der Energieeffizienzsteigerung mit Hilfe der Abwärmenutzung in RZ stellt bisher die Tatsache dar, dass Rechenzentren in der Regel mit CRAC-Luftgeräten gekühlt werden. Daher steht Abluft mit höchstens 35-40°C zur Wärmerückgewinnung zur Verfügung, die nur vereinzelt direkt genutzt werden kann. Bei Servern mit extremer Leistungsdichte muss Kühlluft mit 15 °C zugeführt werden, so dass die Ablufttemperatur ca. 40°C beträgt (McAllister et al. 2008). Diese 40 °C Abluft überträgt ca. 10-15°C auf die Primärseite des Wasserkreislaufs. In der Primärseite wird das einströmende Kaltwasser von 15°C auf ca. 25-30°C erwärmt. Somit ist die zurückgewonnene Hochleistungswärme aufgrund ihrer niedrigen Temperaturqualität weniger wertvoll. Derzeit befinden sich wasser- oder andere flüssiggekühlte Server in der Entwicklung, die Abwärmeparameter bis zu 75°C mit geringeren Massenströmen ermöglichen. Die verschiedenen Kühlmöglichkeiten werden später spezifisch analysiert.

Abbildung 53 zeigt die unterschiedlichen Temperaturbereiche von Komponenten und Prozessen nach (Davies et al. 2016).

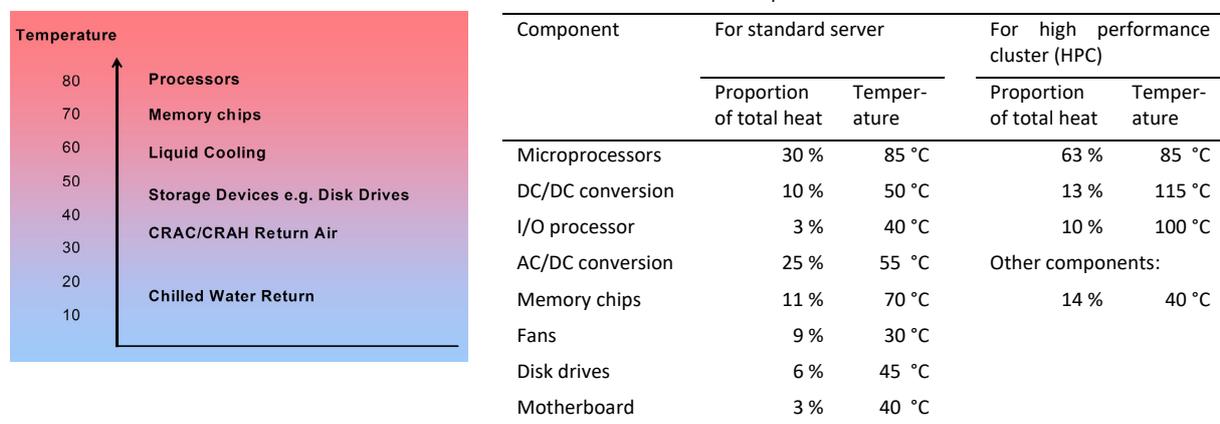


Abbildung 53: Typische Temperaturen verschiedener Komponenten und Prozesse in Rechenzentren (Davies et al. 2016)

Bei der Abwärmenutzung stellen der Standort des Rechenzentrums, die Investitionsbereitschaft, der Bedarf und der Eigenverbrauch von Wärme wichtige Faktoren dar. In der Regel verfügen große Rechenzentren in Deutschland über Betriebsräume und Personalbüros, die im Winter beheizt werden müssen und möglicherweise ganzjährig Warmwasserbedarf haben. In kleinen und mittleren, in Gebäude integrierte Rechenzentren, erhöht die Abwärmenutzung zur Gebäudeheizung und Warmwasserbereitung die Effizienz und kann die Endenergiebilanz eines Rechenzentrums deutlich verbessern. In Abbildung 54 sind die Rechenzentren nach Anwendung, Umgebung und Größe klassifiziert. Kleine und mittlere (50-250 kW) RZ, die in ein Gebäude integriert sind und von einem Unternehmen zur Eigennutzung betrieben werden, bieten somit Möglichkeiten zur direkten Nutzung der Abwärme. Große RZ (MW-Bereich) können entweder außerhalb oder innerhalb städtischer Gebiete liegen und in beiden Fällen kann die Nutzung von Abwärme zur Kälte- oder Stromerzeugung oder zur Kraftwerksintegration hinsichtlich der Effizienzsteigerung bedeutsam sein.

Aufgrund des schlechten Verhältnisses zwischen Abwärmeerzeugung und Verbrauchspotentials weisen große RZ ein geringeres Potential zur Eigennutzung von Abwärme auf. Dennoch können stadtnahe RZ möglicherweise als Einspeiser in ein Fernwärmenetz (z.B. über eine Wärmepumpe) integriert werden. Spezielle Wärmenutzer wie Hotels, Schwimmbäder, Industrie, etc. stellen ebenfalls Abnehmer für RZ-Anwärme dar. Für RZ im ländlichen Raum ist die Fernwärmeintegration schwierig, verbessert aber die Bereitschaft zum internen Einsatz der Abwärme über innovative Strom- oder Kälteerzeugungssysteme, wie z.B. Organic Rankine Cycle (ORC) Kraftwerke, Ab-, Adsorptionskälte- und

DEC- (Dessicative & Evaporative Cooling) Kühlungssysteme. In manchen Fällen kann die Abwärme die Erzeugung von Wärme höherer Temperatur unterstützen, wie z.B. bei den solarthermischen Anwendungen. Wenn RZ bereit sind, als Wärmeversorger aufzutreten, können Anwendungen wie die Vorwärmung für Kraftwerke, Entsalzung, Gewächshausbeheizung, Biomasse-Trocknung, Lebensmitteltrocknung usw. als Abnahmesektoren von Interesse sein.

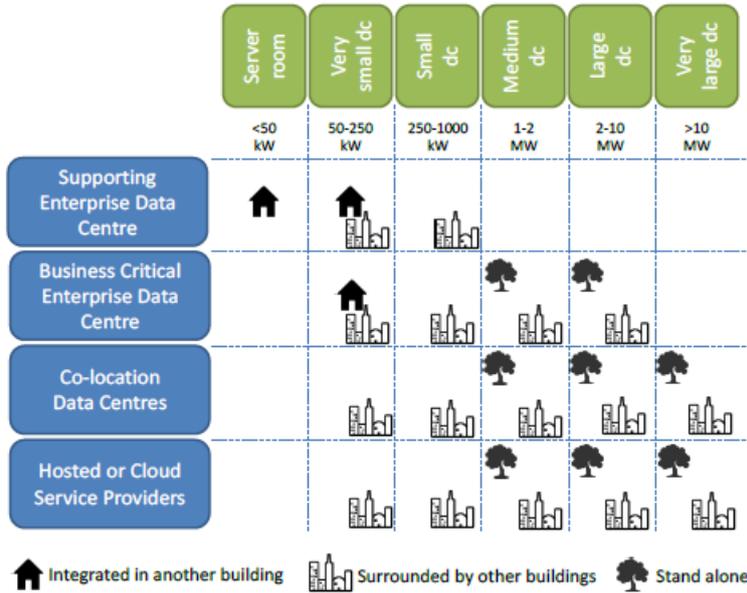


Abbildung 54: Klassifikation von Rechenzentren nach RenewIT (van der Ha und Nagtegaal 2014).

Während die Abwärme im Winter für verschiedene Anwendungen genutzt werden kann, ist es im Sommer meist notwendig, nach Wegen zur Entsorgung der Abwärme zu suchen (z.B. wenn es keine Industriepartner gibt, die im Sommer Wärmebedarf haben). Daher müssen immer Notkühlsysteme oder sekundäre Kühlsysteme in die RZ-Kühlung integriert werden. Aus wirtschaftlicher Sicht stellt die Investition in die Abwärmenutzung immer eine Zusatzinvestition dar, die über Einsparungen refinanziert werden muss. Obwohl die Nutzung der Abwärme aus energetischer Sicht sinnvoll ist, gibt es für RZ-Betreiber in diesem Bereich noch viele offene wirtschaftliche und organisatorische Fragen.

Wie in Abbildung 55 dargestellt, müssen RZ-Betreiber verschiedene Faktoren berücksichtigen, bevor sie sich für eine Form der Nutzung von Abwärme entscheiden. Gemäß (Grellen und Bieberbach 2015) hat Abwärme für die Fernwärmeintegration einen durchschnittlichen monetären Wert von ca. 30 €/MWh. Dafür müssen RZ-Betreiber jedoch hochwertige Wärme, d.h. auf hohem Temperaturniveau bereitstellen. Um diese hochwertige Abwärme zu erzeugen müssen die RZ-Betreiber aber höhere Investitionen tätigen, die dann zu geringeren Betriebs- oder Abwärmeentsorgungskosten führen sollen. In einigen Anwendungen kann es sinnvoll sein, zusätzliche Wärmespeicher für die Lastverschiebung zu installieren. Auch saisonale Speicher erscheinen interessant, jedoch gibt es bisher noch keinen günstigen und ausgereiften Lösungen. Bei Servern mit hoher Leistungsdichte entstehen zunehmend Wärmeabfuhrprobleme bei der Luftkühlung. Aus diesem Grund verlagert sich die IKT-Kühlungstechnik von der Luft- auf die Flüssigkeitskühlung auf Basis von Wasser-, Mineralöl-, Hybrid- (Flüssigkeit + Luft) und Phasenwechsel-Kühlung. Diese Entwicklung stellt im Hinblick auf die Abwärmenutzung eine Win-Win-Situation dar, da IKT-Komponenten effizient an ihrer Temperaturgrenze gehalten werden können und gleichzeitig nutzbare Abwärme auf einem höheren Temperaturniveau erzeugt werden kann. Aus Kundensicht ist die Abwärme aus einem RZ eine zuverlässige Wärmequelle und steht zu relativ geringen Kosten zur Verfügung.

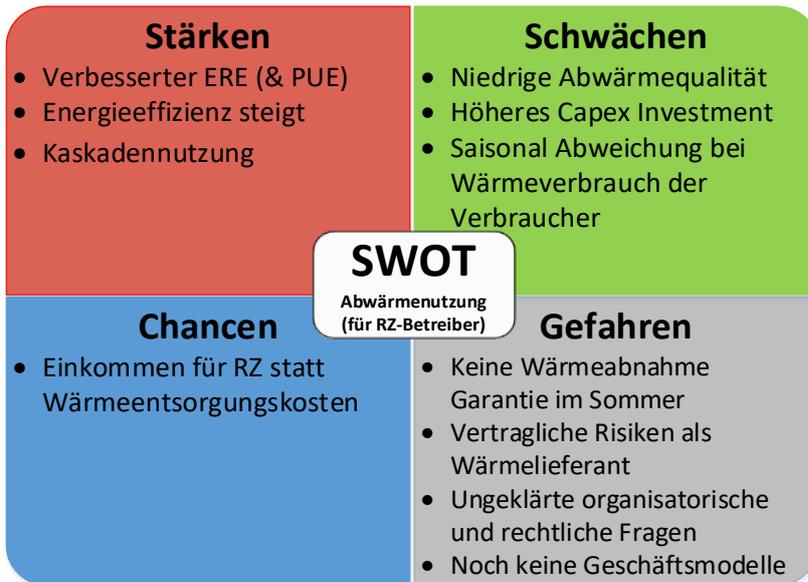


Abbildung 55: SWOT Analyse von Abwärmenutzung aus RZ-Betreibersicht

Im nächsten Abschnitt werden verschiedene Technologien zur Abwärmenutzung vorgestellt. Die Randbedingungen für jeden Fall werden mit Beispielen und SWOT-Analysen dargestellt. In Abbildung 56 sind im Überblick verschiedene Möglichkeiten der Abwärmenutzung nach der Art der Energienutzung unterteilt. Mit Abwärme kann über Absorptions- oder Absorptionssysteme Kälte für RZ erzeugt werden, die einen Teil des eigenen Kältebedarfs decken kann. Für die Stromerzeugung können entweder große Kraftwerke in Standortnähe betrieben oder kleine ORC-Anlagen mit geringerem Wirkungsgrad lokal integriert werden. Piezo- und Thermoelektrizität stellen noch keine ausgereifte Alternative für die RZ-Kühlung dar. Die Nutzung von Abwärme ist technisch einfach, hängt aber stark vom Temperaturniveau ab. Der Eigenverbrauch im Gebäude ist in vielen Rechenzentren möglich und darüber hinaus können verschiedene individuelle Anwendungen, wie in Tabelle 24 aufgelistet, eine vielversprechende Option darstellen. Darüber hinaus wird in diesem Kapitel die Einspeisung von Abwärme in die Wärme- oder Kältesysteme von KWK-, KWKK-Anlagen sowie Elektrizitätswerken und Heizkraftwerken analysiert.

In Abbildung 57 sind die RZ-Kühltechnologien nach der erforderlichen Abwärme- bzw. Antriebstemperatur dargestellt und in Tabelle 24 sind die Alternativen zur Abwärmenutzung nach Effizienz und erforderlicher Antriebstemperatur aufgelistet. Für jede Form der Abwärmenutzung gibt es Randbedingungen wie Leistungsbereich, Standort des Rechenzentrums und Art der Kühlung, die oben erläutert und in der Tabelle 25 zusammengefasst wurden. Um ihre Vor- und Nachteile aufzuzeigen, wurden SWOT-Analysen durchgeführt.

Tabelle 24: Liste verschiedener Abwärmeeanwendungen mit Wirkungsgraden und erforderlichen Betriebstemperaturen

Abwärmeeanwendung	Wirkungsgrad	Betriebstemperatur
Absorption	COP 0.4-1	Ab 70°C
Adsorption	COP 0.6-0.7	Ab 45°C
DEC Anlagen	COP 0.9 -1.5	Ab 60°C
ORC Anlagen	7-25 %	Ab 50°C
Kraftwerksintegration	1-2 % des Kraftwerks	Ab 70°C
Piezoelektrizität	1-2 %	Derzeit ab 90°C
Thermoelektrizität	3-6 % (15 % in Forschungsumfeld)	Derzeit ab 80°C
Gewächshaus	-	Ab 15°C
Schwimmbad	-	Ab 27°C
Trocknungsindustrie	-	Ab 30°C
Restaurant	-	Ab 60°C
Entsalzung	-	Ab 75°C
Quartiersversorgung	-	Ab 70°C Vorlauf
Wärmenetzintegration	-	Hoch – 75-90°C /55-65 °C Nieder – 65-75 °C/35-50°C
Eigenversorgung Gebäude	-	Fußbodenheizung - 35 °C Radiator - 50°C/70°C Warmwasser – 55°C

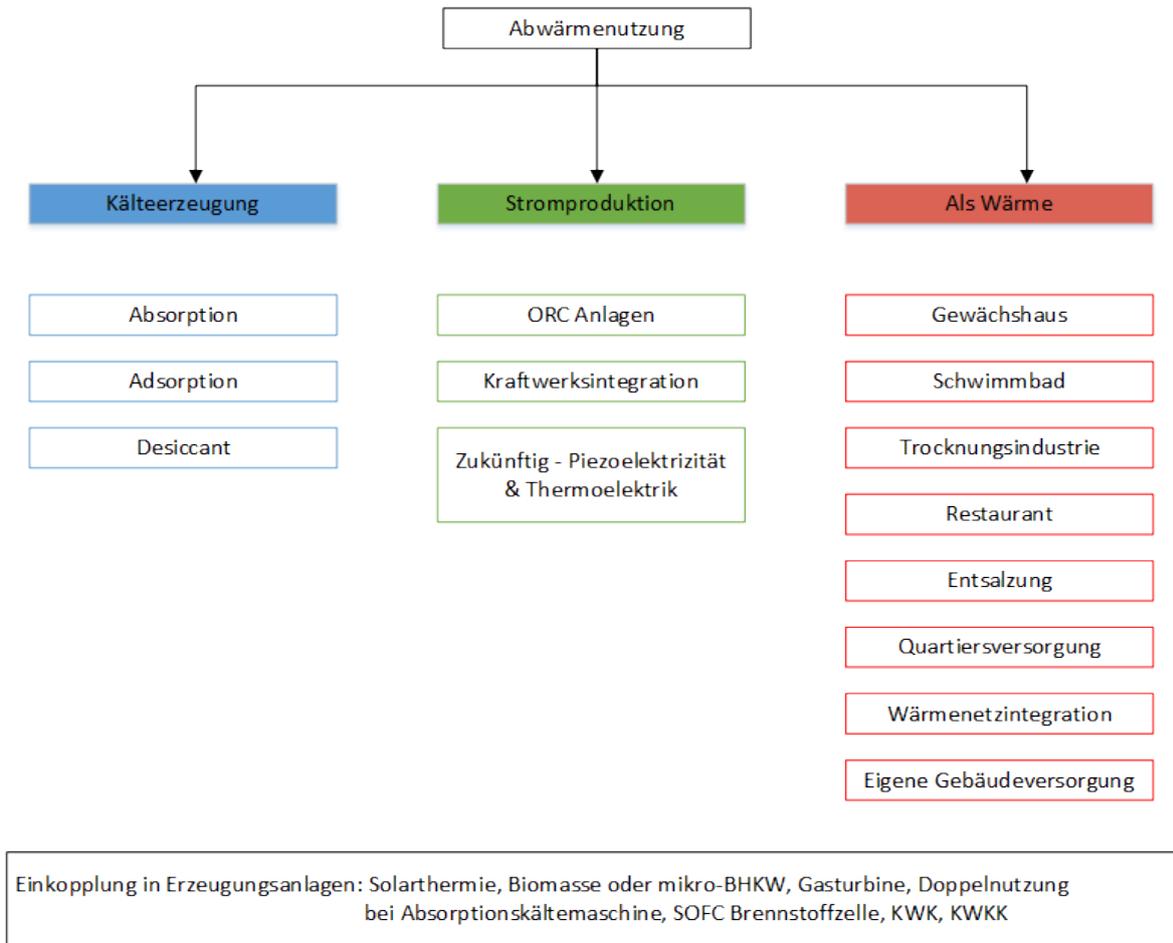


Abbildung 56: Überblick über Abwärmenutzungsmöglichkeiten bei RZ

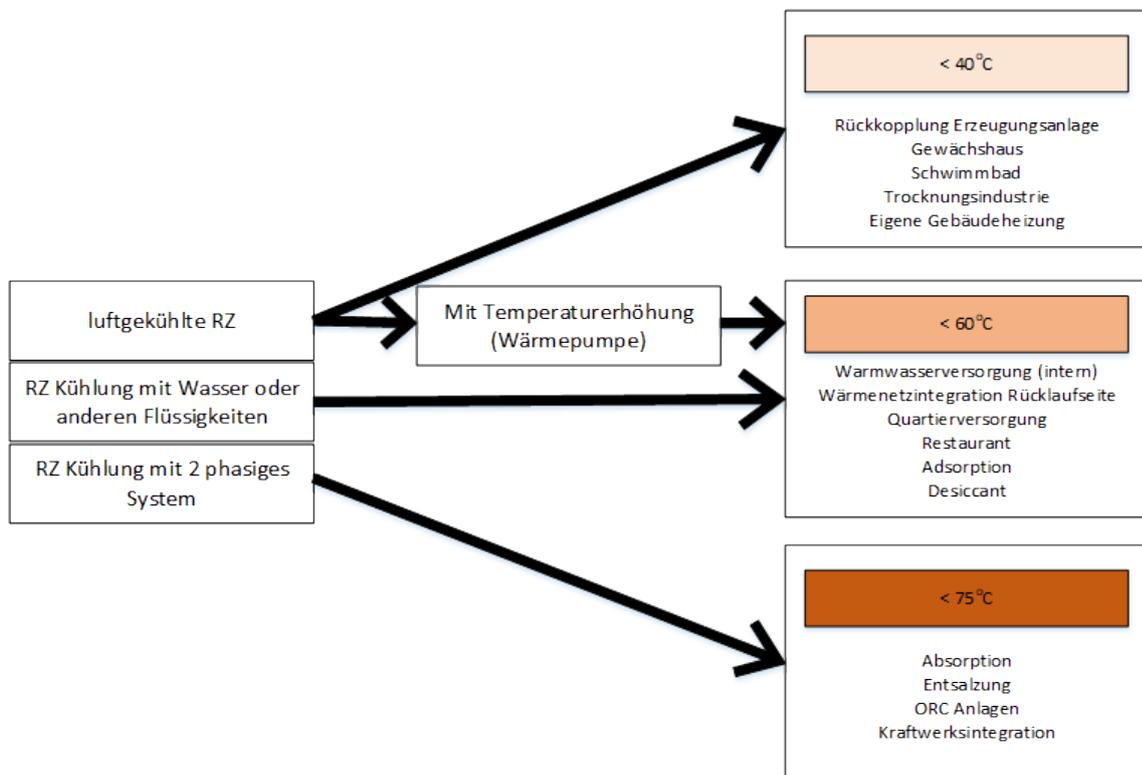


Abbildung 57: Überblick über Abwärmenutzungsmöglichkeiten mit verschiedenen Kühlmedien und Temperaturen

Zusammenfassend kann die Aussage getroffen werden, dass bisher keine eindeutigen Gewinner zu identifizieren sind, da die Entscheidungsfindung für oder gegen Abwärmenutzung und für die Wahl der geeignetsten Technologie durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst wird. Aufgrund der derzeitigen Ausführungen der RZ, mit Luftkühlung, niedrigen Server- und damit Abwärmeparametern etc. sind Sorptionssysteme und die Abwärmeintegration in Wärmenetze in den meisten Fällen am ehesten für die Abwärmenutzung von RZ geeignet. Die Sorptionskühlung kann jedoch in der Regel nur im Sommer betrieben und im Winter wird die Abwärme meist über einen Kühlturm abgeführt. Wärmenetzintegration kann im Winter sinnvoll sein, aber im Sommer dennoch eine zusätzliche Wärmeabfuhrmöglichkeit erfordern. Für RZ mit eigenem Wärmebedarf stellt die Eigennutzung eine gute Lösung, eventuell in Kombination mit Sorptionskühlung im Sommer, dar. Bei großen RZ kann die Quartierintegration eine Option sein, jedoch sind organisatorische und administrative Probleme zu erwarten und auch in diesem Fall kann Sommerüberschuss eine Wärmeabgabe an die Umgebung erforderlich machen. Die Kraftwerksintegration stellt eine relativ einfache Alternative dar, wenn der RZ-Strom durch ein Blockheizkraftwerk oder eine Gasturbine selbst erzeugt wird. Ein weiterer Ansatz besteht darin, das RZ neben einem Kraftwerk anzusiedeln, um Abwärme dort in dessen Wärmenetz einzuspeisen und direkt zu verkaufen. Organic Rankine Cycle (ORC) Prozesse können ebenfalls in vielen Szenarien eingesetzt werden, werden aber derzeit nur mit geringer Effizienz betrieben und können eine Option für die nahe Zukunft darstellen. Konstante, gleichmäßige Wärmeverbraucher wie Schwimmbäder, Gewächshäuser, Restaurants, Trocknungsbetriebe usw. sind sehr für die Abwärmenutzung von RZ geeignet. Solche Betriebe sind jedoch, nicht nur in Baden-Württemberg, selten in der Nähe von RZ angesiedelt.

Tabelle 25: Zusammenfassung von Abwärmenutzungsmöglichkeiten

Abwärmenutzung Anwendungen	Leistungsbereich			Standort		RZ-Kühlungstechnik		
	<100 kW	100-500 kW	>500 kW	In der Stadt	Auf dem Land	Luft	Wasser	2 phasig
<u>Absorption</u>	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
<u>Adsorption</u>	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
<u>Desiccant</u>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<u>Erzeugungsanlage Rückkopplung</u>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<u>Kraftwerk Integration</u>			✓		✓		✓	✓
<u>Organic Rankine Cycle Anlage</u>	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
<u>Wärmenetz Integration</u>	✓	✓	✓	✓		✓ Mit WP	✓	✓
<u>Wärmeversorgung Eigene Gebäude</u>	✓			✓	✓	✓ Mit WP	✓	✓
<u>Quartier</u>		✓	✓	✓			✓	✓
<u>Schwimmbad</u>	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓
<u>Gewächshaus</u>	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓
<u>Restaurant</u>	✓			✓		✓ Mit WP	✓	✓
<u>Trocknungs-Industrie</u>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

#### 4.4 Ergebnisse: Ausgewählte Szenarien für Simulationsstudie

In AP3 wurden einzelne Konfigurationen des Energiesystems analysiert und die für RZ am besten geeigneten Varianten identifiziert. Anschließend wurden verschiedene Kombinationen, die hinsichtlich des Einsatzes für die Simulationsstudien in AP4 sinnvoll erscheinen, vorgeschlagen. Die Kombinationen sind, über die Wahl des Kälteerzeugers ggf. mit freier Kühlung hinaus, in Verbindung mit Stromversorgung und Abwärmenutzung zu verstehen. Einzelne Technologien in jeder der Kategorien, die sich als sinnvoll erweisen, sind in der Abbildung 58 dargestellt.

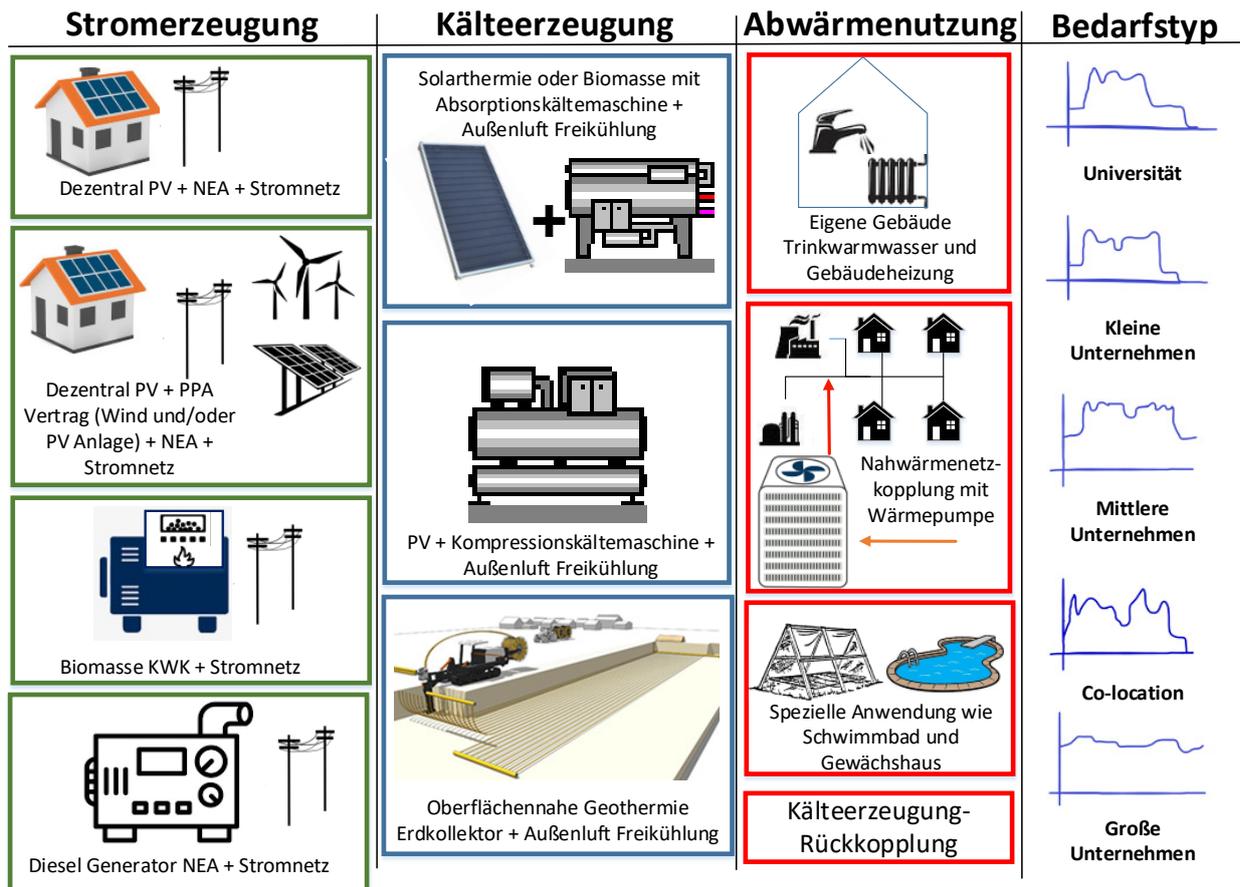


Abbildung 58: Energie System Szenarien für Simulationsstudie in AP4

Für den Bereich der Stromerzeugung scheint erneuerbare Energie im Rahmen der On-Site-Produktion über PV mit netzgestützter Sekundärversorgung für kleine Rechenzentren, in denen der Server mit Luft gekühlt wird und Kompressionskältemaschinen bereits vorhanden sind, aus technischer und ökonomischer Sicht am geeignetsten zu sein. Die Abwärmenutzung in solchen luftgekühlten Rechenzentren ist durch die relativ niedrigen Abwärmemetemperaturen auf die Eigennutzung in Gebäuden beschränkt (Trinkwasservorerwärmung und Niedertemperaturheizungsanwendungen) oder es muss über Wärmepumpen eine Temperaturerhöhung erfolgen, um die Wärme z.B. in ein Fernwärmenetz einspeisen zu können. Auch spezielle Anwendungen wie die Schwimmbaderwärmung oder in der Trocknungsindustrie sind denkbar. Da die dezentrale PV als erneuerbare Energie in großen Rechenzentren in der Regel aufgrund fehlender Flächen nicht ausreicht, um den Bedarf zu decken, sind Off-Site-Lösungen wie PV-, Wind- oder Wasserkraftanlagen zur Ergänzung des Energiebedarfs mit PPAs ein weiteres Szenario für Rechenzentren mit luftgekühlten Servern und Kompressionskältemaschinen.

Eine weitere erneuerbare Energieerzeugungstechnologie mit großem Potenzial ist die Biomasse-KWK, bei der die KWK zur Stromerzeugung und über thermische Kühlverfahren zur Kühlung genutzt werden kann. Die Kühlung durch Wärme kann entweder durch Absorptions- oder Adsorptionskälteerzeuger erfolgen. Bei niedrigen Temperaturniveaus wird in der Regel die Adsorptionstechnik bevorzugt, da im Falle von flüssiggekühlten Servern die Abwärme für die Kälteerzeugung zusammen mit der Wärme aus dem Biomasseheizkraftwerk genutzt werden kann. Wenn die KWK-Temperaturen hoch genug sind, um eine Absorptionskältemaschine zu betreiben, kann jedoch die Absorptionskältetechnik z.B. bei kleinen Aufstellflächen die bessere Wahl darstellen. Diese Szenarien sollen in Kapitel 5 genauer analysiert werden, um klare Aussagen treffen zu können. Bei wassergekühlten Servern und Adsorptionskältemaschinen, ohne Biomasse-KWK, kann Strom aus Offsite-Systemen und Solarthermie als zusätzliche Wärmequelle neben der Abwärme in Adsorptionskältemaschinen genutzt werden. Wie bei den bisherigen Kombinationen kann die Abwärme auch zur Integration in Fernwärmenetze dienen.

Ein weiteres bisher weitgehend ungenutztes Potenzial für die erneuerbare Kühlung in Rechenzentren ist die oberflächennahe horizontale geothermische Kühlung. Geothermie kann mit indirekter freier Kühlung kombiniert werden, um die Belastung der Geothermiefelder zu reduzieren und die Regenerationsfähigkeit des Erdreichs zu erhalten. In diesem Fall muss die Abwärme entweder abgeführt oder in ein Fernwärmenetz eingespeist werden, bevor die Serverraumwärme wieder an die mittlerweile regenerierten Erdwärmesonden abgegeben werden kann.

In diesem Kapitel wurde eine Liste der Szenarien aller identifizierten sinnvollen Kombinationen der einzelnen Technologien erstellt. In Zusammenarbeit mit den Partnern und Beiratsmitgliedern, wurden die vier vielversprechendsten Szenarien (siehe Tabelle 26) aus 14 mögliche Szenarien für die Simulationsstudie in AP4 ausgewählt. Das erste Szenario stellt sich wie das Status Quo (Referenz) Szenario mit konventioneller Kompressionskältemaschine in Verbindung mit Luftkühlung, aber inklusive Off-Site erneuerbarem Strom und spezieller Abwärmenutzung in einem Schwimmbad, dar. Das nächste Szenario beinhaltet den Einsatz einer dezentralen Bio-Erdgas-Kraft-Wärme-Kopplungsanlage, die Strom und Wärme erzeugt. Die produzierte Wärme wird in diesem Szenario während der Sommermonate mit einer Absorptionskältemaschine weiter genutzt, um Kälte zu erzeugen. Das System wird mit luftgekühlten Servern simuliert und mit wassergekühlten Servern verglichen. Im nächsten Simulationsschritt wird die Abwärme zur Selbstnutzung im Gebäude für Heizung und Warmwasser priorisiert. Die Restwärme aus der Kraft-Wärme-Kopplung wird dann in das Heizungsnetz eingespeist. Der wärme- oder stromgeführte bzw. nach dem erneuerbaren Anteil geführte Betrieb des KWK kann bei den Simulationsstudien berücksichtigt werden. Das dritte Szenario ist ein Erfolgsszenario aus Skandinavien. Ähnlich wie Szenario 1, aber mit dezentraler PV und Off-Grid-PPA für die PV zusammen mit der Integration einer Wärmepumpe zur Abwärmenutzung, die ebenfalls als Kälteerzeuger für das Kühlmedium des Rechenzentrums dient. Das letzte Szenario beschreibt die Nutzung von oberflächennaher Geothermie in Serie mit Nassfreikühler ohne Abwärmenutzung in Verbindung mit PPA für die Stromversorgung.

Tabelle 26: Liste der ausgewählten Szenarien für die Simulationsstudie in AP4

Szenario Nr.	Stromerzeuger	Kälteproduktion (+ Indirekte Außenluft Freie Kühlung)	Kältelieferung	Abwärmenutzung
1	(PV/Wind/Wasserkraft) Off-Site	Kompressionskältemaschine	Luftkühlung	Spezielle Anwendung (Schwimmbad/ Trocknungsindustrie)
2	Biomasse KWK	Absorption	Wasserkühlung	Selbstnutzung (Gebäude Trinkwarmwasser und Heizung)
3	PV + Netz	Kompressionskältemaschine	Luftkühlung	Wärmepumpe + Wärmenetzintegration
4	(PV/Wind/Wasserkraft) Off-Site	Oberflächennahe Geothermie	Luftkühlung	-

## 5. Technische Simulation und Bewertung der Ergebnisse

Auf Grundlage der in dem vorherigen Kapitel untersuchten Technologien wurden entsprechend der entwickelten Matrix, dargestellt in Tabelle 26, Szenarien entwickelt. Zu diesen Szenarien wurden technische Simulationen zur Betrachtung der Energieinfrastruktur (Strom, Wärme und Kälte) durchgeführt. Die Vorgehensweise und die Ergebnisse dieser Simulationen werden in diesem Kapitel beschrieben. Anschließend werden die Ergebnisse einer weiterführenden Untersuchung der Szenarien mit Fokus auf die Minimierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen dargestellt. Hieraus werden CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten und Strategien zur CO<sub>2</sub>-Reduktion ermittelt.

### 5.1 Auswahl der Simulationen

Im vorherigen Kapitel wurden die sich als sinnvoll erwiesenen Technologien in 14 Szenarien kombiniert. Zusammen mit den Projektpartnern und den Beiratsmitgliedern wurden aus diesen 14 Szenarien die 4 am sinnvollsten erachteten Szenarien ausgewählt. Um die Vergleichbarkeit der Szenarien zu gewährleisten, wurde zudem ein Referenzszenario erstellt. Dieses spiegelt den Status Quo der aktuell in Baden-Württemberg vorhandenen Rechenzentren wieder. In Tabelle 27 erfolgt eine Auflistung der in diesem Kapitel untersuchten Szenarien mit deren verschiedenen Eingangsparameter. Mittels vier Varianten des Referenzszenarios (Ref<sub>ohne\_fk</sub>, Ref<sub>fk<=9</sub>, Ref<sub>fk<=14</sub>, Ref<sub>fk<=14\_Zuluft<=25</sub>) wurde der Einfluss der Systemtemperaturen untersucht. Die Ergebnisse dazu sind in Kapitel 5.4.1 dargestellt. Die weiteren Szenarien (1-4) unterscheiden sich einerseits in ihrer Stromversorgung und andererseits in der gewählten Kälteproduktion. Bei dieser wurden neben dem ausschließlichen Einsatz einer Kompressionskältemaschine (KKM) auch der zusätzliche Einsatz einer freien Kühlung (fK) und alternativen Technologien untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in den Kapiteln 5.4.2 bis 5.4.5 aufgeführt. Die aus den Simulationen resultierenden PUE werden als Kennzahl für die anschließenden Vergleiche gewählt.

Tabelle 27: Liste aller ausgewählte Szenarien, die für die Simulationsstudie verwendet werden

Szenario Nr.	Stromversorgung			Abwärmenutzung			Kälteproduktion
	Netz	BHKW	anderes	WP	Wärmenetz (70 °C/90 °C)	explizit	
Ref <sub>ohne_fk</sub>	X						nur KKM ohne fK
Ref <sub>fk&lt;=9</sub>	X						KKM mit fK bis 9 °C
Ref <sub>fk&lt;=14</sub>	X						KKM mit fK bis 14 °C
Ref <sub>fk&lt;=14_Zuluft&lt;=25</sub>	X						KKM mit fK bis 14 °C + 25 °C Zuluft
1	X		PPA EE Offsite			Spezielle Anwendung (Schwimmbad/ Trocknungsindustrie @40 °C)	KKM mit fK bis 14 °C + 25 °C Zuluft
2a		X			X	Selbstnutzung (Gebäude TWW und Heizung @40 °C)	Absorption
2b	X	X			X	nur BHKW-Abwärme	KKM mit fK bis 14 °C + 25 °C Zuluft

Szenario Nr.	Stromversorgung			Abwärmenutzung			Kälteproduktion
	Netz	BHKW	anderes	WP	Wärmenetz (70 °C/90 °C)	explizit	
3a	X		eigene PV	X	X	RZ-Abwärme mit WP für Wärmenetz	KKM
3b	X	X		X	X	BHKW-Abwärme + RZ-Abwärme mit WP für Wärmenetz	KKM mit fK bis 14 °C + 25 °C Zuluft
4	X		PPA EE Offsite				Oberflächennahe Geothermie

## 5.2 Eingangsdaten der Simulationen

Für die technischen Simulationen wurden verschiedene Eingangsparameter gewählt. Dies sind das Wetter und das Lastprofil der IT sowie der Aufbau der Infrastruktur zur Bereitstellung der Kälte und der elektrischen Energie.

### 5.2.1 Wetter

Für die Simulation wurde das Wetterprofil der Meteonorm Stuttgart verwendet. Wie im Histogramm dargestellt beträgt an 5963 Stunden des Jahres die Temperatur weniger als 13 °C.

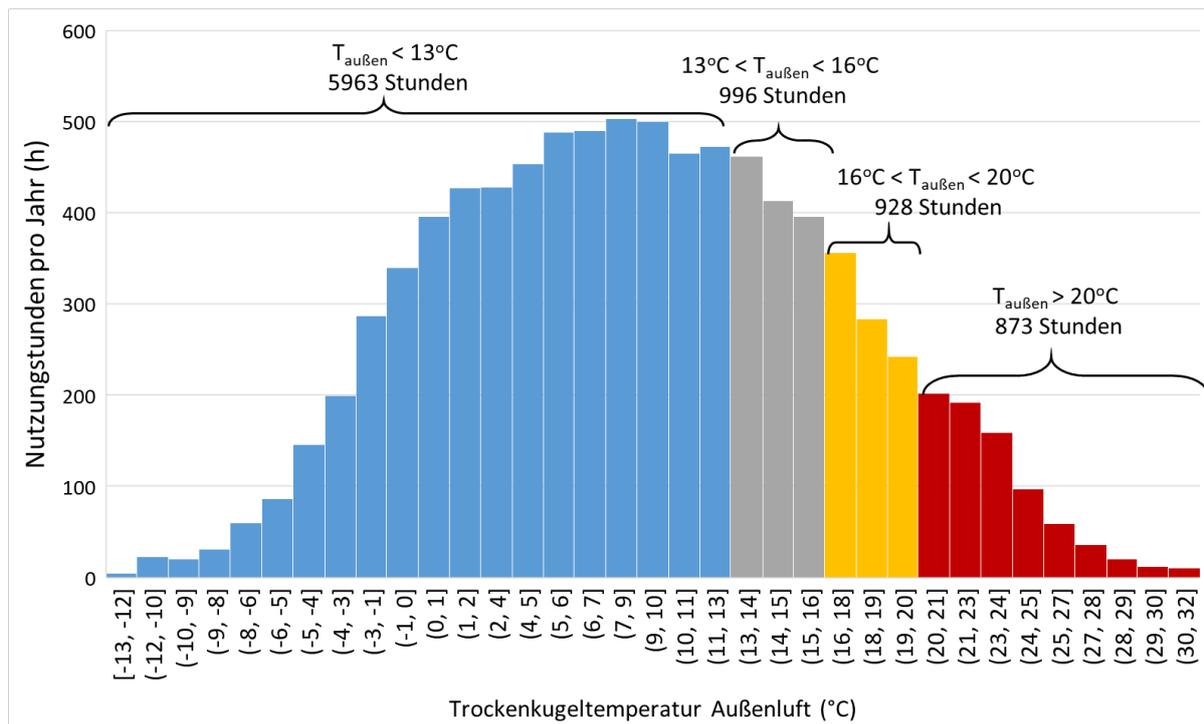


Abbildung 59: Histogramm der Außenlufttemperatur (trocken) - Stuttgart entsprechend Daten von Meteonorm

Dies entspricht 68 % des Zeitraums. In diesem Zeitraum wird klassischer Weise die freie Kühlung verwendet. In den restlichen 2797 Stunden ist dann eine Kompressionskältemaschine erforderlich. Dieses Verhältnis kann durch längere Nutzung der freien Kühlung verbessert werden. Bereits eine Erhöhung der durch die freie Kühlung genutzten Außentemperatur um 3 °C, resultiert in einem zusätzlichen Betrieb von 996 h. Dies entspricht weiteren 11 % des Jahres. Eine weitere Steigerung um 4 °C bringt zusätzliche 928 h bzw. 10,5 %. So dass nur noch in 873 h bzw. 9,9 % des Jahres die Kompressionskältemaschine genutzt werden muss. Der Effekt auf die nachhaltige Nutzung von Kühltechnologien wird im nachfolgenden Abschnitt untersucht.

### 5.2.2 IT Lastprofil

Zur Erzeugung eines IT Lastprofils eines 200 kW Referenzrechenzentrum wurde Messdaten der BW Cloud der Universität Ulm verwendet. Die Monitoringdaten wurden vom 23 kW RZ der BW Cloud für das Referenzrechenzentrum hochgerechnet. Es wurde eine Woche aus den realen Monitoring-Daten ausgewählt, mit der die Jahressimulation durchgeführt wurde. Wie in der Grafik unten in Abbildung 60 zu sehen ist, ist die Lastabweichung gering. Das angegebene Profil ist nur die IT-Last und entspricht 1.472 MWh pro Jahr.

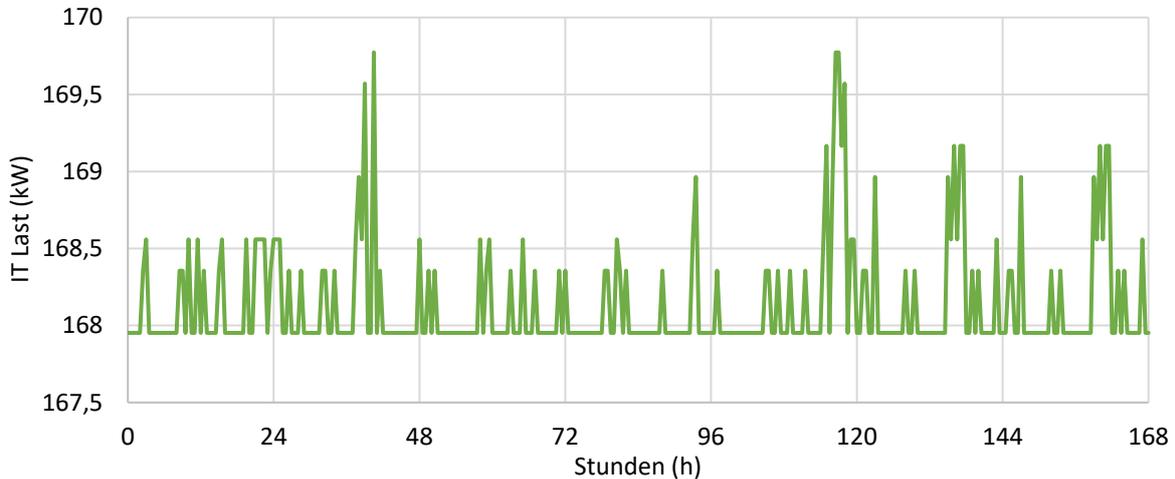


Abbildung 60: IT Leistungsprofil des BW-Cloud-RZ an der Universität Ulm (von 23 kW auf 200kW hochgerechnet)

Es ist vergleichbar mit den vorliegenden Lastprofilen der IT von zwei weiteren Rechenzentren. Exemplarisch ist in der folgenden Grafik das gemessene IT-Lastprofil eines der beiden RZ dargestellt. Die IT-Last schwankt dort selbst innerhalb einer Woche nur um etwa 5 %. Auf Grund der sehr individuellen Betriebsweisen der Rechenzentren wurden die gemessenen Profile nicht für die Simulation verwendet.

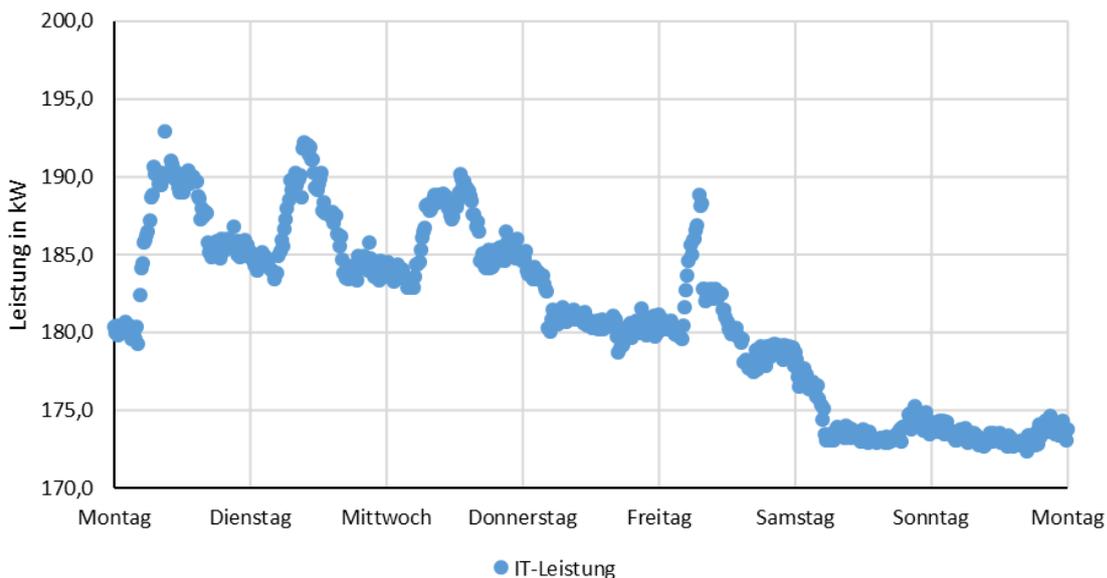


Abbildung 61: IT Leistungsprofil einer Woche eines RZ aus Baden-Württemberg (max. IT-Leistung von 200 kW)

### 5.2.3 System

Es wird beschlossen, das Referenzsystem mit trockener Freikühlung und Kompressionskältemaschine (KKM) für einen luftgekühlten Server zu simulieren. Die Simulation erfolgt mit TRNSYS. Der Trockenkühlturm ist so konzipiert, dass er die Kältemaschine umgeht, wenn die Bedingungen für die freie Kühlung (fk) erfüllt sind. Es ist bekannt, dass einige optimierte Rechenzentren die freie Kühlung im Sommer auch in Serie mit Kompressionskältemaschine verwenden. Um jedoch ein

durchschnittliches Rechenzentrum abzubilden, wurde ein einfacher Wechsel zwischen der KKM und der fK angenommen. Wenn der Kältemodus eingeschaltet ist, wird der Kühlturm über eine separate Pumpe mit einem zweiten Kältemittelkreislauf gekoppelt. Ansonsten verbindet die Hauptpumpe den Kühlturm direkt mit dem Gebläsekonvektor (Fan-Coil). Zwischen dem Gebläsekonvektor ist ein kleiner Puffertank (1 m<sup>3</sup>) angeordnet, um einen anderen Massenstrom in den CRAH-Kühlregister zu erhalten. Dieser ist für einen bestimmten Kaltwassereintrag und einen optimierten Massenstrom für eine optimale Wärmeübertragung im Gebläsekonvektor auf die Luftseite optimiert. Zu diesem Zweck wird eine Ventilsteuerung verwendet. Auf der Luftseite wird ebenfalls eine Ventilsteuerung eingesetzt. Sie stellt mit einer Temperatur von maximal 25 °C die Zuluft für den Serverraum bereit. Die Rücklauftemperatur aus dem Serverraum wird auf maximal 40 °C gehalten.

Im simulierten System sollte die wasserseitige Kaltwassertemperatur maximal 21 °C betragen, damit die Serverzuluft höchsten 25 °C warm ist. Die Temperaturdifferenz von 4 °C ist auf den Wirkungsgrad der Gebläsekonvektors, die Wärmeeinbringung der Pumpe und die Vermischung mit dem optimierten Massenstrom zurückzuführen. Es ist anzumerken, dass die Wärmeverluste in Rohren nicht simuliert wurden. Auch der Druckabfall und die Regelung der relativen Feuchtigkeit wurden nicht miteinbezogen.

Für das Referenzsystem mit dem angenommenen Trockenkühler konnte der Sollwert von 21 °C nur erreicht werden, wenn die trockene Umgebungstemperatur maximal 18 °C beträgt. Bei Nichterreichen des Sollwerts von 21 °C im Freikühlmodus wird die Kompressionskältemaschine eingeschaltet.

Diese und weitere in den anschließenden Unterkapiteln beschriebenen Annahmen sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 28: Übersicht relevanter Annahmen bzgl. des simulierten Systems

Kategorie	Parameter	Annahme
Freie Kühlung	Maximale Kühlleistung des Trockenkühlers	400 kW
	Vorlauf-/Rücklauftemperatur	40/35 °C
	Maximale Außenlufttemperatur	25 °C
	Maximaler Massestrom	68.000 kg/h
	Maximaler Massestrom im Freikühlbetrieb	35.000 kg/h
	Maximaler Massestrom im Betrieb über Kompressionskältemaschine	10.000 kg/h
	Maximale Bezugsleistung	30 kW
Kompressionskältemaschine	Maximale Kühlleistung	300 kW
	Solltemperatur des Kaltwassers	19 °C
Kälteübertragung	Wassereintrittstemperatur in die Gebläsekonvektoreinheit	21 °C
	Maximaler Massestrom der CRAH-Pumpe	35.000 kg/h
	Kühlleistung je Einheit (Insgesamt 6)	100 kW
Luftseite	Maximaler Volumenstrom	42.000 m <sup>3</sup> /h
	Verlust durch Verteilung	10 %
	Elektrische Leistung des Luftgebläses	6 kW
Elektrische Hilfsenergie	Massenstromabhängige Pumpenleistung	2 bis 6 kW
	Stromverteilung und Stromversorgung	5 %

### 5.2.3.1 Freie Kühlung – Trockenkühler

Der Trockenkühler wird mit einer Nennleistung von 400 kW (Auslegungsbedingungen: VL/RL-40/35°C, 25 °C Außenlufttemperatur und 68.000 kg/h Massestrom) und dem TRNSYS Typ 511 ausgelegt. Der Trockenkühler wird im freien Kühlbetrieb direkt mit der Hauptpumpe und einem Massenstrom von bis zu 35.000 kg/h betrieben. Im Kompressionskältemodus wird der Kühler mit einer Kühlkreislaufpumpe und einem Massenstrom von bis zu 10.000 kg/h mit dem Kühlkreislauf der Kältemaschine verbunden. Unter den Auslegungs-Randbedingungen verbraucht der Trockenkühler 30 kW elektrische Leistung. Dies entspricht einer Design-EER von 13,33.

### 5.2.3.2 Kompressionskälte – Kältemaschine, Hauptkreislauf & Regelung, Speicher

Eine Kompressionskältemaschine mit einer Nennleistung von 300 kW und einem Design-COP von 4,5 wird mit Typ 666 simuliert. Die Solltemperatur des Kaltwassers wird auf 19 °C festgelegt. Der Kaltwasserkreislauf wird durch einen 1 m<sup>3</sup>-großen Speicher vom CRAH-Wasserkreislauf getrennt.

### 5.2.3.3 Kälteübertragung – Fan-Coil Einheit, CRAH Pumpe und Regelung

Die CRAH-Gruppe verwendet ein Dreiwegeventil zur Einstellung der Wassereintrittstemperatur des Kühlwassers in die Gebläsekonvektoreinheit auf 21 °C. Der maximale Nennmassenstrom der CRAH-Pumpe beträgt 35.000 kg/h. Die Steuerung erfolgt proportional mittels des luftseitigen Ventils. Die Fan-Coil-Einheit ist aus 6 Einheiten vom Typ 124 mit je 100 kW Kühlleistung (66 kW sensible Kühlleistung) aufgebaut. Dies ergibt im Nennbetrieb eine Gesamtkapazität von 600 kW.

### 5.2.3.4 Luftseite – Kühlgebläse, Kälteverbrauch und Regelung

Der luftseitige Ventilator mit einem Volumenstrom von 42.000 m<sup>3</sup>/h versorgt den als Serverraum vorgesehen Typ 693 mit konditionierter Luft. Der Ventilator führt die erwärmte Abluft in Abhängigkeit der IT-Last entsprechend dem Lastprofil zurück. In der Regel wird für die Luftverteilung im Serverraum und am CRAH ein Verlust von 10 % angenommen.

### 5.2.3.5 Elektrische Hilfsenergie in der Kälteseite

Es wurde angenommen, dass jede Pumpe 2 bis 6 kW elektrische Leistung bei Nenndurchfluss in Abhängigkeit vom Massenstrom verbraucht. Des Weiteren wurde für den Trockenkühler 30 kW und dem Luftgebläse 6 kW veranschlagt. Der Verbrauch der PDU und USV wurde mit 5 % der IT-Last angenommen und so als elektrischer Hilfsbedarf in der Simulation einberechnet. Außerdem wird im Kompressionskältemodus der Stromverbrauch der Kompressionskältemaschine mitberechnet.

## 5.2.4 PV und Wind PPA

Es wird von der Verfügbarkeit von eines PV PPA und eines Windkraft PPA mit jeweils 500 kW<sub>p</sub> ausgegangen. Für eine einfache Berechnung wird vorausgesetzt, dass ein PPA in der Höhe des jährlichen Mindestverbrauchs vorhanden ist. Die zu Grunde liegenden Erzeugungsprofile sind in Abbildung 62 dargestellt. Sie wurden mit dem gleichen Wetterprofil der Meteonorm Stuttgart ermittelt, dass auch für die Rechenzentrumssimulationen verwendet werden (siehe Kapitel 5.2.1).

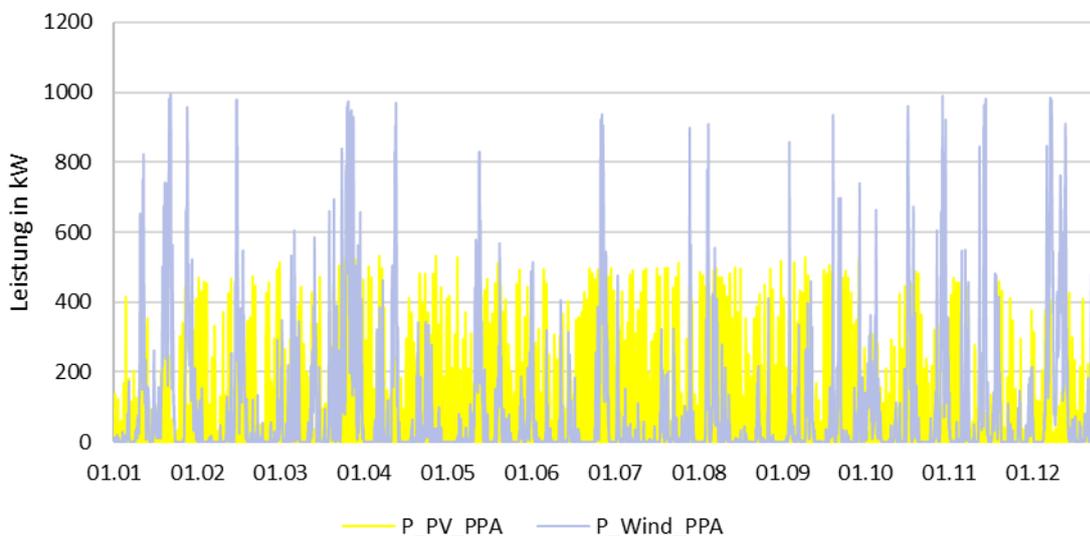
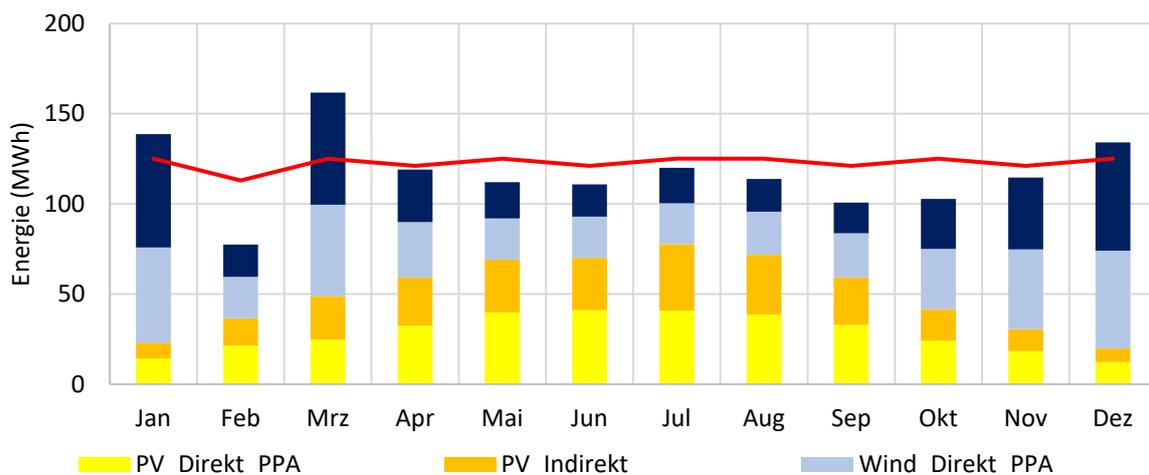


Abbildung 62: Erzeugungsprofile der simulierten PPA-Anlagen (jeweils 500 kW<sub>p</sub>)

Für eine komplexe PPA-Berechnung gibt es auch die Möglichkeit, dass ein höherer direkter Verbrauch bevorzugt wird. Daher wird eine Berechnung der direkten PPA und der indirekten PPA durchgeführt. Der restliche Bezug erfolgt vom allgemeinen Netz. Wenn die Erzeugung sowohl der Windanlagen als auch der PV-Anlagen mehr als 50 % der Last beträgt, dann tragen sie jeweils 50 % zur Last bei. Wenn einer davon weniger als 50 % und andere mehr als 50 % produziert, dann wird derjenige, der mehr produziert, als Beitrag zum Rest der Last genommen. Auf diese Weise beträgt für den Referenzfall der direkte PPA 50 %, der gesamte PPA 90 % und die restlichen 10 % werden über das Netz gekauft. Von den 1472 MWh IT-Strombedarf pro Jahr können so 577 MWh aus dem Solarkraftwerk und 758 MWh aus dem Windkraftwerk versorgt werden. 61 % des Solarstroms und 53 % des Windstroms werden direkt verbraucht (siehe Abbildung 63).

Abbildung 63: Monatlicher Beitrag von Wind- und Sonnenenergie als direkte und indirekte PPA zur Deckung des RZ-Strombedarfs (jeweils 500 kW<sub>p</sub>)

### 5.3 Potentialanalysen IT

Die im vorherigen Kapitel 4.1.3 beschriebenen IT-Technologien wurden im Hinblick auf ihr möglichen Potentiale untersucht. Die Annahme war, dass man mit deren Hilfe Prozesse sowohl zeitlich als auch räumlich verschieben könne. Dadurch sollten Flexibilitäten aufgezeigt werden, die zur Optimierung des Energiebedarfs genutzt werden könnten. Bei der genaueren Analyse der Technologien stellte sich heraus, dass es einerseits prozessbedingte Begrenzungen und andererseits noch administrative und technische Hürden gibt.

Zu den prozessbedingten Begrenzungen zählt, dass die Prozesse, die von Benutzern gestartet wurden, in der Regel interaktiv sind, wie zum Beispiel Web-Seitenzugriffe, Streaming-Dienste und Datenbankabfragen. Eine zeitliche Verschiebung dieser Prozesse würde zu einer Erhöhung der Responsezeit führen. Dies wäre jedoch kontraproduktiv für den Rechenzentrumsbetrieb, da dadurch die Zufriedenheit der Anwender sinken würde. Dem gegenüber stehen Prozesse die ggf. zeitlich verschiebbar sind. Dazu zählen zyklische Prozesse (z.B. Batchprozesse) und Jobs bei denen keine Interaktionen vom Anwender notwendig sind (z.B. Modellsimulationen). Die Verschiebung solcher Prozesse können in erster Linie zur verbesserten Auslastung der IT-Hardware dienen. Aus Erfahrungsberichten von den Projektpartnern ITEOS und der Universität Ulm zeigte sich, dass diese Potentiale bereits genutzt werden.

Der Energiebedarf eines Rechenzentrums kann auch durch andere Technologien beeinflusst werden. Hierzu zählen die Konsolidierung von Servern, wie zum Beispiel mittels Virtualisierungen bei denen die benötigten Serverkapazitäten verringert werden, und die Überbuchungen von Systemen. Bei einer Überbuchung werden Prozessen mehr Ressourcen zugewiesen als in Summe auf ein System vorhanden sind. Damit wird der Umstand ausgenutzt, dass Prozesse ihre zugewiesenen Ressourcen tatsächlich

nur in zu einem begrenzten Zeitraum und nicht dauerhaft benötigen. Des Weiteren kann die kurzzeitige Erhöhung der Prozessorleistung zur Optimierung des Betriebes genutzt werden. Dadurch können Prozesse auf der einen Seite schneller abgearbeitet werden. Dies führt aber zwar auf der anderen Seite zur kurzfristigen Erhöhung des Stromverbrauchs und des Kältebedarfs. Es kann aber durch eine geschickte Anwendung dieser Option in Verbindung mit der verstärkten Nutzung von effizienten Kältetechnologien den Gesamtenergieverbrauch senken und ein Flexibilitätspotential darstellen. Da diese Technologie bereits aktiv verwendet werden, wird davon ausgegangen, dass deren Restpotential für Optimierungen gering ist. Best Practices Beispiele sind im Kapitel 6.4 aufgeführt.

Die Konsolidierung von mehreren Rechenzentren unterschiedlicher Unternehmen ist in der Regel wegen administrativen Beschränkungen nur sehr begrenzt möglich. Dazu zählen Bedenken bezüglich Datenschutz und Sicherheit der Daten. Der Projektpartner ICT Facilities GmbH konnte dies mit seinen Erfahrungen bestätigen.

Bei der Verschiebung von aktiven Prozessen zwischen zwei Rechenzentren zur optimierten Auslastung der einzelnen stellte sich technischen Hürden heraus. Dazu gehören u.a. Probleme, die auftreten, wenn Prozesse den IP-Bereich wechseln. Diese Hürden wurden im Rahmen von Untersuchungen bei der BWCloud an denen die Universität Ulm mitwirkte deutlich. Dazu kommt der zusätzliche Bedarf an Energie und Datenübertragungskapazitäten. Für den Fall, dass sowohl die technischen als auch die administrativen Hürden beseitigt sind, wurden durch die Universität Ulm Prozesse zwischen Ulm und Freiburg verschoben (siehe Abbildung 64).

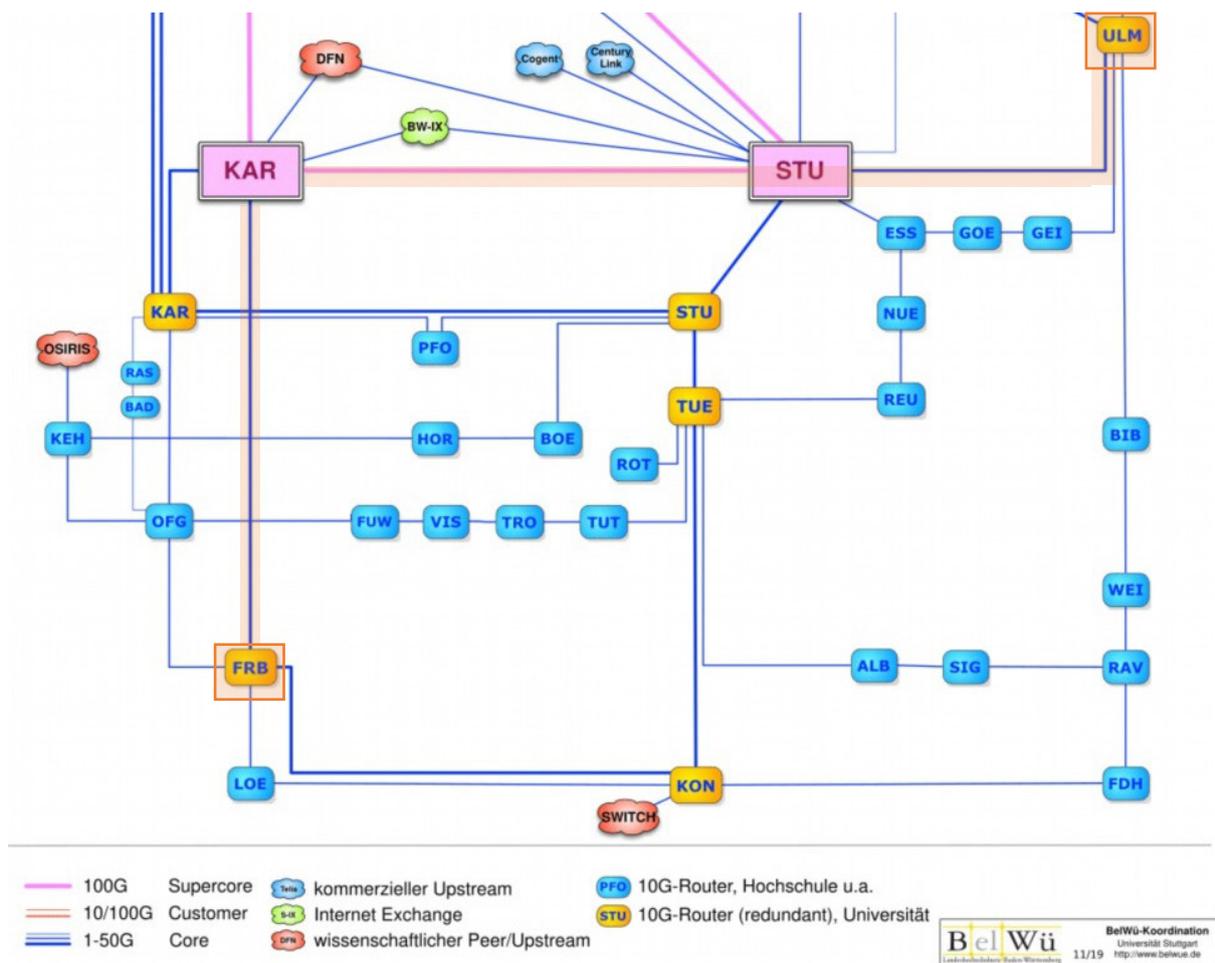


Abbildung 64: Übertragungstest innerhalb des BelWü-Netzwerks von Ulm nach Freiburg (orange markiert)

Zu Testzwecken wurden "dumps" (Dateien mit zufälligem Inhalt) in verschiedenen Größen (1GB, 2GB, 3 GB, 4 GB & 5 GB) verwendet. Die Größe der dumps entspricht etwa einer Datenbank einer kleinen Webanwendung. Es wurden jeweils 50 Messungen durchgeführt und die Gesamtübertragungsdauer

in Millisekunden gemessen. Die Bandbreite lag dabei zwischen 13 und 56 Sekunden. Diese gemessenen Verschiebungsdauern sind sehr hoch und können insbesondere bei größeren interaktiven Anwendungen nicht hingenommen werden. Da solche Verschiebungen nicht unverzüglich möglich sind, müssen die Datenbanken am ursprünglichen Ort solange vorgehalten werden, bis der Transfer abgeschlossen sind. Bei einem solchen Standortwechsel können verschiedene Probleme auftreten, wie z.B. "Packet-loss" auf der Übertragung und geändertes Routing. Auf Grund des hohen technischen Aufwands ist eine solche Optimierung des Rechenzentrumsbetriebs für kurzfristige Ziele nicht empfehlenswert.

Die globale Optimierung von Rechenzentren wurde auf Grund der aktuell bestehenden technischen Hürden nicht in den Simulationen betrachtet.

### 5.4 Simulation der Szenarien

Mit Hilfe des entwickelten Modells und den vorher beschriebenen Eingangsparametern wurden Simulationen entsprechend der ausgewählten Szenarien durchgeführt. Damit die Effizienz der in den Szenarien gewählten Technologien verglichen werden kann, wird jeweils der Leistungsfaktor ( $\epsilon$ ) berechnet. Formel 39 stellt das Verhältnis des Nutzens (Kühlleistung und/oder Wärmeleistung) gegenüber dem Aufwand (elektrische Energie und ggf. thermischer Energie) dar. Auf Grund der Berechnungsweise ist es umso besser je höher der berechnete Leistungsfaktor ist. Welche Energiemengen jeweils zur Berechnung verwendet wurden, wird in dem jeweiligen Kapitel beschrieben. Es findet nur eine einfache energetische und keine exergetische Betrachtung statt, da es eine große Bandbreite von möglichen Energiebezugsmöglichkeiten, die ein Berechnungsergebnis stark beeinflussen würden, gibt.

$$\epsilon_{RZ} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}}$$

Formel 39: Allgemeine Formel zur Berechnung des Leistungsfaktors (nach (Müller 2008; Chwieduk 2016; Zetzsche 2012))

Vergleichbar ist der Leistungsfaktor mit dem COP, der jedoch nur die Effizienz im optimalen Arbeitspunkt darstellt, wie z.B. in Tabelle 24 und in (Schäfer und Negele 2008).

#### 5.4.1 Ergebnisse Referenz RZ: Trockenfreikühler mit Kompressionskältemaschine

Für das Referenzszenario wurde ein traditionelles Rechenzentrum mit Kompressionskältemaschine (KKM) und Trockenfreikühler (FK) mit Netzstromversorgung simuliert. Das Szenario ist in Abbildung 65 dargestellt.

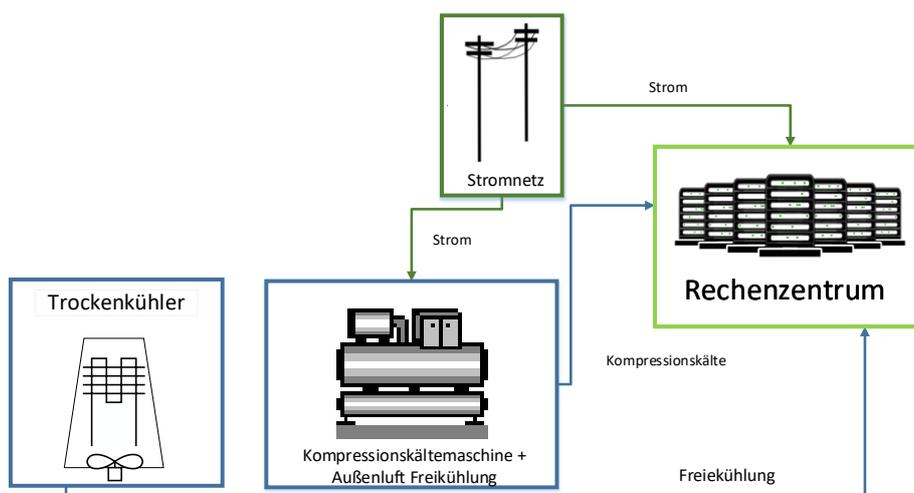


Abbildung 65: Energieflussschema des Referenz RZ Szenarios

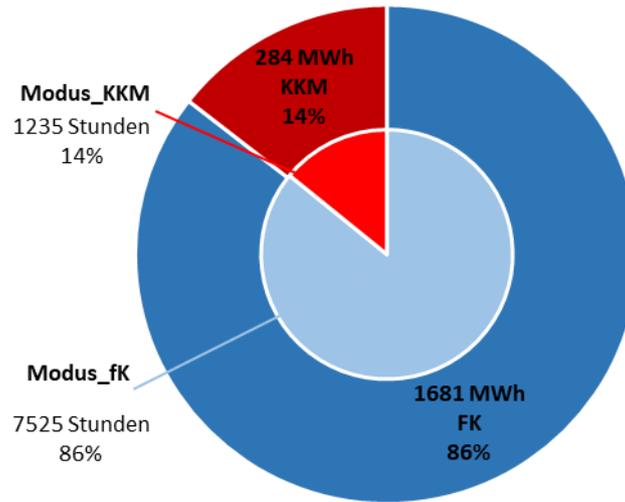


Abbildung 66: Anteil thermischer Energie und Betriebsstunden pro Jahr im jeweiligen Betriebsmodus im Referenz RZ

Die in Abbildung 66 dargestellte benötigte Kühlleistung beträgt etwa 130 % der IT-Last (1.472 MWh). 10 % entstehen durch Luftverteilungsverluste auf der CRAH-Luftseite. Weitere 20 % sind auf den Wärmeeintrag von Pumpen und Wärmeübertragungsverluste in Wärmetauschern und auf der Flüssigkeitsseite zurückzuführen. Im Referenzszenario wird 1.681 MWh Kühlleistung durch freie Kühlung (86 % der Last) und 284 MWh (14 % der Last) von der Kompressionskältemaschine beigesteuert. Der Freikühlungsmodus wurde 7.525 Stunden (86 % des Jahres) betrieben und die restlichen 1.235 Stunden mussten mit Kältemaschine gedeckt werden (14 % des Jahres).

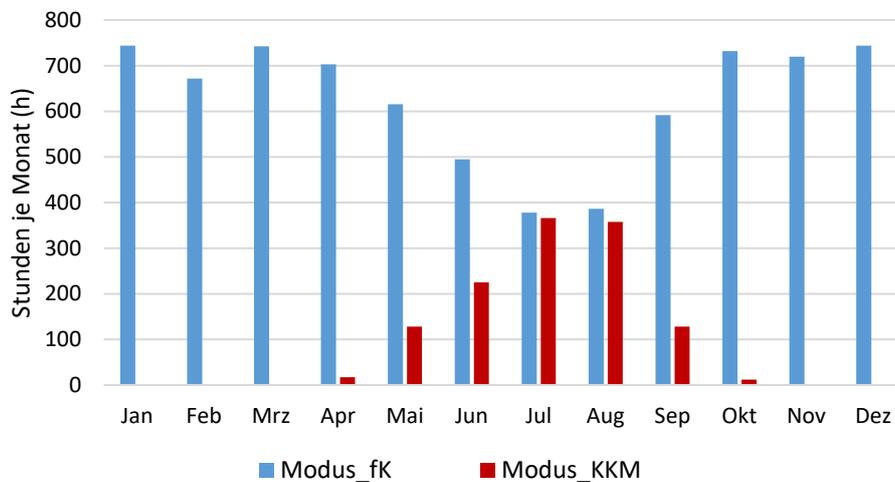


Abbildung 67: Betriebsstunden pro Monat je Betriebsmodus der Kälteerzeugung in Referenz RZ

Die monatlichen Betriebsstunden der beiden Betriebsmodi der Kühlung sind in Abbildung 67 dargestellt. Von Mai bis September wird hauptsächlich KKM betrieben und selbst in den heißesten Monaten Juli und Juni wird die fK in der Hälfte der Zeit eingesetzt.

In Abbildung 68 ist der Gesamtstromverbrauch für das Rechenzentrum dargestellt. Insgesamt werden 1.935 MWh Strom im Rechenzentrum verbraucht, jedoch davon nur 20 % für die aktive Kühlung und 74 MWh für PDU (Stromverteilung) und USV (Stromversorgung). Im rechten Diagramm der Abbildung 68 ist für die Kühlung der Stromverbrauch nochmals unterteilt. 126 MWh werden in den CRAH für die luftseitige Verteilung verbraucht. Weiter werden 166 MWh für die freie Kühlung benötigt. Für die freie Kühlung entspricht dies einem Leistungsfaktor von 10,15. Darüber hinaus verbraucht die KKM 95 MWh pro Jahr mit einem Leistungsfaktor von 3,0. Der Leistungsfaktor der gesamten Kühlung von diesem System einschließlich CRAH, Verlust und Hilfsenergie beträgt 5,1 entsprechend der Formel 40.

$$\varepsilon_{Ref_{fk\ 18^\circ C@25^\circ C-Zuluft}} = \frac{288\ MWh + 1681\ MWh}{95\ MWh + 166\ MWh + 126\ MWh} = 5,1$$

Formel 40: Berechnung des Leistungsfaktors für das Referenzrechenzentrum

Die PUE in diesem optimierten Referenzrechenzentrum beträgt 1,31. In diesem Fall wird kein spezieller Stromkaufvertrag angenommen und es wird angenommen, dass der Strom aus dem Netz bezogen wird. Der REF-Wert ist 0. Es wird weiter angenommen, dass keine Abwärmenutzung durchgeführt wird was einem Wert von 0 für ERF entspricht.

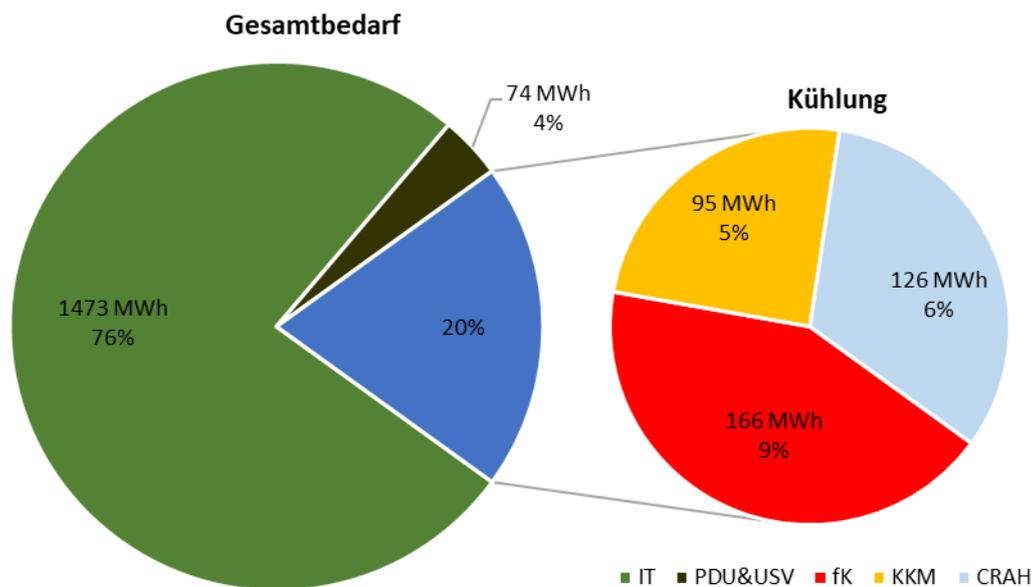


Abbildung 68: Jährlicher Strombedarf des Referenzrechenzentrum aufgeteilt nach Anlagenart

Dieses optimierte Referenz-Rechenzentrumssystem wird weiterhin für die Simulation anderer Szenarien verwendet werden. Zuvor wurden jedoch verschiedene Rechenzentrumsvarianten simuliert. Diese Varianten werden nicht im Detail beschrieben. Zusammenfassend lässt sich herausstellen, dass sich die PUE um 0,2 ändert, wenn die Zulufttemperatur von 20 °C auf 25 °C erhöht wird. Zudem lässt sich die PUE aufgrund von besser geeigneten Freikühlern um 0,1 verbessern. Ein kurzer Überblick über die Ergebnisse der verschiedenen Varianten des Referenzrechenzentrums, die in Tabelle 27 aufgeführt wurden, wird im Folgenden dargestellt:

- Ref<sub>ohne\_fk @20 °C-Zuluft</sub> Ohne freie Kühlung mit 20 °C Zulufttemperatur beträgt die PUE 1,7;
- Ref<sub>fk 9 °C@20 °C-Zuluft</sub> Bei freier Kühlung mit bis zu 9 °C Außenluft und mit nicht richtig dimensioniertem Trockenkühler und kleiner Fan-Coil-Einheit beträgt der PUE-Wert 1,57;
- Ref<sub>fk 14 °C@25 °C-Zuluft</sub> Ein verbesserter PUE-Wert von 1,43 wird erreicht, wenn die Freie Kühlung bis zu 14 °C Außenluft durch richtig dimensionierte Trockenkühler erfolgt und wenn die Zulufttemperatur von 20 °C auf 25 °C erhöht wird;
- Ref<sub>fk 18 °C@25 °C-Zuluft</sub> Mit der verbesserten Gebläsekonvektor-Einheit ist es möglich die freie Kühlung bis zu 18 °C Außenlufttemperatur mit einer PUE von 1,31 durchzuführen.

#### 5.4.2 Szenario 1 – PPA plus Abwärmenutzung mittels externem Abnehmer

In Szenario 1 (Abbildung 69) erfolgt die Kühlung des Rechenzentrums mit einer traditionellen freien Kühlung in Kombination mit einer Kompressionskältemaschine. Die Stromversorgung wird mit Grünstrom PPAs gedeckt. Die Abwärme wird zur Versorgung eines externen Abnehmers verwendet. In diesem speziell untersuchten Fall ist der externe Abnehmer ein Schwimmbad. Ohne die Abwärmenutzung im Schwimmbad ist dieses Szenario wie das Referenzrechenzentrum.

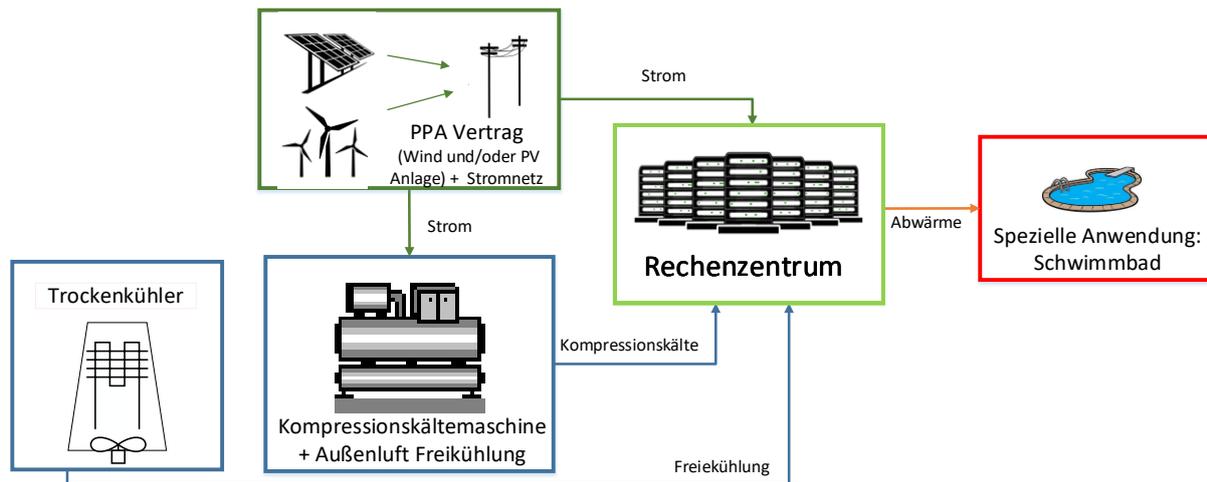


Abbildung 69: Szenario 1 Energieflussschema

Im Vergleich zum Referenzrechenzentrum ist die zusätzliche Abwärmenutzung der einzige Unterschied. Ein weiterer Gebläsekonvektor ist am Rückluftstrom der Serverlast angeschlossen, über den die Abwärme auf die Wasserseite übertragen wird. Dieses Wasser entspricht dem Medium des Nahwärmenetzes. Die Abwärmelast in dem Netz wird mit dem Typ 682 von TRNSYS simuliert. Für die Warmwassernutzung dient in diesem Szenario ein Schwimmbad.

Die Randbedingungen des exemplarischen Schwimmbads stammt aus der Literatur in Lünen (Peper und Grove-Smith 2013a). Dieses wurde im Passivhausstandard errichtet. Die fünf Becken haben eine Wasserfläche von 850 m<sup>2</sup> und ein Volumen von 1.489 m<sup>3</sup>. Die Gebäudefläche (Energiebezugsfläche) beträgt 3.912 m<sup>2</sup>. Dieses Schwimmbad benötigt 1.010 MWh Wärme pro Jahr (1.189 kWh/m<sup>2</sup><sub>Becken</sub>). Gemäß den Monitoring-Daten wird der Jahreswärmeverbrauch unter der Annahme einer aktiven Heizzeit von 8 bis 18 Uhr entsprechend Tabelle 29 in die monatlichen Verhältnisse aufgeteilt.

Tabelle 29: Aufteilung des Wärmeverbrauchs im Schwimmbad pro Monat (Von (Peper und Grove-Smith 2013b) adaptiert)

Monat	Wärmebedarfsanteil
Januar	12,1 %
Februar	10,8 %
März	10,8 %
April	8,1 %
Mai	7,0 %
Juni	4,5 %
Juli (Teilbetrieb)	4,4 %
August (Teilbetrieb)	3,6 %
September	7,3 %
Oktober	9,0 %
November	10,8 %
Dezember	11,6 %

Die Heizenergie wird unter Berücksichtigung der Umgebungstemperatur variiert. Während der Inaktivitätszeit wird davon ausgegangen, dass die Aufheizung auf 50 % reduziert wird. Die Solltemperaturen betragen für das Schwimmbecken 28-30 °C und für den Raum 24-28 °C. Die Eintrittstemperatur der Raumluft liegt zwischen 30-34 °C und die des Wassers bei 32-34 °C. Außerdem

werden die Übertragungsverluste an der Lieferseite (im Schwimmbad und Leitungen) mit 5 % definiert. Das Profil des Gesamtwärmebedarfs des Schwimmbads ist in Abbildung 70 dargestellt.

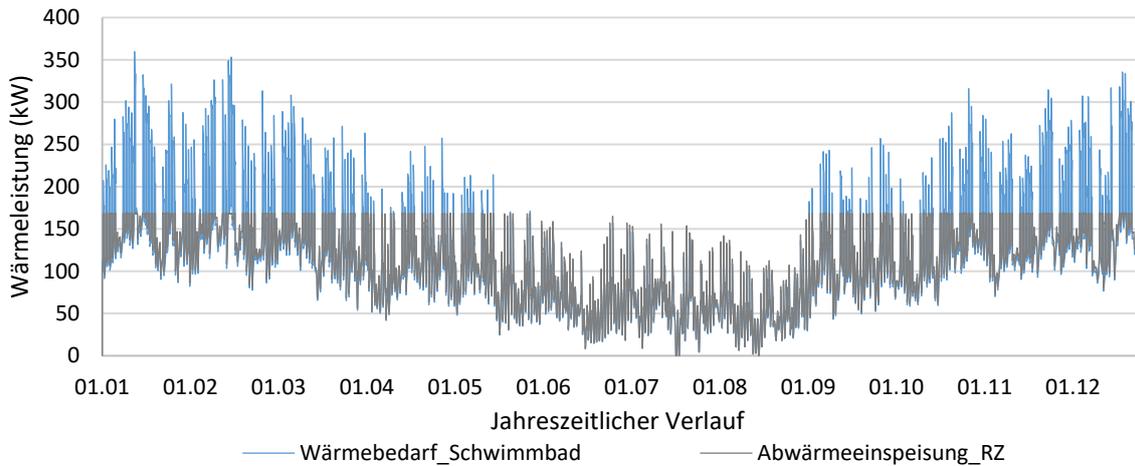


Abbildung 70: Jährlicher Gesamtwärmebedarf des Schwimmbads und die vom RZ gelieferte Wärme

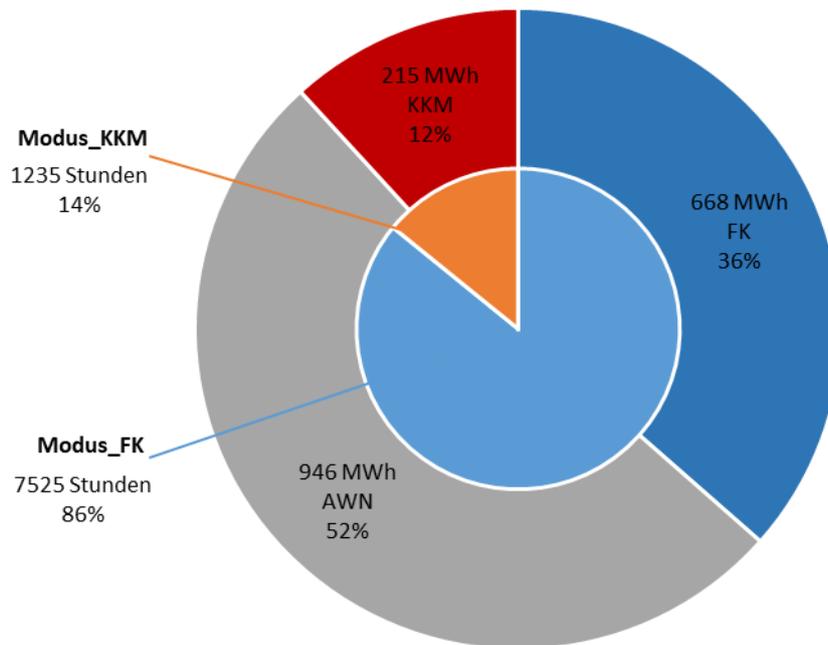


Abbildung 71: Thermische Energiemenge und Betriebsstunden pro Jahr der jeweiligen Kühlbetriebsmodi in Szenario 1

Aufgrund der Abwärmenutzung und der gleichzeitigen Kühlung, wie in Abbildung 71 dargestellt, leistet die durch Abwärmenutzung unterstützte Abluftkühlung 52 % des erforderlichen Kühlbedarfs. Bemerkenswert ist, dass der Gesamtkältebedarf ebenfalls um ca. 15 % reduziert wird. Dies liegt daran, dass 50 % der Wärme direkt luftseitig gekühlt wird. Das führt außerdem zu einer Reduktion des Wärmeeintrags von Pumpen und der Verluste bei der Wasser-Luft-Wärmeübertragung von der traditionellen CRAH Wasser-Luft-Einheit. Weitere 36 % des Kühlbedarfs werden durch freie Kühlung gedeckt. Daraus resultiert, dass die KKM nur für 12 % des Kälteenergiebedarfs betrieben werden muss. Es ist zu beachten, dass der Energieanteil der KKM nicht drastisch reduziert wird, da sich im Sommer der Schwimmbadheizenergiebedarf verringert. Der Beitrag der freien Kühlung mit Abwärmenutzung sinkt jedoch von 1.681 MWh im Referenz Szenario auf 668 MWh.

$$\varepsilon_{\text{Szenario 1}} = \frac{215 \text{ MWh} + 668 \text{ MWh} + 946 \text{ MWh (Kälte)} + 946 \text{ MWh (Wärme)}}{72 \text{ MWh} + 93 \text{ MWh} + 126 \text{ MWh} + 31 \text{ MWh}} = 8,6$$

Formel 41: Berechnung des Leistungsfaktors für das Szenario 1

Mit der Formel 41, entsprechend der Definition von Formel 39, wurde für dieses Szenario einen Leistungsfaktor von 7,2 berechnet. Hierbei ist zu beachten, dass als Nutzen sowohl die erzeugte Kühlleistung als auch die erzeugte Wärmeleistung einbezogen wurde. Grund für die Einbeziehung der Wärmeleistung ist, dass durch die gelieferte Wärmeleistung an das Schwimmbad der Primärenergieeinsatz dort signifikant reduziert wird. Dem gegenübergestellt ist die Summe an elektrischen Energiebedarf (siehe Abbildung 72).

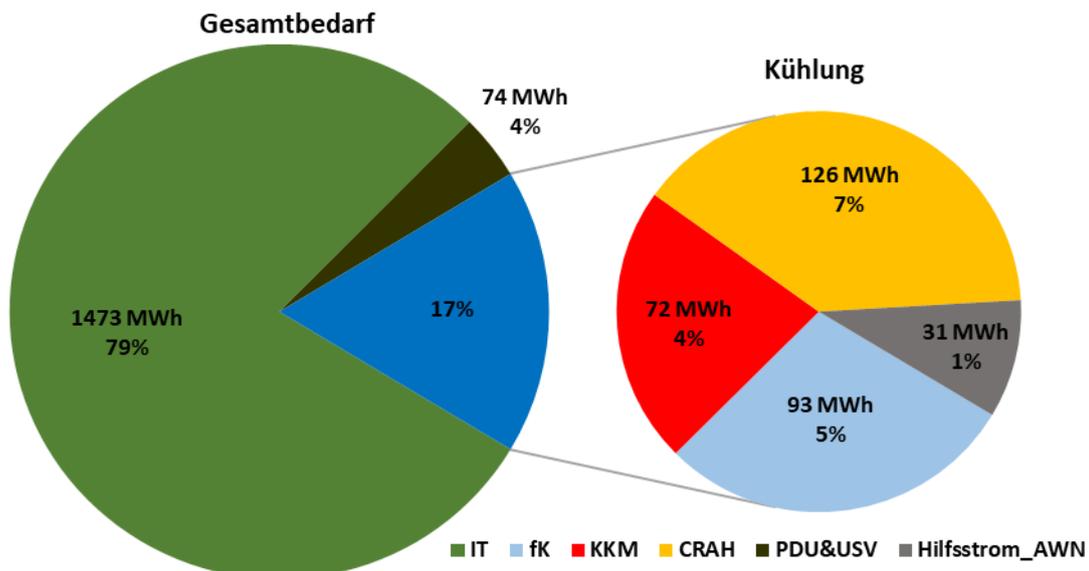


Abbildung 72: Jährlicher Gesamtstromverbrauch in Szenario 1

In Abbildung 72 ist zu erkennen, dass sich der Jahresstrombedarf (1.870 MWh) nur geringfügig um ca. 65 MWh verringert. Daher wird auch der PUE Wert des RZ nur marginal auf 1,27 reduziert. Die Bereitstellung von Wärme (Pumpenstrom) an das Schwimmbad wird in diesem Szenario als Hilfsstrom in die Berechnungen einbezogen. Der Heizbedarf des Schwimmbads kann zu 91 % (946 MWh) über Abwärme des RZ gedeckt werden. Für das Rechenzentrum entspricht dies einem ERF (Energy Reuse Factor) von 0,51. Mit 1.335 MWh aus Wind- und PV-PPA Stromlieferung erreicht das RZ einen REF nach Formel 31 von 0,8.

### 5.4.3 Szenario 2 – Bio-Erdgas BHKW mit Absorptionskältemaschine

Im zweiten Szenario wird, wie in Abbildung 73 dargestellt, ein Bio-Erdgas BHKW zur dezentralen Erzeugung von thermischer und elektrischer Energie im Rechenzentrum verwendet. Das System nutzt die entstehende Wärmeenergie aus dem BHKW, um mit Hilfe die Absorptionskältemaschine Kälte bereitzustellen. Die restliche vom BHKW erzeugte Wärme wird an das Wärmenetz verkauft. Die freie Kühlung erfolgt vorrangig mit dem verfügbaren Trockenkühler bei einer Außentemperatur von unter 18 °C. Wenn die Absorptionsmaschine Wärme benötigt, wird der für die Kühlung erforderliche Wärmebedarf zuerst gedeckt und anschließend die restliche Wärme an das Netz übertragen. Für das Wärmenetz wurde ein 90 °C/70 °C (Vorlauf/Rücklauf) Normaltemperaturnetz angenommen. Zudem wurde angenommen, dass das BHKW mit einer Zulauftemperatur von 70 °C ebenso 90 °C produziert. 90 °C wird auch als Vorlauftemperatur für die Absorptionskältemaschine verwendet. Für die Simulation wird ein Tendom Cento T200 Bio-Erdgas BHKW (Atlantic 2020) mit 200 kW elektrischer Leistung und 265 kW Wärmeleistung verwendet. Bei diesen Auslegungsbedingungen hat das BHKW einen elektrischen Wirkungsgrad von 39,2 % und einen thermischen Warmwasserwirkungsgrad von 54 %. Der Kraftstoffverbrauch beträgt 54 m<sup>3</sup>/h (entspricht ca. 510 kWh).

Das Warmwasser des BHKWs wird für den Betrieb einer heißwasserbetriebenen, einstufigen Absorptionskältemaschine mit 211 kW und einem COP von 0,8 bei 90 °C im Nennmassenstrom genutzt. Der Sollwert des Kaltwassers wird wie bei der Kompressionskältemaschine auf 19 °C gehalten. Abgas-Absorptionskältemaschinen sind aufgrund höherer Antriebstemperaturen effizienter in der

Kälteerzeugung und erhöhen zusätzlich über die Abgasnutzung den gesamten BHKW-Wirkungsgrad. Sie besitzen in der Regel einen COP von 1,3. Aufgrund der Standortintegration des BHKWs und der Einspeisung der Restwärme in das Fernwärmenetz wird diese Technologie in Szenario 2 jedoch nicht betrachtet.

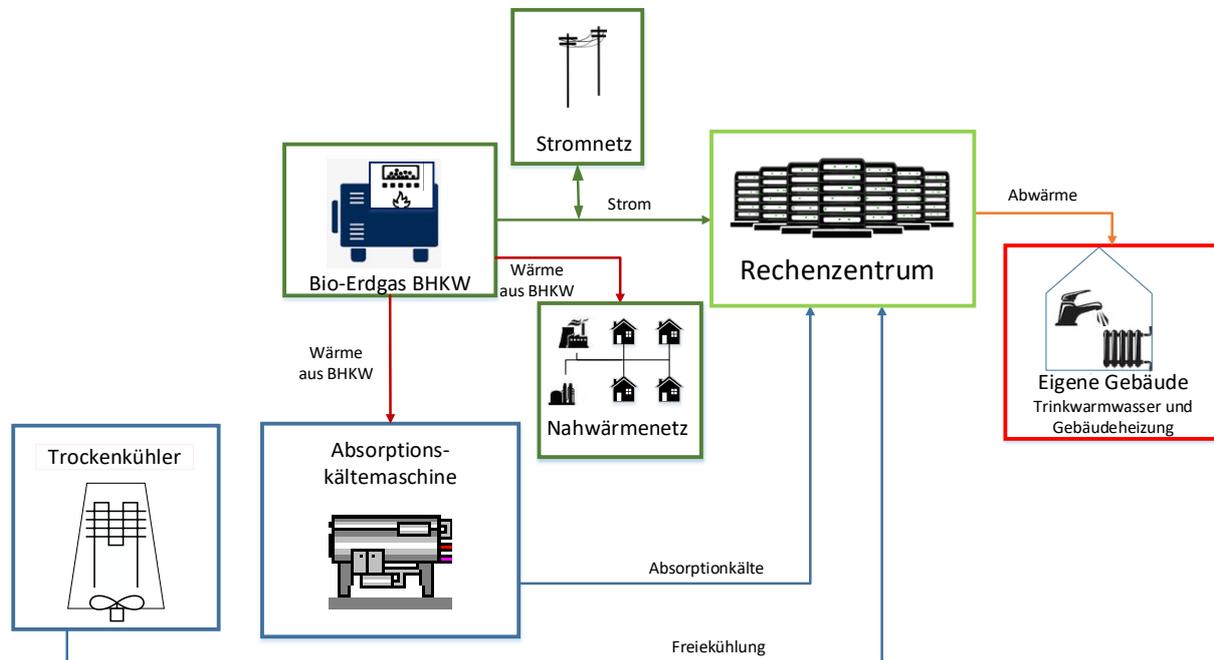


Abbildung 73: Energieflussschema des Szenario 2

Für die Berechnung des Lastprofils des Wärmenetzes werden die Daten des Standortes Stöckach aus Simulationsergebnissen verwendet. Sie wurden mit Hilfe der Software Stanet (Fischer-Uhrig 2019) im Projekt Simstadt 2.0 (Hochschule für Technik Stuttgart 2018) ermittelt. Das erhaltene Profil ist der benötigte jährliche Gesamtwärmebedarf des Fernwärmenetzes. Es versorgt entsprechend Abbildung 74 132 Mehrfamilienhäuser, 37 Gewerbegebäude, 27 öffentliche Gebäude, 2 Gewerbehoteles, 1 Unternehmen aus der Papierindustrie und eine Bäckerei. Dabei wurde eine mittlere Fernwärmenetztemperaturen von 90 °C / 70 °C (Vorlauf/Rücklauf) angenommen. Das BHKW des Rechenzentrums wird in der Simulation in den Netzurücklauf integriert. Dort speist es die BHKW-Restwärme in das Netz. Die Vergütung für die Wärme entspricht 3,1 Eurocent pro kWh (entsprechend der Anlagen von Hamburg Wedel (Elbe) und Dradenau (Sandrock und Et. al 2016)). Der nutzungsabhängige Bedarf der Gebäude von diesem Quartier ist in Abbildung 75 dargestellt. Die Grundlast beträgt in diesem Fall im Sommer etwas mehr als 1 MW und die Spitzenlast im Winter bis zu 10 MW. Der jährliche Wärmegesamtenergiebedarf dieses Quartiers beträgt ca. 31,5 GWh.

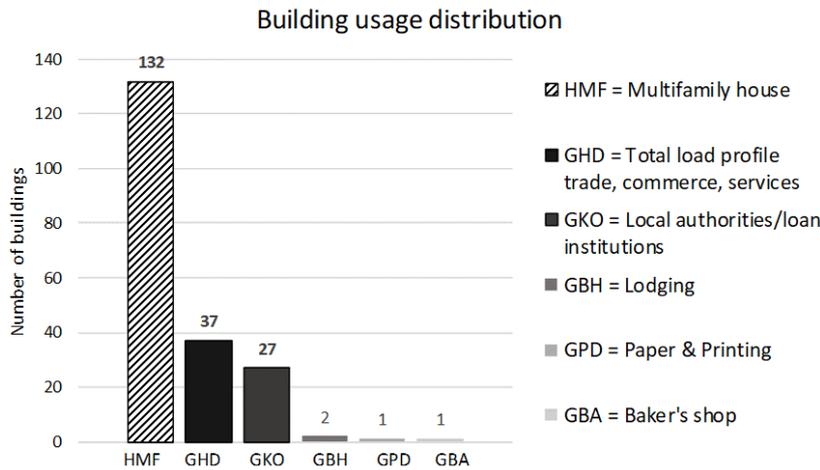


Abbildung 74: Aufteilung nach Typgebäude im Quartier Stöckach (Wärmenetz nach (Hochschule für Technik Stuttgart 2018) simuliert)

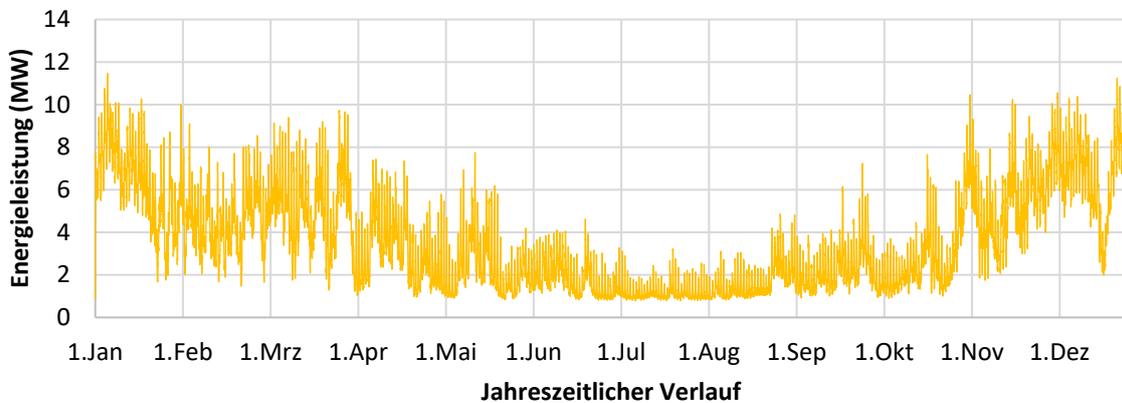


Abbildung 75: Wärmeverbrauch in dem simulierten Wärmenetz des Quartiers Stöckach

#### 5.4.3.1 Szenario 2a – Abwärmenutzung innerhalb des Gebäudes und mittels Wärmenetz

Wie bei der Simulation des Referenzrechenzentrums wurde ein luftgekühltes Serversystem auf der IT-Seite genommen. In diesem Szenario soll die Abluft des Rechenzentrums die Heizleistung zur Vorwärmung des im Gebäude benötigten Warmwassers liefern. Aus diesem Grund wurde der Fernwärmebedarf eines 1.000 m<sup>2</sup> großen Bürogebäudes aus Stuttgart von der Stanet-Software übernommen. Das Gebäude hat entsprechend der Modellierung einen Wärmebedarf von 10 MW in der Spitzenzeit im Winter und eine Grundlast von 1 MW im Sommer. Dieser interne Wärmebedarf wird hauptsächlich durch die Abluft des Rechenzentrums und der Rest durch das BHKW gedeckt werden. Der simulierte interne Gebäudewärmebedarf beträgt 26,7 MWh jährlich.

Für dieses Szenario sind die Arbeitszeiten in jedem Kühlmodus identisch mit dem Referenzszenario D. Es werden ebenso in 7.525 Stunden nur die freie Kühlung (Modus\_fK) und in den restlichen 1.235 Stunden die (Absorptions-)Kältemaschine (Modus\_ABS) genutzt. Darüber hinaus erfolgt die Kühlung des Mediums durch interne Abwärmenutzung, wenn Wärmebedarf im Gebäude besteht. Zur Temperaturanpassung des internen Wärmebedarfs wird zusätzlich ein elektrisches Heizelement als Sekundärheizung für den Trinkwarmwasserbedarf eingesetzt. Im Energieverhältnis werden 86 % der Kälte (fK=1.539 MWh) durch Freie Kühlung und nur 1 % durch Nutzung der Abwärme im Gebäudeinneren geliefert und die restlichen 13 % (ABS=235 MWh) müssen durch Absorptionskältemaschinen abgedeckt werden. Mit der Abwärmenutzung könnten 90 % der internen Wärme- und Warmwasserversorgung durch die RZ Abwärme bereitgestellt werden.

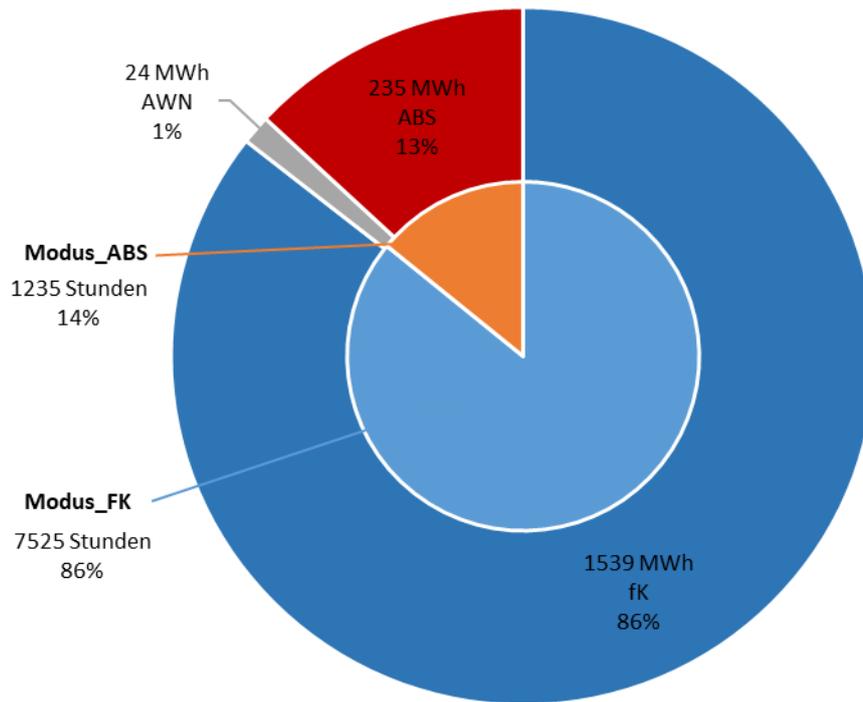


Abbildung 76: Energiemenge und Stundenzahl pro Jahr in jeweilige Betriebsmodus in Szenario 2a

In Abbildung 77 wird der jährliche Stromverbrauch des Szenarios beschrieben. Bezogen auf den elektrischen Gesamtbedarf von 1.898 MWh, wird der Strombedarf für die RZ-Kühlung auf 17 % reduziert. Der Strom für fK-Betrieb entspricht nahezu dem des Referenz RZ. Als Hilfsenergie für die Absorptionskältemaschine werden 34 MWh (ABS) und weitere 32 MWh (Hilfsstrom) für die interne Abwärmenutzung und Pumpenleistung für die Wärmenetzeinspeisung verbraucht.

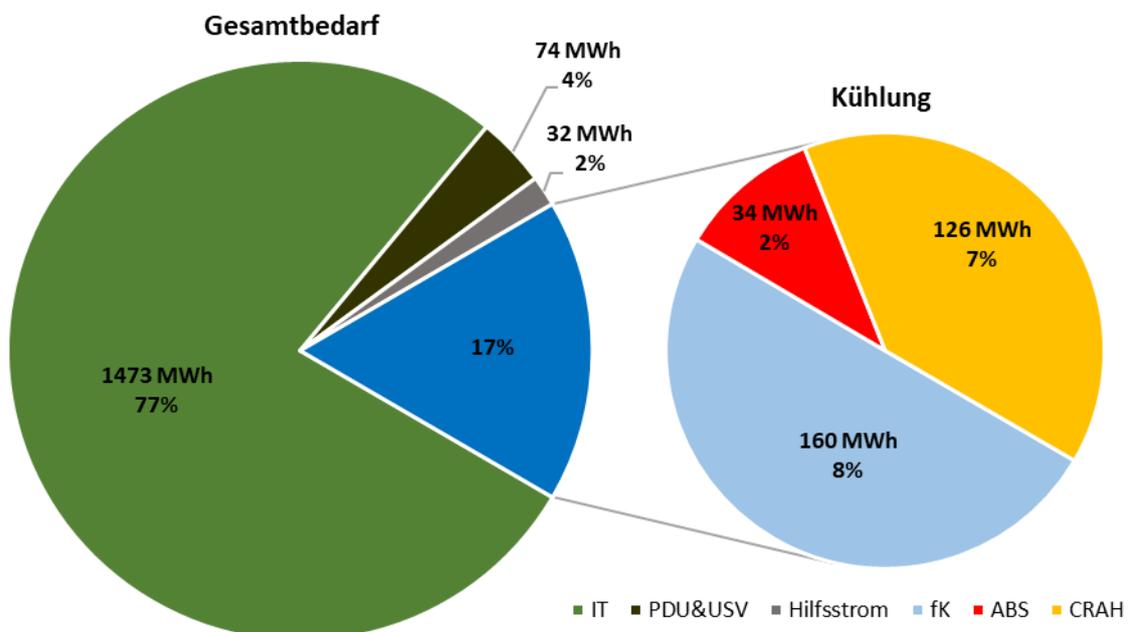


Abbildung 77: Jährliche Stromverbrauch der einzelnen Bereich des Rechenzentrums in Szenario 2a

Das BHKW kann für den elektrischen Energieeinsatz oder für den thermischen Energieeinsatz optimiert betrieben werden oder durchgängig mit 100 % Leistung betrieben werden. Bei einem Betrieb des BHKWs entsprechend des Bedarfs der Absorptionskältemaschine, die nur genutzt werden soll, wenn eine freie Kühlung nicht möglich ist, würde das BHKW nur im Sommer und insgesamt nur 13 % des

Jahrs arbeiten. Daher wurde beschlossen, sich nur auf die bedarfsoptimierte BHKW-Produktion zu konzentrieren.

In diesem Fall lag der Gesamtwirkungsgrad des BHKWs im Jahresdurchschnitt bei 85 %, der entsprechende elektrische Wirkungsgrad bei 39 % und der thermische bei 46 %. Die durchschnittliche Kapazität für das gegebene RZ als optimierter elektrischer Bedarf betrug 1,00. Das heißt, dass die Stromlast immer geringfügig höher als die vom BHKW erzeugte elektrische Energie ist. Das BHKW liefert 1.751 MWh, 92 % des Gesamtstrombedarfs. Der Restbedarf von 146 MWh wird vom Stromnetz bezogen. Für dieses System mit angenommenen 10,83 kWh/m<sup>3</sup> i.N. Bio-Erdgas wird ein 4.467 MWh äquivalent von ca. 410.000 m<sup>3</sup> i.N. Bioerdgas pro Jahr benötigt (ca. 1.130 m<sup>3</sup> i.N. Gasvolumen pro Tag). Nur 319 MWh der vom BHKW produzierten Wärme werden von der Absorptionskältemaschine zur Kühlung benötigt. Die restlichen 84 % (1.740 MWh) werden in den Rücklauf des Fernwärmenetzes eingespeist. Für den Leistungsfaktor der Absorptionskältemaschine ergab sich ein Wert von 0,74. Die 1.740 MWh Wärme, die an das Fernwärmenetz geliefert werden, decken 5,5 % des Gesamtwärmebedarfs in Höhe von 31,64 GWh des Beispielquartier Stöckach. Da die Wärme aus BHKW und deren Einspeisung ins Wärmenetz sich nicht im PUE widerspiegelt, erreicht der PUE mit 1,29 einen nahezu gleichen Wert wie im Referenz Szenario. Jedoch steigt der REF-Wert entsprechend der Formel 31 auf 1, obwohl nur 1 % der Abwärme intern genutzt wird. Da der Rücklauf aus der Wärmerückgewinnung des RZ in die BHKW-Anlage geleitet wird, lässt sich nicht direkt beziffern, wie viel Prozent der aus dem RZ ins Netz eingespeisten Wärme vom BHKW und wie viel von der RZ-Abwärme stammt.

$$\varepsilon_{\text{Szenario 2}} = \frac{235 \text{ MWh} + 1539 \text{ MWh} + 24 \text{ MWh}}{160 \text{ MWh} + 34 \text{ MWh} + 126 \text{ MWh} + 34 \text{ MWh} + 319 \text{ MWh (Wärme)}} = 2,7$$

Formel 42: Berechnung des Leistungsfaktors für das Szenario 2

Entsprechend der Definition von Formel 39, wurde mit der Formel 42 für dieses Szenario einen Leistungsfaktor von 2,7 berechnet. Bei der Berechnung wurde der erzeugten Kühleistung die Summe aus der verwendeten elektrischen Energie (siehe Abbildung 77) und der thermischen Energie, die vom BHKW stammt, gegenübergestellt. Die thermische Energie wurde mit einbezogen, da diese nicht alternativ in das Fernwärmenetz eingespeist werden kann.

#### 5.4.3.2 Erweitertes Szenario 2a mit wassergekühlte Server

Zusätzlich zum Szenario 2a wurde untersucht, wie sich wassergekühlte Server anstatt von luftgekühlten auf das Ergebnis der Simulation auswirken. Es wird in diesem Fall davon ausgegangen, dass der Wasserzulauf (wie in Abbildung 78 dargestellt) für das BHKW vom Serverrücklauf mit einer Temperatur von 60 °C erfolgt und für den Server eine Vorlauftemperatur von 40 °C geliefert wird. Damit steigt die Nutzungsmöglichkeit der freien Kühlung. Die Nutzung der Abwärme des Rechenzentrums zur Unterstützung der Absorptionskältemaschine wird auch ermöglicht. Die Temperaturerhöhung in diesem Szenario soll über das BHKW erreicht werden, so dass das erforderliche Temperaturminimum von 70°C der Absorptionskältemaschine zugeführt werden kann. Dabei reduziert sich jedoch der Leistungsfaktor auf 0,7. Für diese relativ niedrigen Antriebstemperaturen sind Adsorptionskältemaschinen besser geeignet als Absorptionskältemaschinen, da für diese Technologie bei hohen JAZ die Warmwassertemperatur niedriger liegen kann. Auch in diesem Fall ist ein BHKW mit vollem thermischem Potenzial nicht erforderlich, da die Hälfte der Adsorptionswärme aus der Wärmerückgewinnung des RZ stammt und der Restbedarf vor allem im Sommer durch solarthermische Kollektoren in Kombination mit Adsorption oder durch PV-Direktnutzung bzw. PPAs zur Versorgung von Wärmepumpen gedeckt werden könnte.

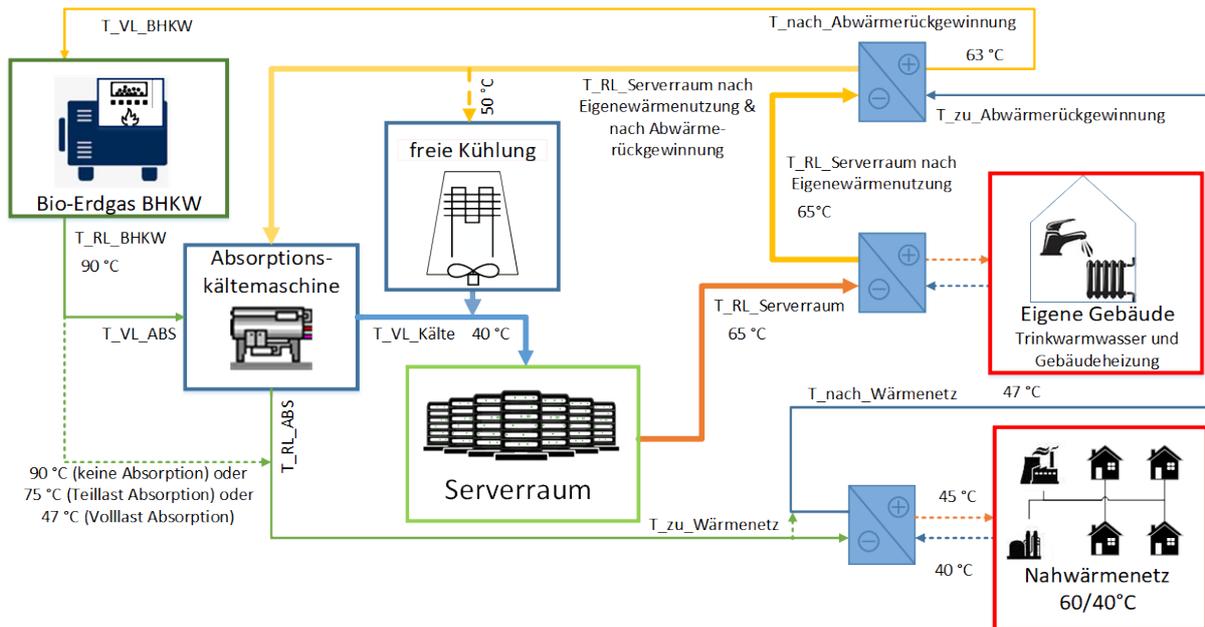


Abbildung 78: Blockdiagramm von Szenario 2b (Wassergekühlte Servern) mit Komplexität in Realisierung von der Simulation

Bei 40 °C Eingangswassertemperatur könnte die freie Kühlung bis zu 35 °C Außentemperatur betrieben werden. Der Bedarf an energieintensiven Kühlverfahren wie Kompressionskühlung oder Absorptionskühlung besteht daher nicht. Um sowohl das BHKW mit Fernwärmenetzintegration als auch die interne Wärmeversorgung mit Abwärmenutzung zu integrieren, sollte die Temperatur des Wärmenetzrücklaufs niedriger sein als die des Wasseraustritts des Servers. Damit könnte der Serverrücklauf in den Wärmenetzrücklauf integriert werden. Derzeit ist es möglich, RZ mit einem 70 °C/50 °C (VL/RL) Niedertemperatur-Fernwärmenetz zu koppeln. Für ein solches Szenario müsste die RL-Temperatur des Serverkühlkreises über 60 °C liegen. Bei der Verwendung von Absorptionskältemaschinen müsste der Warmwasserdurchfluss der Kältemaschine niedriger sein, so dass das  $\Delta T$  auf der Heißwasserseite gleich dem der Kaltwasserseite ist. Dies ist aber technisch oft nicht möglich. Wenn im Kaltwasser nur ein  $\Delta T$  von maximal 25 K möglich ist, könnten auch auf der Heißwasserseite nur 23 K realisiert werden. Das bedeutet, dass für einen BHKW Heißwasserrücklauf von 55 °C der Massenstrom so hoch eingestellt werden muss, dass die BHKW-Ausgangstemperatur nicht mehr als 83 °C beträgt. Dann müssten jedoch diese 55 °C durch Rückgewinnung der Abwärme auf eine höhere Temperatur erhöht werden. Vorerst scheint es demzufolge, zumindest bis Niedertemperaturnetze und Hochtemperatur-Flüssigkeitskühlung zur Verfügung stehen, nicht sinnvoll, BHKW, Fernwärmeintegration und Abwärmenutzung gemeinsam zu nutzen. Selbst dann ist es für ein wassergekühltes Rechenzentrum nicht sinnvoll, das Rechenzentrum mit einer Absorptionskältemaschine, die BHKW-Wärme verwendet, zu kühlen. Direkte Netzintegration oder Eigennutzung von BHKW nur zur Kühlung scheinen möglich. Aber aufgrund des komplexen Systems, der Vielzahl der Randbedingungen und der zurzeit noch sehr eingeschränkten Einsatzmöglichkeiten wurde dieser Ansatz nicht weiterverfolgt.

#### 5.4.3.3 Szenario 2b – BHKW-Strom für Rechenzentrum und BHKW-Wärme für Wärmenetz

Für den späteren Vergleich der verschiedenen CO<sub>2</sub>-Footprints der Szenarien, wurde eine Variante des 2. Szenarios gewählt. Aus Sicht der Kälteproduktion handelt es sich hierbei um das Referenzrechenzentrum D. Es wird dementsprechend keine Absorptionskältemaschine, sondern lediglich eine Kompressionskältemaschine in Kombination mit einer freien Kühlung eingesetzt. Zur Versorgung des Rechenzentrums mit Strom wird ein BHKW eingesetzt. In dieser vereinfachten Variante wird nur die entstehende Wärme des BHKW in das Wärmenetz eingespeist. Da in dieser Variante im Vergleich zum Referenzrechenzentrum nur die Stromversorgung geändert wurde, bedurfte es keiner neuen Simulation des Rechenzentrums.

#### 5.4.4 Szenario 3 – Wärmeauskopplung mittels Wärmepumpe

Szenario 3 ist eine Studie über die Umsetzbarkeit eines Modells, das in Skandinavien bereits umgesetzt wird. Das Szenario ist als Blockdiagramm in Abbildung 79 visualisiert. Es besteht aus einer zentralen Wärmepumpe, die die Abwärme aus dem Rücklauf der Serverraumabluft nutzt. Sie erzeugt damit hochwertige Wärme und speist diese Nutzwärme in den Fernwärmerücklauf ein. Als Backup ist im Modell analog zum Referenzrechenzentrum eine Kompressionskältemaschine mit trockener freien Kühlung enthalten. Diese Konfiguration ist in Skandinavien aufgrund der günstigen Strompreise und der Bereitschaft der Fernwärmenetzbetreiber erfolgreich. Es ist jedoch zu beachten, dass auch in Skandinavien die Außenlufttemperaturen relativ kälter sind und, obwohl freie Kühlung plus Kompressionskältemaschine weniger Strom benötigen würde, diese Konfiguration gewählt wird, da eine weitere Verwendung der Abwärme erfolgt. Zusätzlich werden in diesem Szenario die Vorteile einer dezentralen PV analysiert.

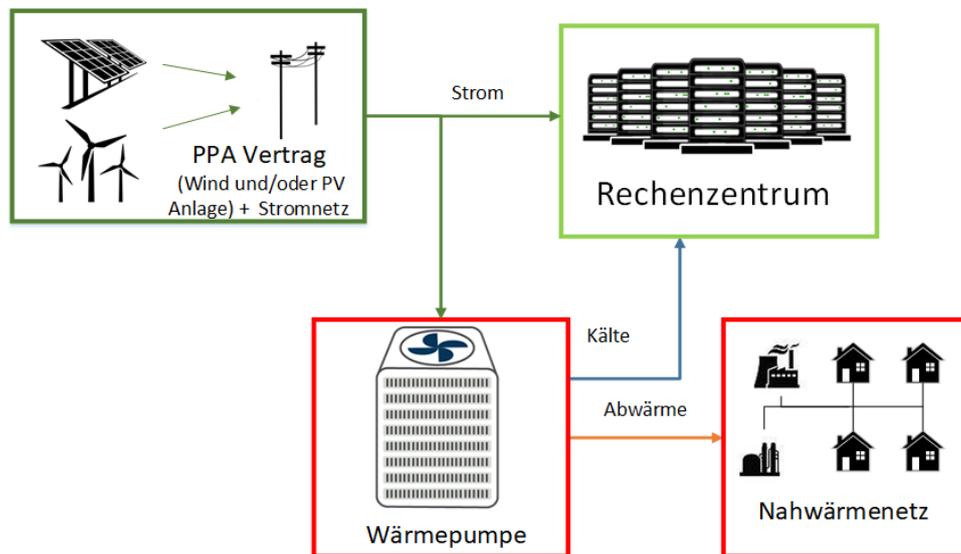


Abbildung 79: Szenario 3 Energieflussschema

Das System nutzt das Wärmelastprofil der Siedlung Stöckach entsprechend Szenario 2 und die Wärmeeinspeisung erfolgt über eine Wärmepumpe. Sie erhöht die Temperaturqualität der zurückgewonnenen Abwärme aus dem Serverraum. Die Serverabluft wird zu einer Fan-Coil-Einheit geleitet, in der die Abluftwärme an einen Wasserkreis übertragen wird. Die Temperatur der gekühlten Luft ist in der Regel kalt genug, um direkt in den Serverraum zurückgeführt zu werden. Im Falle, dass die Rücklufttemperatur nach der Wärmerückgewinnung über 24,5°C liegt, aktiviert der Regler die Zwangskühlung. Sie wird über freie Kühlung erreicht, wenn die Außenluft weniger als 18°C beträgt. Ansonsten wird die Kompressionskältemaschine aktiviert.

Für diese Studie wird eine Hochtemperatur-Wärmerückgewinnungs-Spezialwärmepumpe (Wasser zu Wasser) von WAMAK (WAMAK Wärmepumpen 2020) eingesetzt. Für solche Hochtemperatur-Wärmepumpen gibt es inzwischen eine große Auswahl. Nach den Recherchen gibt es bisher jedoch keine marktverfügbaren Luft-Wasser-Hochtemperatur-Wärmepumpe, die optimal für den Einsatz in RZ geeignet wären. In der Simulation wird eine WAMAK TWW 150 SHR mit einer Leistung von 111 kW bei einem COP von 4,2 unter nominalen EN 14511 Bedingungen verwendet. Sie kann Warmwasser bis zu 82 °C erzeugen und mit einer Quelltemperatur von bis zu 45 °C versorgt werden. Es werden 3 Einheiten einer solchen Wärmepumpe mit insgesamt 333 kW Nennleistung eingesetzt. Diese Wärmepumpen verbrauchen elektrische Leistung und kühlen die Serverluft, im Gegensatz zu anderen Technologien erzeugen sie Wärme auf einer hohen nutzbaren Temperatur mit einem im Vergleich zu Kompressionskältemaschinen geringen Leistungsfaktor. Aus dem Datenblatt der Wärmepumpe wurde ein Kennlinienmodell erstellt und der Type 401 in TRNSYS verwendet. Es wurde eine Soll-Kondensatortemperatur von 72 °C angenommen und zum Wärmeaustausch der Kondensatoraustritt an den Rücklauf des Fernwärmenetzes gekoppelt.

Mit einer durchschnittlichen Serverablufttemperatur von 40 °C erreicht bei diesem System der Gebläsekonvektor für die Wärmerückgewinnung von Luft zu Wasser eine Wassertemperatur von 27,1 °C aus dem Wärmerückgewinner und nach der Wärmepumpe 17,5 °C aus dem Verdampfer. Dieser kühlt wiederum die Serverluft auf 24,4 °C ab. Die Wärmerückgewinnung über die Wärmepumpe kühlt die Serverluft mit einer Leistung von 177 kW bei einer durchschnittlichen  $\epsilon_{\text{Kälte}}$  von 2,2 ab und speist in das Fernwärmenetz 262 kW<sub>el</sub> ein. Sie verbraucht dabei 84 kW Strom. Die freie Kühlung und die Kompressionskältemaschine mussten in diesem Szenario nie betrieben werden.

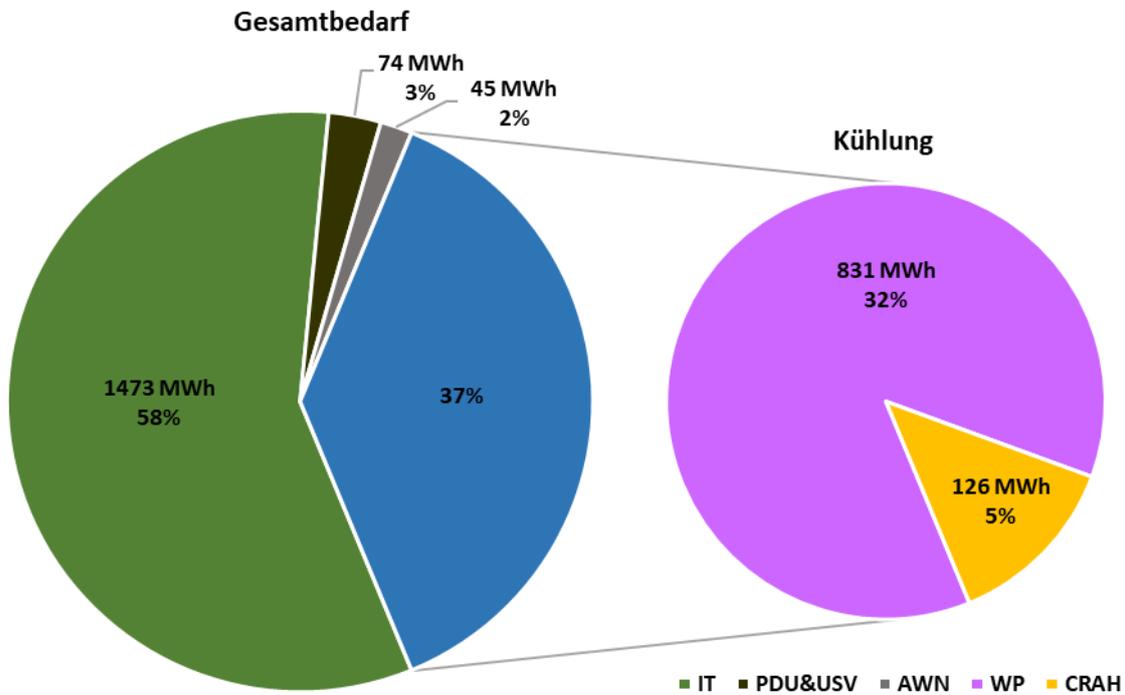


Abbildung 80: Jährlicher Stromverbrauch des RZ in Szenario 3

Die Simulation ergab, dass der jährlichen Energieverbrauch des Rechenzentrums (Abbildung 80) auf 2.548 MWh steigt. Die Wärmepumpe benötigt hiervon 796 MWh direkt und 35 MWh als Hilfsstrom indirekt für die Wärmerückgewinnung. Dies entspricht 32 % des gesamten Stromverbrauchs des Rechenzentrums, welches einen Strombedarf für die IKT von 1.473 MWh entspricht. 45 MWh werden als Hilfsstrom für die Abwärmeeinspeisung ins Wärmenetz und 126 MWh für Luftverteilung benötigt. 2.580 MWh der produzierten hochwertigen Wärme werden in das Fernwärmenetz eingespeist. Dadurch werden 8,2 % des jährlichen Quartierswärmebedarfs gedeckt. Der Leistungsfaktor für die Kältebereitstellung beträgt 2,2 und für die Wärmeerzeugung 3,2. Im Vergleich mit der zur Kühlung eingesetzten Kompressionskältemaschine des Referenzszenarios sinkt der Leistungsfaktor, wenn nur die Kühlung betrachtet wird.

$$\epsilon_{\text{Szenario 3}} = \frac{1756 \text{ MWh (Kälte)} + 2581 \text{ MWh (Wärme)}}{831 \text{ MWh} + 126 \text{ MWh} + 45 \text{ MWh}} = 4,3$$

Formel 43: Berechnung des Leistungsfaktors für das Szenario 3

Mit der Formel 44, entsprechend der Definition von Formel 39, wurde für dieses Szenario der Gesamtleistungsfaktor von 4,3 ermittelt. Hierbei ist zu beachten, dass als Nutzen sowohl die erzeugte Kühlleistung als auch die erzeugte Wärmeleistung einbezogen wurde. Grund für die Einbeziehung der Wärmeleistung ist hier, dass durch die gelieferte Wärmeleistung an das Wärmenetz der Primärenergieeinsatz dort reduziert wird. Dem gegenübergestellt ist entsprechend Abbildung 80 die Summe an elektrischen Energiebedarf. Der PUE steigt in diesem Szenario zwar auf 1,73 jedoch auch der ERF auf 1. Im Vergleich zum Referenzszenario, wo 387 MWh Strom für Kühlung und Kälteverteilung verbraucht werden, werden 831 MWh inkl. dem Hilfsstrom für das Wärmepumpensystem im Szenario 3 benötigt. Daraus resultiert eine Differenz von 444 MWh zwischen Nutzung der Wärmepumpe

(Szenario 3) und dem fK-KKM Betrieb (Referenzszenario). Für die Berechnung des Erneuerbare-Energien-Faktors (REF) wurden die gleichen PPAs mit 1.335 MWh PV- und Windstrom wie in den vorherigen Szenarien verwendet. Der REF-Wert ergab 0,6 (nach Formel 31).

#### 5.4.4.1 Dezentrale PV

Für den nachhaltigen Betrieb eines Rechenzentrums ist neben einer effizienten ITK und einer effizienten Kühltechnologie entscheidend, auf welcher Art der vom Rechenzentrum benötigte Strom erzeugt wird. Die nachhaltigste Option ist der Einsatz einer dezentralen PV-Anlage. Sie kann sowohl auf dem Gebäudedach als auch an der Fassade des Rechenzentrums installiert werden. Eine Dachanlage konkurriert dabei immer mit anderen Anlagen, wie zum Beispiel den Trockenkühlern. Diese können die gesamte Dachfläche benötigen, da sie zur Sicherstellung des Betriebes redundant ausgelegt werden. Sollte aber auf diese Anlagen verzichtet werden können, da die Kälteproduktion mittels einer Wärmepumpe erfolgt, wäre die Errichtung einer Dach-PV-Anlage grundsätzlich sinnvoll. Zur Quantifizierung des Strombeitrages einer PV-Anlage zum Bedarf des Rechenzentrums wurden Simulationen durchgeführt. Hierfür wurde entsprechend dem Referenzrechenzentrum ein Gebäude mit einer Dachfläche von 400 m<sup>2</sup> gewählt. Es wurde angenommen, dass maximal 75 % der Dachfläche effektiv für PV-Module mit einer Gesamtleistung von 43 kW<sub>p</sub> genutzt werden kann. Für den Standort Stuttgart würde diese Dachanlage etwa 43 MWh/a erzeugen. Für die potentiell nutzbare Fassadenfläche ergab sich eine verfügbare Fläche für die PV-Fassade von 115,2 m<sup>2</sup> (bei 3,6 m Raumhöhe, 12 m Länge der Südseite, 34 m je Längen der Ost- & Westseiten, Verringerungsfaktor von 0,4 wegen Fensterflächen). Dies entspricht einer Gesamtleistung von 19,3 kW<sub>p</sub> (Süd: 2,9 kW<sub>p</sub>, Ost: 8,2 kW<sub>p</sub>, West: 8,2 kW<sub>p</sub>) und einem Gesamtertrag von 10,83 MWh/a (Süd: 2,16 MWh, Ost: 4,39 MWh, West: 4,28 MWh). In Summe wurden beide Anlagen 53,83 MWh/a liefern. Grundsätzlich ist dieser Beitrag wichtig. Jedoch kann damit nur ein Bruchteil (weniger als 5 %) der benötigten elektrischen Energie – bereits die ITK-Anlagen benötigten 1473 MWh/a – bereitgestellt werden. Deswegen wurde die Versorgung des Rechenzentrums mit einer dezentralen PV-Anlage nicht weiter in den Simulationen untersucht.

#### 5.4.4.2 Szenario 3b

Entsprechend zu dem Szenario 2b wurde ebenfalls eine Variation des 3. Szenarios untersucht. Da aus Sicht der Kälteproduktion wie im Szenario 3a die Wärmepumpe eingesetzt wird, ändert sich der Strombedarf des Rechenzentrums nicht. Deswegen wurde keine erneute Simulation durchgeführt. Im Szenario 3b wird der Strombedarf des Rechenzentrums mit einem BHKW gedeckt. Die bei dem Betrieb entstehende Wärme wird in ein Wärmenetz eingespeist. Der Vergleich der verschiedenen CO<sub>2</sub>-Footprints der Variationen des Szenarios 3 erfolgt im Abschnitt 5.6.2.

#### 5.4.5 Szenario 4 - Kühlung durch Geothermie

Dieses Szenario konzentriert sich auf den Einsatz einer erneuerbaren Kühlung. Es wird keine Abwärmenutzung im außerstädtischen Kontext in diesem Szenario betrachtet. Es berücksichtigt den Einsatz von oberflächennahen Geothermiekollektoren in Kombination mit einem adiabatischen Hybridkühler. Für die Versorgung des Rechenzentrums mit elektrischer Energie werden PPAs Verträge eingesetzt. In diesem Szenario wird für die Kühlung nur die im System verwendeten Ventilatoren und Pumpen zusammen mit dem Rückkühler und dem Erdwärmekollektor untersucht.

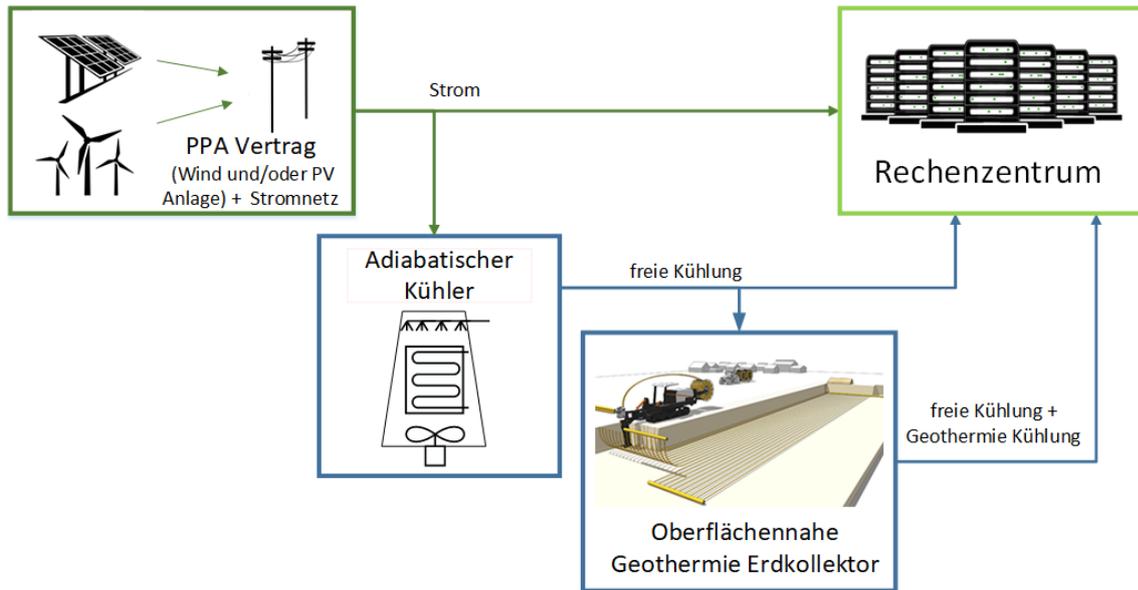


Abbildung 81: Szenario 4 Energieflussschema

Der Erdwärmekollektor wird mit dem Typ 997 in TRNSYS simuliert. Dafür werden die Eingabedaten aus dem Wüstenrot-Quartiersprojekt in Heilbronn verwendet. Im Projekt in Wüstenrot wurde dieser oberflächennahe Kollektor im Rahmen des EnVisage Projektes (Gemeinde Wüstenrot 2020) zur Versorgung der dezentralen Wärmepumpen im Quartier in der Realität umgesetzt. Die Fläche der Geothermie für das Rechenzentrum wurde mit 9.000 m<sup>2</sup> angesetzt. Für die Fläche werden 22 Rohre mit einer Länge von 400 m in einer Tiefe von 3 m und mit einem Abstand von 1 m geplant. Die Rohre verlaufen parallel bei DN40 wie in Abbildung 82 dargestellt. Die Rohrparameter stammen von den Rehau PE-Xa flexiblen Kollektorrohren (REHAU 2020), die in Wüstenrot verwendet wurden. Das Rohr hat eine Wärmeleitfähigkeit von 0,35 W/(m·K). Es wurde ein Glykol-Wasser-Gemisch mit 3,97 kJ/(kg·K) spezifischer Wärme angenommen. Für das Erdreich wurde ein leicht feuchtes Sand-Kies-Ton-Gemisch angenommen. Kennzahlen davon ergeben sich aus dem VDI-4640 Blatt 4 (VDI-Richtlinie 4640). Dazu zählt die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs mit 1,4 W/(m·K) und die Dichte des Erdreichs mit 2.100 kg/m<sup>3</sup> bei einer spezifischen Wärme von 1 kJ/(kg·K).

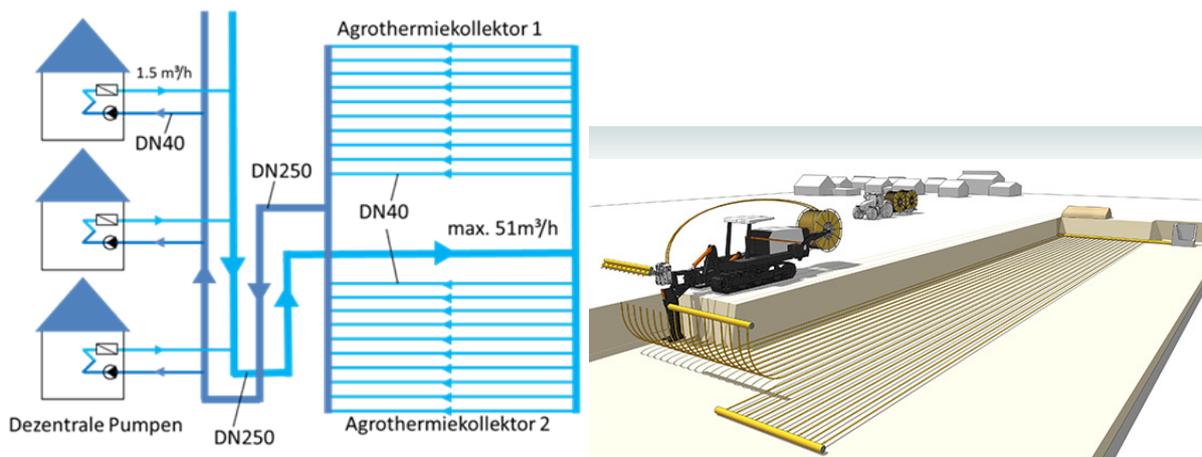


Abbildung 82: Konfiguration der Agrarfläche zur oberflächennahen Geothermie in Wüstenrot Quartier (Gemeinde Wüstenrot 2020)

Die weiteren Unterschiede in der Simulation im Vergleich zum Referenzszenario sind:

- Die freie Kühlung erfolgt durch einen adiabatischen Kühler, da der Trockenkühler allein nicht ausreichte. Die Nennleistung des adiabatischen Kühlers beträgt bei Designbedingungen im Nassbetrieb 750 kW und im Trockenbetrieb 395 kW.
- Die Regelung für die Kühlung wurde so ausgelegt, dass standardmäßig der Trockenkühlerbetrieb erfolgte. Sobald der Trockenkühler den Sollwert von 17 °C nicht erreichen konnte, wurde der adiabatische Nassbetrieb mit einem Sollwert von 18,5 °C eingeschaltet. Wird im Nassbetrieb durch freie Kühlung eine Wasserrücklauftemperatur von 19 °C nicht erreicht, wurde die geothermische Kühlung in einer Reihenschaltung eingeschaltet. Somit wird nur die Restenergie, die nicht durch freie Kühlung erreicht werden kann, durch die Geothermiekühlung abgedeckt.

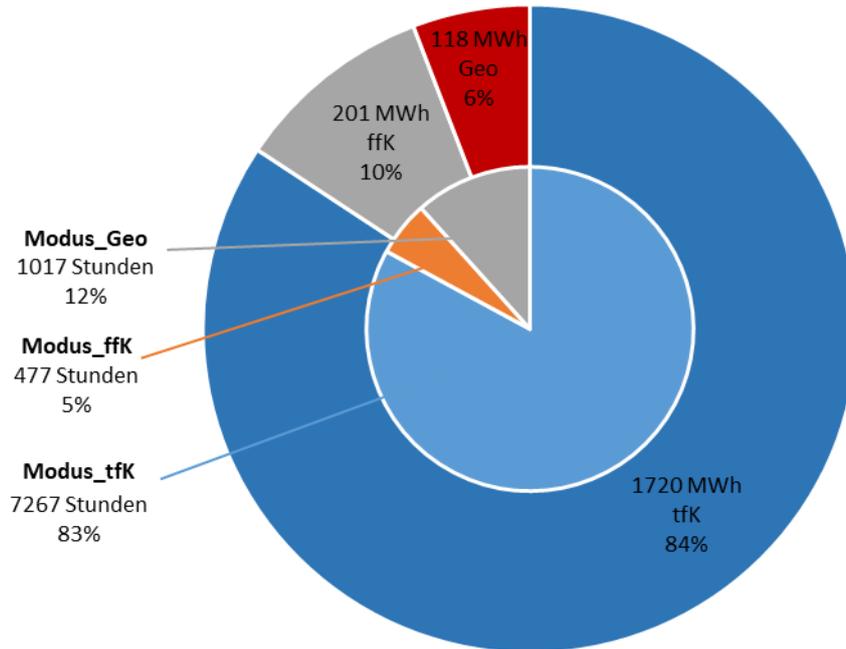


Abbildung 83: Thermische-Energiemenge und Stundenzahl pro Jahr in jeweilige Betriebsmodus in Szenario 4

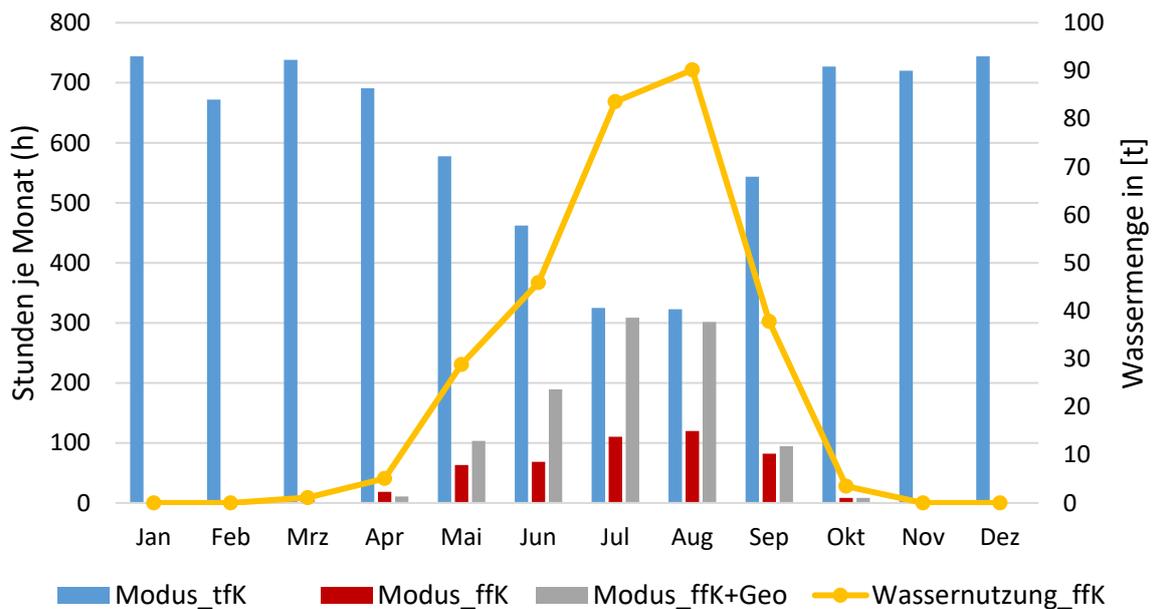


Abbildung 84: Stunden pro Monat in je Betriebsmodus der Kälteerzeugung in Szenario 4

Wie in Abbildung 83 dargestellt, läuft die freie Kühlung im Trockenbetrieb für 7.267 Stunden pro Jahr und im Nassbetrieb für 477 Stunden. Die restlichen 1.017 Stunden läuft sie als kombinierte Nasskühlung und geothermische Kühlung. Geothermie läuft hauptsächlich von Mai bis September. Die monatlichen Betriebsstunden je Modus der Kälteerzeugung und die monatliche Wassernutzung für trockene freie Kühlung (tfK) und feuchte freie Kühlung (ffK) werden in Abbildung 84 gezeigt. Insgesamt werden für die adiabatische Kühlung 296 Tonnen Wasser pro Jahr benötigt. 87 % des gesamten Kühlungsbedarfs im Serverraum (1.620 MWh) können durch den Standard-Trockenkühlerbetrieb abgedeckt werden. Bei weiteren 8 % erfolgt die Kühlung mit der freien Kühlung im Nasskühlerbetrieb des Hybridkühlers. Die restlichen 5 % werden durch die Geothermie geliefert, die in Reihe mit dem Nasskühler läuft, wenn dieser nicht ausreicht um die Lasten abzudecken.

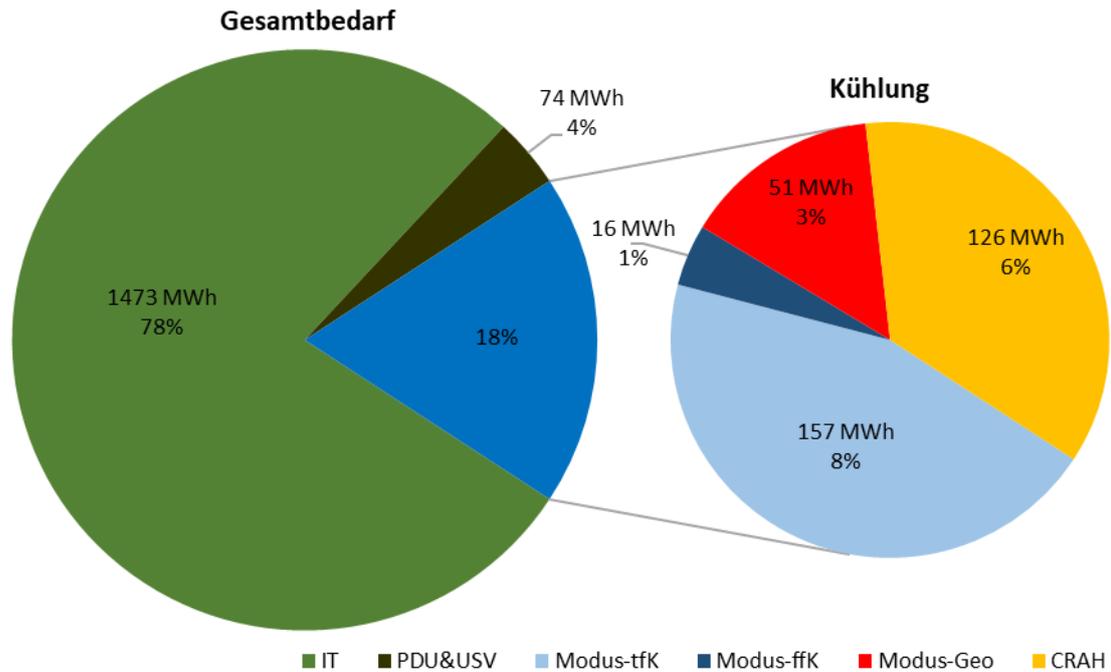


Abbildung 85: Jährlicher Stromverbrauch in RZ in Szenario 4

Die Simulation ergab, wie in Abbildung 85 dargestellt, dass das Rechenzentrum in diesem Szenario verbraucht 1.896 MWh Strom pro Jahr verbraucht. 18 % davon werden für die Kühlung benötigt. Das entspricht einer Einsparung von 2 % bzw. 70 MWh durch die Nutzung geothermischer Energie verglichen mit der Kühlung mit einer KKM (Referenzszenario). Der Leistungsfaktor beträgt 5,8 entsprechend der Berechnung nach der Formel 44.

$$\varepsilon_{\text{Szenario 4}} = \frac{201 \text{ MWh} + 118 \text{ MWh} + 1720 \text{ MWh}}{157 \text{ MWh} + 16 \text{ MWh} + 51 \text{ MWh} + 126 \text{ MWh}} = 5,8$$

Formel 44: Berechnung des Leistungsfaktors Jahresarbeitszahl für das Szenario 4

Abgesehen von einem möglichen Imagegewinn, durch den Betrieb einer erneuerbaren Kühlung, gibt aktuell es aus wirtschaftlicher Sicht keine ausreichenden Gründe für den Einsatz von kostenintensiven und flächenintensiven geothermischen Anlagen.

## 5.5 Zusammenfassende Erkenntnisse aus den technischen Simulationen

In diesem Abschnitt werden die simulierten Szenarien zur Analyse der ausgewählten Systeme mit dem Referenzszenario verglichen. Einen gesamten Überblick der technischen Simulationsergebnisse wird in Tabelle 30 gezeigt.

Tabelle 30: Übersicht über die technischen Simulationsergebnisse

	Referenz RZ		Szenario 1			Szenario 2			Szenario 3			Szenario 4		
<b>Kälte- erzeugung</b>	1.965 MWh <sub>th</sub>		1.829 MWh <sub>th</sub>			1.798 MWh <sub>th</sub>			1.756 MWh <sub>th</sub>			2.040 MWh <sub>th</sub>		
<b>Energie Anteil Kältebedarf</b>	fK	KKM	AWN	fK	KKM	fK	ABS	AWN	WP	tfK	ffK	ffK +Geo		
	86 %	14 %	52 %	36 %	12 %	86 %	13 %	1 %	100 %	87 %	8 %	5 %		
<b>Strombedarf für Kühlung</b>	20 %		17 %			17 %			37 %			18 %		
<b>Jährliche Gesamtstrom- bedarf</b>	1.935 MWh <sub>el</sub>		1.870 MWh <sub>el</sub>			1.898 MWh <sub>el</sub>			2.548 MWh <sub>el</sub>			1.896 MWh <sub>el</sub>		
<b>Energie Anteil Strom- versorgung</b>	Stromnetz		Wind PPA	PV PPA	Strom- netz	BHKW	Strom- netz	Wind PPA	PV PPA	Strom- netz	Wind PPA	PV PPA	Strom- netz	
	100 %		40 %	31 %	29 %	92 %	8 %	30 %	22 %	48 %	40 %	30 %	30 %	
<b>Leistungs- faktor ε</b>	5,1		8,6			2,7			4,3			5,8		
<b>PUE</b>	1,31		1,27			1,29			1,73			1,29		
<b>REF</b>	0		0,8			1			0,6			0,8		
<b>ERF</b>	0		1			0			1			0		

Die technisch und ökonomisch einfachste Lösung stellt das Szenario 1 (Schwimmbad) dar. Bei diesem müssen nur geringe Investitionen getätigt werden. Dabei steigt der ERF bei gleichbleibendem PUE. Dieses Szenario verdeutlicht, wie eine hinsichtlich technischer Komplexität und Investment einfache Lösung den Nachhaltigkeitsfaktor des Rechenzentrums erhöhen kann.

Das zweite Szenario mit der Kraft-Wärme-Kopplung und Absorptionskältemaschine ist technisch die komplizierteste Option. Es hat viele zu synchronisierende Systeme und stellt eine Fallstudie für ein zukünftiges Szenario dar. Aus der Simulation geht hervor, dass der Eigenverbrauch der Wärme im Rechenzentrumsgebäude für seinen Heiz- und Warmwasserbedarf nur 1 % zur Abwärmenutzung beiträgt. Das unterstreicht die Notwendigkeit, einen externen Nutzer für die restliche Abwärme zur Verfügung zu haben. Als vielversprechend erweist sich ein Rechenzentrum, das in einer intelligenten Stadt in ein voll beheiztes Viertel integriert ist. Es entkräftet die weit verbreitete Annahme, dass Wärmenetze im Sommer nicht ausreichend ausgelastet sind. Tatsächlich weist bereits der relativ kleine Stadtteil Stöckach, der für die Simulation herangezogen wurde, im Sommer eine Grundwärmelast von etwa 1 MW auf.

Auch in Szenario 2 hat sich die PUE nicht wesentlich verändert. Der Schwerpunkt lag jedoch in diesem Szenario auf der Stromeigenproduktion, die aufgrund der Netzflexibilität und der verstärkten Einbindung erneuerbarer Energien in Zukunft noch stärker genutzt werden wird. In diesem Szenario wurde das BHKW einbezogen, um den Nutzen der Eigenstromproduktion zu analysieren. Diese kann bei einem Eigenverbrauch von 92 % als gut bewertet werden. Auf der thermischen Seite wird nur 13 % durch die Absorptionskältemaschine 13 % genutzt. Deswegen lässt sich die Frage, ob die Installation eines BHKW vorteilhaft ist, nicht allein durch anlagentechnische Simulationen beantworten.

Die Tatsache, dass die Temperatur für den Betrieb der Absorptionskältemaschine, die Temperatur des Heizungsnetzes, die Eigennutzungstemperatur und die Wärmerückgewinnung mit dem Ein- und Ausgang des Servers übereinstimmen müssen, macht es zu einem sehr komplexen und teuren System. Aus weiteren Simulationsergebnissen kann abgeleitet werden, dass keine Notwendigkeit für ein komplexes Kühlsystem in Kombination mit wassergekühlten Servern besteht. Eine Absorptionskältemaschine ist in dieser Konfiguration wegen der über das ganze Jahr realisierbaren freien Kühlung nicht erforderlich. Alternativ ist der Einsatz einer Wärmerückgewinnungsanlage möglich. Die Einspeisung der Abwärme in ein Wärmenetz war für Szenario 2 die bessere Option, da sie eine Kaskadenanwendung begünstigt. Im Gegensatz dazu ist es mit den wassergekühlten Servern nicht

möglich Temperaturen  $>75\text{ °C}$  zu erzeugen. Aufgrund der Entwicklungen im Bereich der Wärmenetze ist jedoch damit zu rechnen, dass in Zukunft Niedertemperaturnetze mit Temperaturniveaus unter  $50\text{ °C}$  in großem Umfang installiert werden.

Die Simulation des Szenario 3 zeigte, dass eine entsprechend ausgelegte Wärmepumpe trotz eines niedrigen COP ausreicht, um die für das Rechenzentrum erforderliche Kälte zu erzeugen und gleichzeitig den kompletten verbrauchten Strom in Wärme umzuwandeln. Der Nachteil dieses Szenarios besteht jedoch darin, dass im Vergleich zum Referenzfall mehr Elektrizität verbraucht wird, was nicht nur die PUE, sondern auch die Investitionskosten und die Betriebskosten erhöht sowie den Leistungsfaktor senkt.

Entsprechend den Ergebnissen der Simulation des Szenario 4, erscheint die Nutzung der Geothermie nur für die Nutzung von 5 % der Kühlung zu aufwendig. Die Tatsache, dass der Abwärmennutzungs-faktor (ERF) Null und die Stromeinsparungen gering sind, machen Szenario 4 am wenigsten interessant.

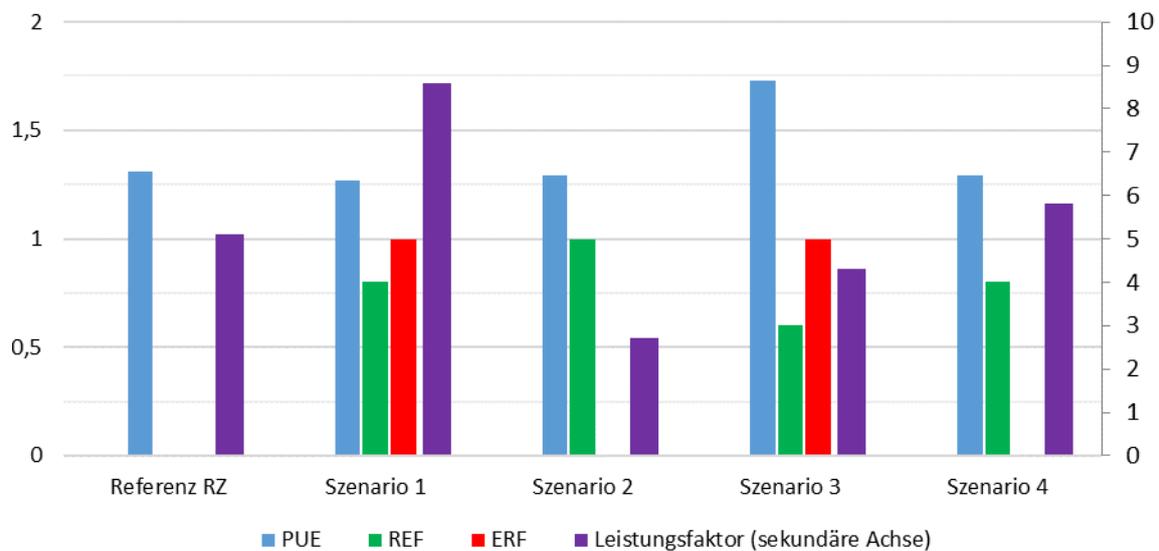


Abbildung 86: Gegenüberstellung der ermittelten Kennzahlen der verschiedenen Szenarien

Verglichen mit Leistungszahlen von Herstellern (Müller 2008) und Kennzahlen aus der Fachliteratur (Vaillant 2020) die sich dort zwischen 4 und 5 befinden, liegen die ermittelten Leistungsfaktoren ausgenommen von Szenario 2 in oder über diesem Bereich. Der Vergleich der Szenarien auf Grund der ermittelten Leistungsfaktoren ist jedoch nur teilweise sinnvoll, wie man an Abbildung 86 sieht. Denn diese Kennzahl stellt nur die Effizienz durch den Vergleich des Nutzes zum Aufwand dar. Hierbei unterscheiden sich die Szenarien jedoch, da insbesondere in den Szenarien 1 und 3 die Abwärme in verschiedenen Temperaturniveaus zusätzlich genutzt wird. Dieser zusätzlichen Nutzung steht jeweils aber auch ein zusätzlicher Aufwand entgegen. Dies spiegelt sich in dem ERF wieder, der für das Szenario 3 am höchsten ist. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Szenarien erfolgt deswegen im nächsten Abschnitt die Untersuchung der Szenarien anhand der theoretischen  $\text{CO}_2$ -Emissionen.

## 5.6 Weiterführende Untersuchung der Szenarien mit Fokus auf minimale $\text{CO}_2$ -Emissionen

Um den nachhaltigen Betrieb eines Rechenzentrums bewerten zu können ist nur eine Untersuchung der Effizienz der eingesetzten elektrischen Energie nicht ausreichend. Vielmehr sind auch die positiven externen Einflüsse wie zuvor beschrieben zu untersuchen. Hierfür eignet sich die  $\text{CO}_2$ -Bilanz. In diesem Abschnitt werden die zuvor simulierten Szenarien und untersuchten Technologien mit dem Fokus auf die Minimierung der  $\text{CO}_2$ -Emissionen betrachtet. Es werden dabei nur die erfolgversprechendsten Szenarien untersucht. Die Begründung der Auswahl der Szenarien erfolgt ebenfalls in diesem Abschnitt. Zunächst wird ein Blick auf die Verbesserung der Versorgungstechnik zur Reduzierung des Energiebedarfs geworfen. Anschließend wird die Abwärmennutzung gesondert betrachtet, da sie zwar

den Energiebedarf steigern aber einen positiven Einfluss auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen haben. Die wirtschaftliche Betrachtung der Abwärmenutzung in einem späteren Abschnitt.

### 5.6.1 Effiziente Versorgungstechnik

Die Verbesserung der Versorgungstechnik wurde anhand des Referenzrechenzentrums untersucht. Hierbei gibt es mehrere Möglichkeiten um den Power Usage Efficiency (PUE) zu verbessern. So ist ein wesentlicher Faktor der Wechsel der Kälteerzeugung von der ausschließlichen Nutzung einer Kompressionskältemaschine (KKM) hin zu einer Kombination mit einer freien Kühlung (fK). Die im vorherigen Abschnitt durchgeführten Simulationen ergaben bereits eine Verbesserung des PUE von 1,7 (KKM @20 °C-Zuluft) hin zu 1,5 (KKM+fK 9 °C @20 °C-Zuluft). Eine weitere Reduzierung des PUE um 0,2 auf 1,3 kann die Kombination aus einer verstärkten Nutzung der fK (75 % des Jahres) und eine erhöhte Lufteintrittstemperatur von 20 °C auf 25 °C erreicht werden (KKM+fK 18 °C @25 °C-Zuluft). Eine schematische Gegenüberstellung des Einsatzes effizienter Versorgungstechnologien ist in Abbildung 87 dargestellt.

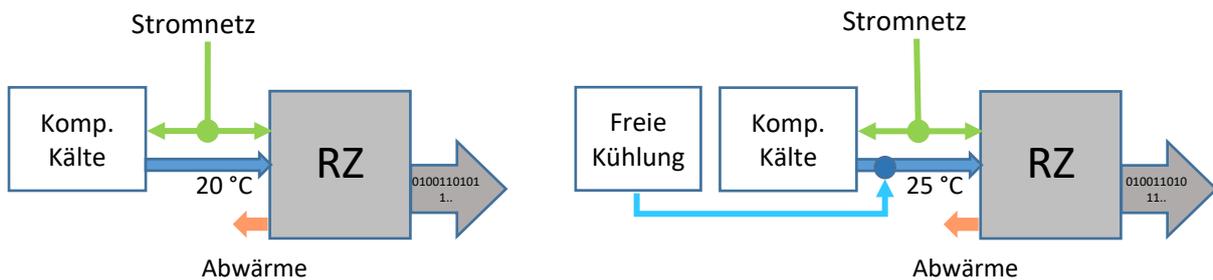


Abbildung 87: Einsatz von effizienten Versorgungstechnologien in Rechenzentren (rechts) gegenüber ineffizienten (links)

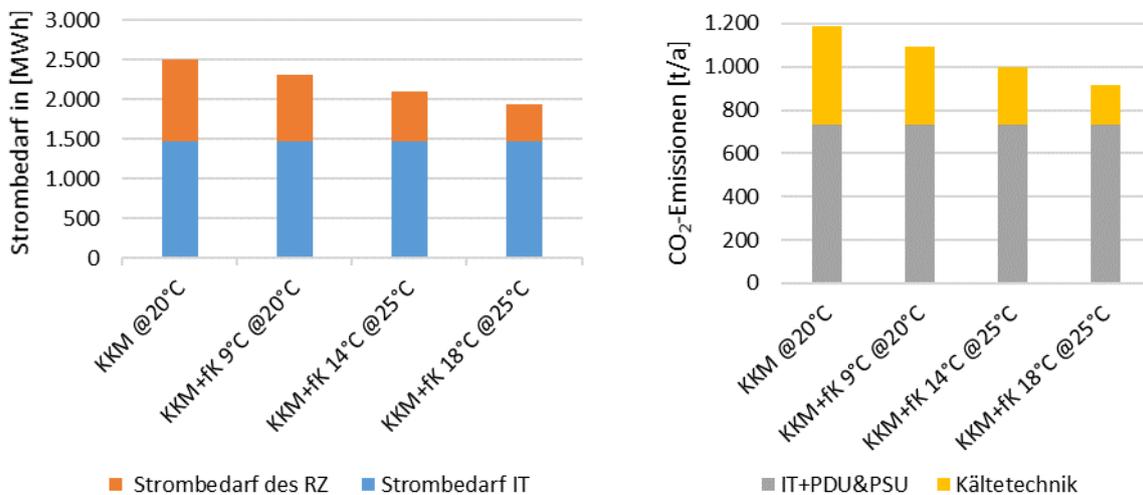


Abbildung 88: Ergebnisse der Simulationen zur Verbesserung der Versorgungstechniken bzgl. Strombedarf (links) und der CO<sub>2</sub>-Emissionen (rechts)

In Abbildung 88 sind links die Stromverbräuche der simulierten Rechenzentren dargestellt. Da die CO<sub>2</sub>-Emissionen direkt vom Stromverbrauch abhängen, ist klar erkennbar, dass die Auswahl der Kühltechnologie einen sehr großen Einfluss auf die Nachhaltigkeit des Rechenzentrums. Ebenso wichtig ist aber auch die Auswahl der IKT. Zwar wurde in den Simulationen keine Variation der IKT durchgeführt, jedoch hängen auch hier die CO<sub>2</sub>-Emissionen einerseits direkt vom Strombezug und andererseits in direkt von der benötigten Kühlung ab. Die ermittelten CO<sub>2</sub>-Emissionen basieren auf der Annahme von einer emittierten CO<sub>2</sub>-Emissionen von 744 kg/MWh (Icha 2019).

### 5.6.2 Abwärmenutzung – mit Wärmepumpe und optionalen BHKW

Eine Abwärmenutzung ist in dem Sinne schwierig, dass die Lufttemperatur der Abwärme des Rechenzentrums 35 bis 40 °C beträgt. Zur Einspeisung in ein Wärmenetz wird jedoch ein

Temperaturniveau von 80 °C benötigt. Zur Anhebung der Temperatur ist deswegen eine Wärmepumpe notwendig. Sie kann mit einer JAZ von 3 betrieben werden. Im Hinblick auf den PUE-Wert ist der Einsatz einer Wärmepumpe zunächst negativ, denn es ergibt sich aus den Simulationen, dass er von 1,3 auf 1,55 steigt.

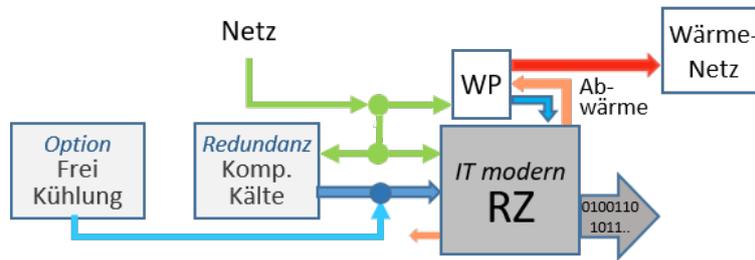


Abbildung 89: RZ-Abwärmenutzung mittels Wärmepumpe

Auf Grund der Vermeidung des Einsatzes von anderen Wärmeerzeugungsanlagen ist aber die CO<sub>2</sub>-Bilanz positiver. Deswegen muss der Einsatz einer Wärmepumpe dem Rechenzentrum angerechnet werden. Sobald ein BHKW zur Eigenstromversorgung genutzt wird, sollte die Abwärme des BHKW auch in ein Wärmenetz eingespeist werden. Durch eine flexible Nutzung des BHKW und der Netzversorgung wird zudem die Nutzung von Stromüberschüsse, die im Netz von fluktuierend Erzeugungen regenerativen Erzeugungsanlagen entstehen, ermöglicht.

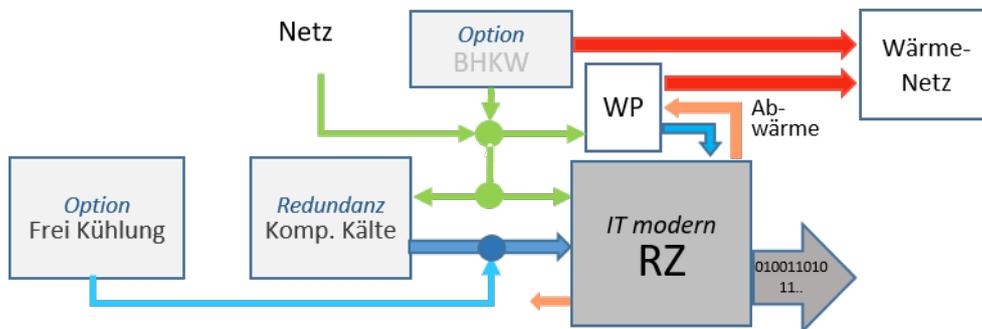


Abbildung 90: Stromversorgung des RZ durch BHKW sowie RZ-Abwärmenutzung mittels Wärmepumpe

Im folgenden Diagramm sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen der untersuchten Fälle dargestellt. Dabei werden für jeden Fall die CO<sub>2</sub>-Emissionen, die durch den Strombedarf der IT inkl. den zugehörigen Anlagen (graue Balken), der Kältetechnik (gelber Balken) und ggf. der Wärmepumpe (dunkelblauer Balken) aufgeführt. Denen gegenüber werden CO<sub>2</sub>-Substitutionen (hellblauer Balken) gestellt. Zusammen bilden die Werte die CO<sub>2</sub>-Bilanz (oranger Balken neben den CO<sub>2</sub>-Emissionen). Als Ausgangspunkt des Vergleichs wurden als erster Fall die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Referenzszenarios D (KKM+fK 18°C @25°C-Zuluft), bei dem es sich um die Variante mit der optimierten Versorgungstechnik handelt, gewählt. Im zweiten Fall (Netz+WP & Wärmenetz) erfolgt zusätzlich der Einsatz einer Wärmepumpe zur Einspeisung der Abwärme in ein Wärmenetz. Die Gutschriften für die Einspeisung der Wärme in das Wärmenetz wurde mit 206,5 g CO<sub>2</sub>/kWh (Agentur für Erneuerbare Energien 2020) angenommen. Dies entspricht spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen der Fernwärmeerzeugung von Baden-Württemberg von 2016. Der dritte Fall (BHKW+KKM+fK @25°C) entspricht von der Kältetechnik dem ersten Fall. Es wird jedoch zur Energieversorgung des Rechenzentrums ein Blockheizkraftwerk verwendet. Im vierten Fall (BHKW+KKM & Wärmenetz) wird von einem Rechenzentrum ausgegangen, bei dem ebenso die Energieversorgung von einem BHKW erfolgt. Hier wird aber die Abwärme des BHKWs in ein Wärmenetz eingespeist. Im fünften Fall (BHKW+WP & Wärmenetz) wird sowohl die Wärme des Rechenzentrums wie im zweiten Fall als auch die Abwärme des BHKW in ein Wärmenetz eingespeist.

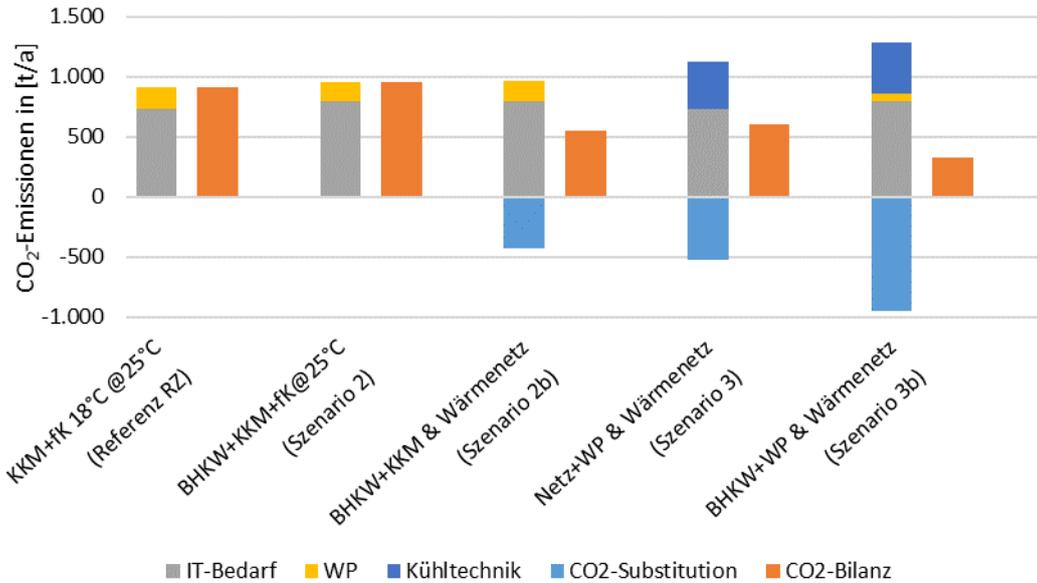


Abbildung 91: Jährliche CO<sub>2</sub>-Emissionen der untersuchten Simulationen

Die Berechnungen wurden wie zuvor auf Basis von Daten des Bundesumweltministeriums durchgeführt. Dazu zählt der deutsche Strommix von 474 g/kWh (Icha 2019) und die primärenergiebezogenen Emissionsfaktoren der Stromerzeugungsanlagen, wie zum Beispiel für Photovoltaik 66,73 g/kWh (Lauf et al. 2019). Die Berechnungen zeigen, dass der Einsatz einer Wärmepumpe zunächst mehr CO<sub>2</sub>-Emissionen als die herkömmlichen Kühltechnologien erzeugt. Grund dafür ist der höhere Strombedarf für den Betrieb.

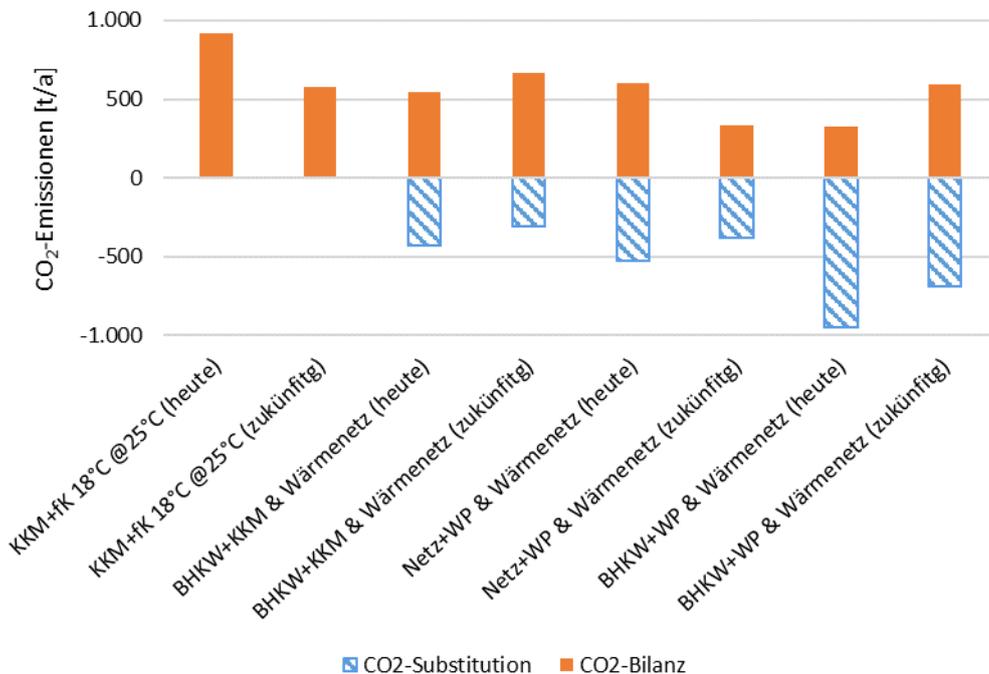


Abbildung 92: Vergleich CO<sub>2</sub>-Emissionen bei heutigem gegenüber zukünftigen Strommix (474 g/kWh vs. 300 g/kWh)

Wenn man jedoch betrachtet, welche Wärmebedarfe im Wärmenetz durch das Rechenzentrum gedeckt werden können, ergibt sich, dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen, die substituiert werden können (hellblau schraffierter Balken in Abbildung 92), höher sind als die durch den Betrieb der Wärme entstehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass aus nachhaltiger Sicht im

gesamtökologischen Kontext, der Einsatz einer Wärmepumpe erfolgen sollte. Für die Einspeisung in das Wärmenetz wurde eine Substitution von 206,5 g/kWh entsprechend (Agentur für Erneuerbare Energien 2020) angenommen. Der Einsatz eines BHKW ist nach aktuellen Gesichtspunkten nur sinnvoll, wenn dessen Wärme ebenfalls in ein Wärmenetz eingespeist wird. Ansonsten sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen höher als die durch den Strombezug vom öffentlichen Netz entsprechenden CO<sub>2</sub>-Emissionen. Für die Untersuchungen wurde eine CO<sub>2</sub>-Emission von 512 g/kWh, was aus dem zuvor ermittelten Wirkungsgrad von 39,2 % und den CO<sub>2</sub>-Emissionen von 201 g/kWh (Icha 2019) entspricht, angenommen. Der Einsatz eines BHKWs schneidet bei einer Verbesserung des deutschen Strommixes (siehe Abbildung 92) oder auch die Inanspruchnahme von PPAs vergleichsweise schlechter ab. Mit dem Blick auf schwankende Erzeugungsleistungen wäre der Einsatz eines BHKWs jedoch aus der Sicht der Versorgungssicherheit weiterhin beachtenswert. Mit ihnen könnten Dienstleistung, wie das Anbieten von Regelleistung zur Netzstabilisierung, vermarktet werden. Die Einspeisung der Wärme in ein Wärmenetz würde bei einer zukünftigen Senkung der substituierbaren CO<sub>2</sub>-Emissionen (150 g/kWh in den zugrundeliegenden Berechnungen des folgenden Diagramms) geringerer ausfallen.

### 5.7 Wirtschaftliche Analyse der Wärmepumpe

Das Szenario 3 aus Kapitel 5.4.4 mit Wärmepumpe ist die vielversprechendste Lösung aus technischer Sicht für ein Rechenzentrum, das sich innerhalb einer Stadt befindet und bei dem die Möglichkeit der Wärmenetzeinbindung in der Umgebung besteht. Der Aspekt, mit welchen politischen Mitteln Szenario 3 ökonomisch attraktiv gemacht werden kann, wird im Folgenden diskutiert. Ein Vergleich zwischen dem Einsatz der Kompressionskältemaschine (Referenz RZ) und alternativ der Wärmepumpe (Szenario 3), wie in Abbildung 93 dargestellt, soll hier beispielhaft entsprechend der Daten in

Tabelle 31 zur Lösungsfindung beitragen. Es gibt derzeit einen Zuschuss von der Bundesregierung in Höhe von bis zu 40 % für Investitionen zur Wärmerückgewinnung (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle 2019). Ohne den Zuschuss würden die Investitionskosten für eine Wärmepumpe in Höhe von 1.000 €/kW und pauschal mit 20.000 € für die Wärmenetzintegration angenommen. Dies summiert sich auf 270.000 Euro Investitionskosten für ein Wärmepumpensystem. Im Vergleich dazu werden für diese Gegenüberstellung Investitionskosten für ein KKM-System mit 280 €/kW eingesetzt, was etwa 70.000 € entspricht. Zusätzlich kommt noch die Differenz von 444 MWh zu Gunsten der KKM beim Stromverbrauch hinzu.

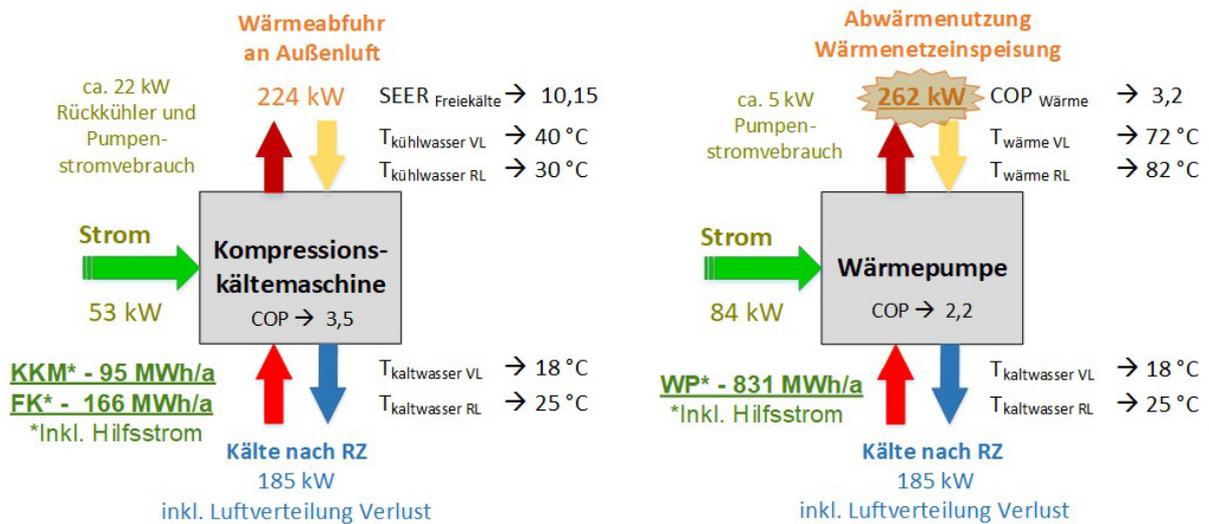


Abbildung 93: Vergleich KKM+FK Kühlung mit WP Kühlung

Tabelle 31: Kalkulation der Kosten für die Kältetechnik (250 kW)

	Referenz RZ	Szenario 3 WP	
<b>Investition</b>			
- Anlage	70.000 € (280 €/kW)	250.000 € (1.000 €/kW)	
- Wärmenetzintegration	-	20.000 €	
<b>Gesamtinvestitionskosten</b>	<b>70.000 €</b>	<b>270.000 €</b>	
<b>Stromkosten für Kälte</b>			
- Standard	66.564 €/a (172 €/MWh)	66.564 €/a (172 €/MWh)	
- Zusätzlich für Abwärmenutzung		76.368 €/a (172 €/MWh)	46.176 €/a (104 €/MWh)
<b>Erlöse</b>			
- Vergütung der Wärmenetzeinspeisung	-	82.592 €/a (32 €/MWh)	
<b>Kosten (Investition + Betrieb - Erlöse) nach</b>			
- 5 Jahren	402.820 €	571.700 €	420.740 €
- 10 Jahren	735.640 €	873.400 €	571.480 €
- 15 Jahren	1.068.460 €	1.175.100 €	722.220 €

Nach den Unterlagen des Karlsruher RZ, das durch den Projektpartner ITEOS betrieben wird, betrug im Jahr 2019 der Stromtarif für 17,2 Eurocent/kWh für das Rechenzentrum. Für die Wärmeeinspeisung ins Netz werden, wie bereits erwähnt, 0,032 €/kWh<sub>th</sub> als Einspeisevergütung angesetzt (Sandrock und Et. al 2016). Die Einnahmen aus dem Verkauf der Wärme würden somit ca. 82.600 €/a betragen. Die Stromkosten der WP betragen jedoch rund 143.000 €/a. Die gesamten erforderlichen Betriebskosten abzüglich der Einnahmen aus dem Wärmeverkauf für das WP-Szenario belaufen sich auf rund 60.300 €/a. Für das KKM+fK-Szenario würden die laufenden Kosten rund 66.600 €/a betragen. Die Differenz bei den Betriebskosten wäre demzufolge für das WP-Szenario geringer, aber die Differenz bei den Investitionskosten und Kapitalkosten muss ebenfalls berücksichtigt werden. Unter der Annahme, dass der Kälteerzeuger in beiden Szenarien nach 15 Jahren ersetzt werden müssen, kann selbst mit einem 40 %-Zuschuss bei der Erstinvestition für eine Wärmerückgewinnungsinvestition für die WP kein Break-Even Point erreicht werden und wird dazu führen, dass der RZ-Betreiber die KKM-Lösung der WP-Lösung vorziehen wird.

Es existieren verschiedene Möglichkeiten um die Abwärmenutzung im Rechenzentrumsbereich durch die Installation von Wärmepumpen zu ökonomisch attraktiver zu machen. Beispielsweise gibt es viele energieintensive Industriezweige, wie z.B. die Metallindustrie, Automobilhersteller usw., für die die Stromkosten gesenkt und die EEG-Kosten abgeschrieben werden. Die Rechenzentren fordern ebenfalls eine vollständige Befreiung des EEG. Die Gesetzeslage ist momentan jedoch, dass die Rechenzentren keine Produkthersteller, sondern eine Dienstleistungsbranche und daher nicht zur Befreiung der EEG-Kosten berechtigt sind. Es sollte jedoch in Betracht gezogen werden, dass Rechenzentren mit ihrem enormen Stromverbrauch nicht nur Energieverbraucher sind, sondern auch eine aktive Rolle bei der Energiewende spielen und durch die Nutzung ihres Abwärmepotentials zur Sektorkopplung im Energiebereich beitragen könnten.

Um abschätzen zu können, wie sich eine Subventionierung der Stromnutzung für Wärmepumpen auswirken würde, wurde eine kurze Folgenabschätzung durchgeführt. Eine Möglichkeit ist die Installation eines separaten Zählers für den Stromverbrauch der Wärmepumpe und die vollständige

Erfassung der EEG-Kosten für diesen Zähler. Dies würde dem Rechenzentrum einen ökonomischen Vorteil verschaffen, da es seine Kühlung zu sehr niedrigen Kosten erhält und dann zusätzlich für die Wärme die Einspeisung in das Wärmenetz vergütet bekommt.

Das könnte ein zu großer Wettbewerbsvorteil für RZ sein. Es könnte daher in Betracht gezogen werden, dass nur die Differenz im Stromverbrauch durch die Abschreibung der EEG-Umlage subventioniert werden könnte. Dies würde bedeuten, dass die ursprünglichen 387 MWh Strom, die im Referenzfall für die Kühlung benötigt wurden, um die KKM-Kühlung mit 0,172 €/kWh bezahlt werden und der erhöhte Stromverbrauch von 444 MWh für den Einsatz einer WP nur mit 0,104 €/kWh bezahlt werden müsste. Dies würden die jährlichen Betriebskosten der Wärmepumpe im Fall 'mit EEG-Umlage' von 60.400 €/Jahr auf 30.200 €/Jahr senken. In diesem Fall kann die Amortisationszeit auch ohne die Förderung der Wärmerückgewinnung auf 6 Jahre verkürzt und eine Win-Win-Situation für alle Beteiligten geschaffen werden.

## 5.8 Kosten der CO<sub>2</sub>-Vermeidung

Rechenzentren verbrauchen Strom und erzeugen Abwärme. CO<sub>2</sub>-Emissionen aufgrund des Rechenzentrumsbetriebs können vermieden werden durch Bezug von nachhaltiger erzeugtem Strom. Weiterhin kann über die Abwärmenutzung eine CO<sub>2</sub>-Gutschrift aufgrund von vermiedener CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Wärmebereitstellung in einem Wärmenetz (oder ähnlichem Abnehmer) erreicht werden. Allerdings ist ggf. eine Wärmepumpe notwendig, um das Temperaturniveau anzupassen. Schließlich kann über die zeitweise Strombereitstellung über ein BHKW der Strombezug zu Zeiten vermieden werden, bei denen weder Solarenergie noch Windkraft in ausreichender Menge zur Deckung des Strombedarfs zur Verfügung stehen. Der Einsatz solcher Technologien ist immer mit Kosten, die bei einem herkömmlichen Rechenzentrum nicht auftreten, verbunden. Dazu zählen sowohl Anschaffungs- als auch Betriebskosten der Anlagen. Mehrkosten, die bei einem Betrieb dieser Anlagen im Vergleich zu konventionellen Anlagen entstehen, können als die Kosten, die für die CO<sub>2</sub>-Vermeidung notwendig sind, definiert werden.

Tabelle 32: Annahmen zur Ermittlung der Kosten der CO<sub>2</sub>-Vermeidung für das Szenario 3

Szenario	Referenz RZ	Szenario 3 WP		
Vergütungsmodell	keine Vergütung	nur Wärme-einspeise-vergütung	Wärmeeinspeise-vergütung und verringerte EEG-Umlage	verringerte Wärmeeinspeise-vergütung und CO <sub>2</sub> -Vermeidungsumlage
Investition				
- Anlage	70.000 € (280 €/kW)		250.000 € (1.000 €/kW)	
- Wärmenetz-integration	-		20.000 €	
Gesamtkosten	70.000 €		270.000 €	
Stromkosten für Kälte				
- Standard	66.564 €/a (172 €/MWh)		66.564 €/a (172 €/MWh)	
- Abwärmenutzung		76.368 €/a (172 €/MWh)	46.176 €/a (104 €/MWh)	76.368 €/a (172 €/MWh)
Erlöse				
- Wärmenetz-einspeisung	-		82.592 €/a (32 €/MWh)	64.525 €/a (25 €/MWh)
- CO <sub>2</sub> -Vermeidung				30.972 €/a (12 €/MWh)

Szenario	Referenz RZ	Szenario 3 WP		
Vergütungsmodell	keine Vergütung	nur Wärme-einspeise-vergütung	Wärmeeinspeise-vergütung und verringerte EEG-Umlage	verringerte Wärmeeinspeise-vergütung und CO <sub>2</sub> -Vermeidungsumlage
Kosten (Investition + Betrieb - Erlöse) nach:				
- 5 Jahren	402.820 €	571.700 €	420.740 €	507.175 €
- 10 Jahren	735.640 €	873.400 €	571.480 €	744.350 €
- 15 Jahren	1.068.460 €	1.175.100 €	722.220 €	981.525 €

Im besten Fall entsteht lediglich eine Erhöhung von Investitionskosten und eine Reduktion von Betriebskosten, die sich im Laufe einer Amortisationszeitraum ausgleichen und damit CO<sub>2</sub>-Vermeidung ohne Kosten nach der Amortisationszeit. Im Beispiel von Abbildung 93 amortisiert sich die Anschaffung einer Wärmepumpe zur CO<sub>2</sub>-Gutschrift durch Abwärmenutzung innerhalb von 6 Jahren (siehe orangene Kurve in Abbildung 94). Dabei wurde angenommen, dass die Wärme für 3,2 ct/kWh<sub>th</sub> vergütet wird und der zusätzlich benötigte Wärmepumpenstrom von der EEG-Umlage befreit ist. Ohne Freistellung von der EEG-Umlage müsste für eine Amortisationszeit von etwa 10 Jahren (siehe blaue Linie in Abbildung 94) die Wärme mit 3,7 ct/kWh<sub>th</sub> vergütet werden.

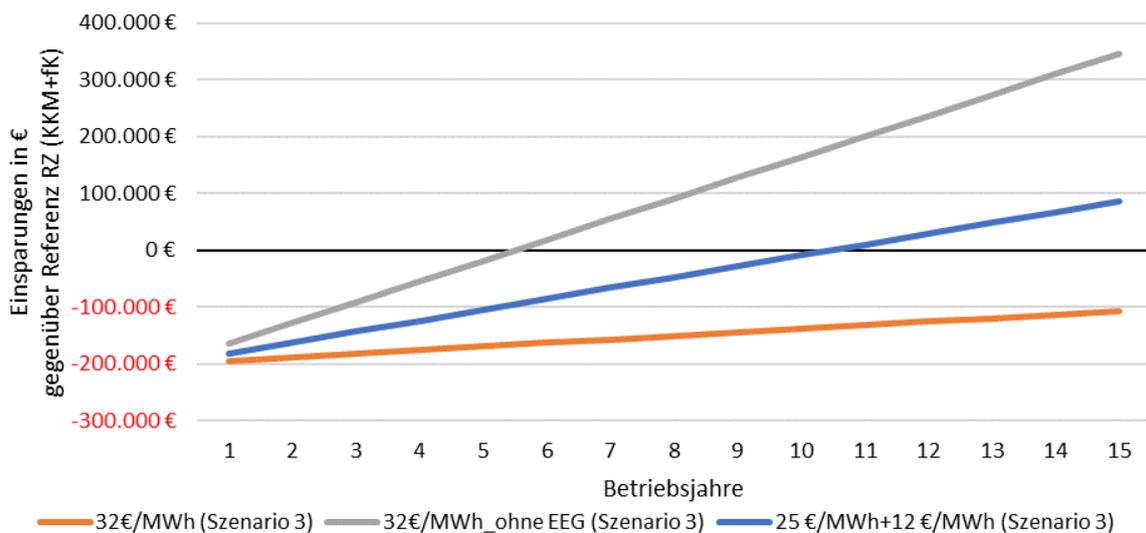


Abbildung 94: Vergleich der Einsparungen für verschiedene Vergütungsmodelle des Szenario 3 (WP Kühlung) gegenüber dem Referenz RZ (KKM+fK).

Bei einer reduzierten Einspeisevergütung in das Wärmenetz von nur 2,5 ct/kWh<sub>th</sub>, müsste der Differenzbetrag in Form einer Vergütung in Höhe von 1,2 ct/kWh<sub>th</sub> gedeckt werden. Diese Vergütung wäre gleichzusetzen mit CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten und betragen 58 €/t<sub>CO2</sub> (entsprechend Formel 45) unter der Annahme, dass die Wärmeeinspeisung den Bezug von fossilem Gas für die Wärmeerzeugung eingespart. Die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten sind

CO<sub>2</sub> – Vermeidungskosten

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\text{Wärmenetzeinspeisung [MWh]} * \text{CO}_2\text{-Vermeidungsvergütung [€/MWh]}}{\text{vermiedene CO}_2\text{-Emissionen durch Wärmenetzeinspeisung [t]}} \\
 &= \frac{\text{Wärmenetzeinspeisung [MWh]} * \text{CO}_2\text{-Vermeidungsvergütung} \left[ \frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right]}{\text{Wärmenetzeinspeisung [MWh]} * \text{spezifische CO}_2\text{-Emissionen der Fernwärmeerzeugung} \left[ \frac{\text{t}}{\text{MWh}} \right]}
 \end{aligned}$$

$$= \frac{2581 \text{ MWh} * 12 \text{ €/MWh}}{2581 \text{ MWh} * 0,2065 \text{ t/MWh}}$$

$$= 58 \text{ €/t}_{CO_2}$$

Formel 45: Berechnung der CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten in €/tCO<sub>2</sub>

In Formel 45 wird deutlich, dass die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten nicht von der eingespeisten Energie in das Fernwärmenetz sondern nur von der CO<sub>2</sub>-Vermeidungsvergütung und den spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen der Fernwärmeerzeugung abhängen.

CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten durch Einsatz eines BHKWs hängen ebenso von vielen Einflussgrößen ab. Diese sind einerseits der Unterschied der Stromgestehungskosten des BHKWs im Vergleich zum Netzstrom, der wiederum von regulatorischen Einflüssen, wie dem KWK-Zuschlag, die Vergütung der vermiedenen Netzentgelte und der EEG-Umlage, sowie dem Börsenstrompreis und den Brennstoffkosten abhängt. Eine detaillierte Betrachtung der CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten muss all diese Einflüsse transparent machen und würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Es ist allerdings in der derzeitigen politischen Diskussion angekommen, dass der Strompreis im Vergleich zu fossilen Energieträger durch zu viele Umlagen belastet wird und daher erschwert, dass der Stromsektor bei der Dekarbonisierung des Wärmesektors wirtschaftlich unterstützen kann. Daher ist es augenblicklich schwer ohne zusätzliche Anreize Rechenzentren zu zusätzlichen Investitionen zu bewegen, die zur CO<sub>2</sub>-Vermeidung beitragen.

## 6. Praxistransfer

In diesem Kapitel sollen im Projektverlauf gewonnene Erkenntnisse und Methodiken, wo die Rahmenbedingungen und Möglichkeiten dies zulassen, auf Fälle aus der Praxis angewandt werden.

Es wird versucht, aus gegebenen Infrastrukturdaten mögliche Hemmnisse ausfindig zu machen und Verbesserungsvorschläge für den Rechenzentrumsbetrieb abzuleiten. Infrastrukturdaten hierfür konnten, in beschränktem Umfang, von einem Hochleistungsrechner aus dem universitärem Umfeld, einer Cloud Infrastruktur aus dem universitärem Umfeld und einer hybriden Cloud-/Enterprise Architektur aus einem kommunalen Rechenzentrum gewonnen werden.

Das in Kapitel 3 entwickelte Werkzeug zur Bewertung von Rechenzentrumsstandorten in Baden-Württemberg wird auf alle 27 in Kapitel 2.1 untersuchten Rechenzentren mit insgesamt 11 verschiedenen Standorten angewendet. Eine statistische Analyse gibt Aufschluss über die Güte der gewählten Standorte und welchen Standortkriterien die untersuchten Rechenzentrumsbetreiber eine höhere Priorität zuordnen.

Es werden erforschte Potenziale und Hemmnisse im Rechenzentrumsbetrieb diskutiert und evaluiert. Dabei zeigt sich, dass es nicht ein Patentrezept für ein optimal ausgelegtes Rechenzentrum gibt, sondern dies immer abhängig vom Anwendungsfall und den finanziellen Ressourcen ist.

Es werden Differenzierungsmerkmale eines typischen Bestandsrechenzentrums, eines modernen Referenz-Rechenzentrums und eines virtuellen, optimierten Rechenzentrums dargestellt. Bei dem typischen Bestandsrechenzentrum wird von einem Rechenzentrum im Bereich von 10 Bestandsjahren ausgegangen (ca. alle 20 Jahre Neubau), das Referenz-Rechenzentrum entspricht dem Fall eines nach heutigen Möglichkeiten errichtbaren Rechenzentrums und das virtuelle Rechenzentrum entspricht einem Prototyp, welcher sich nach Ausschöpfen aller technischen und regulatorischen Möglichkeiten ergeben könnte und im Projekt erforschte Optimierungspotenziale integriert.

Schließlich soll noch ein selbst entwickeltes Werkzeug zum Messen der Performanz und elektrischer Leistungsaufnahme einer typischen Webapplikation auf Server-Level unter vorgegebener Last vorgestellt werden. Dieses Werkzeug steht unter einer Open-Source Lizenz und ist somit frei verfügbar. Der Einsatz dieser Software-Lösung ist generisch gehalten, besitzt ein erweiterbares Design und ist weitestgehend automatisiert aufsetzbar. Voraussetzung sind lediglich das Vorhandensein einer

Openstack<sup>4</sup> Cloud-Lösung und einer Prometheus<sup>5</sup> Monitoring-Instanz. Die genannten Technologien sind State of the art Lösungen und weitverbreitet, können jedoch bei entsprechender zukünftiger Erweiterung der Software auch durch andere Plattformen ersetzt werden.

Zum Schluss werden die Ergebnisse diskutiert und zusammengefasst.

## 6.1 Analyse von Infrastrukturdaten

Für das Projekt konnten Infrastrukturdaten von drei Rechenzentren gewonnen werden. Der Kandidat aus dem industriellen Umfeld entschloss sich kurzfristig, dagegen, Daten für das Projekt bereitzustellen. Eine genaue Aufschlüsselung der Art der Daten ist in Tabelle 30 zu finden. Wie zu sehen ist, unterscheidet sich die Informationsmenge zwischen den Rechenzentren. Außerdem wurde auch immer nur ein Teil der Infrastrukturdaten zur Verfügung gestellt, was beispielsweise bedeutet, dass nicht die Auslastung aller Komponenten wie Prozessor-, Netzwerk- oder Speicherkomponenten zur Verfügung stand. Zusammen mit den Daten aus Kapitel 2.1, die zwar keine Messwertzeitreihen darstellen, jedoch allgemeine Informationen über den Rechenzentrumsbetrieb liefern, ließen sich dennoch einige Schlüsse hinsichtlich möglicher Verbesserungspotenziale ziehen.

	Auslastung der Komponenten	Strom	Wärme- und Kältebedarf
Hochleistungsrechner	✓	✓	✓
Hochschul-RZ	✓	✓	✗
Kommunales RZ	✗	✓	✓
Industrielles RZ	✗	✗	✗

Tabelle 33: Verfügbare Infrastrukturdaten

An dieser Stelle ist es sinnvoll, vorab folgende in den kommenden Abschnitten verwendete, jedoch dort nicht näher erläuterte, Begriffe zu definieren:

**x-factor:** Der x-factor kann für ein Server-Modell angegeben werden und bezieht sich auf eine prozentuale Veränderung der Ausfallwahrscheinlichkeit wenn die Einlaßtemperatur von 20°C abweicht. Ein Wert von 1,25 bedeutet, dass sich die Ausfallwahrscheinlichkeit um 25 % erhöht, wohingegen ein Wert von 0,75 bedeutet, dass sich die die Ausfallwahrscheinlichkeit um 25 % erniedrigt.

**Deployment (IT):** Das Software Deployment nach (Williams 2020) umfasst alle Prozesse, die zur Bereitstellung einer Softwareanwendung für die Ausführung und den Betrieb in einer bestimmten Umgebung erforderlich sind. Es umfasst die Installation, Konfiguration, das Testen und das Vornehmen von Änderungen, um die Leistung der Software zu optimieren. Es kann entweder manuell oder über automatisierte Systeme durchgeführt werden.

**Containerisierung (IT):** Containerisierung nach (Pahl 2015) ist die leichtgewichtige Verteilung paketierter (containerisierter) Anwendungen mit dem Ziel das Deployment und Management der Anwendungen zu verbessern und stärker zu automatisieren. Notwendig dafür ist eine leichtgewichtige Laufzeitumgebung (Software-Schicht) und die Möglichkeit die Container untereinander zu verbinden.

**Microservices (IT):** Microservices sind nach (Alshuqayran et al. 2016) ein Architekturstil, bei dem der Schwerpunkt auf der Aufteilung des Systems in kleine und leichte Dienste (e.g. Container) liegt, die speziell für eine stark zusammenhängende Geschäftsfunktion entwickelt wurden.

<sup>4</sup> <https://www.openstack.org/>

<sup>5</sup> <https://prometheus.io/>

**Health-check (IT):** Nach (RedHat OpenShift 2020) bieten health-checks Optionen zum Erkennen und Behandeln von Fehlern in Softwarekomponenten (e.g. Containern) wie vorübergehender Verbindungsverlust, Konfigurationsfehler oder Probleme mit externen Abhängigkeiten.

**Pod (IT):** Ein pod kapselt einen oder mehrere Container zu einer funktionalen Einheit.

**Virtualisierte Komponente (IT):** Nach (vmware 2020) werden im Zuge von Virtualisierung softwarebasierte virtuelle bzw. virtualisierte Komponenten erstellt, z.B. virtuelle Anwendungen, Server, Storage-Ressourcen und Netzwerke. Unabhängig von der Unternehmensgröße ist dies die effektivste Methode, um IT-Ausgaben zu reduzieren und zugleich Effizienz und Agilität zu steigern.

**Planer (IT):** Nach (Rouse 2020) ist ein Anwendungs bzw. Job Planer ein Programm, mit dem ein Unternehmen Compute-Jobs, e.g. die Ausführung eines Gehaltsabrechnungsprogramms plant und in einigen Fällen überwachen kann. Ein Job Planer kann Jobs automatisch initiieren und verwalten, indem er vorbereitete Jobsteuerungs-Sprachanweisungen verarbeitet oder durch eine gleichwertige Interaktion mit einem menschlichen Nutzer.

### 6.1.1 Niedrige Einlasstemperaturen

Eine Erhöhung der Server-Einlasstemperatur stellt einen starken Hebel hinsichtlich der Steigerung der Energieeffizienz dar. Simulationseingangsdaten aus Abschn. 5.2.1 zufolge kann beispielsweise eine Erhöhung der Einlasstemperatur von 18°C auf 22°C in der Region Stuttgart zu einem Mehr von ca. 1000 Freikühlstunden pro Jahr führen. Der Verzicht auf den Betrieb der Kältemaschine in dieser Zeit führt zu Energieeinsparungen in der Größenordnung von 60 MWh und zu einer Verringerung des CO<sub>2</sub> Ausstoß bei vorausgesetztem Strombezug entsprechend dem deutschen Strommix in der Größenordnung von 28 Tonnen.

Vielerlei Gründe erschweren es Rechenzentrumsbetreibern die Einlasstemperaturen zu erhöhen. Zum einen kann es mit Kunden abgeschlossene Service-Level-Agreements (SLAs) geben, die dies verbieten, bspw. im Falle von Colocation-Betreibern. Auch können langfristig abgeschlossene SLAs oder verschiedene Interessensgruppen im Rechenzentrumsbetrieb ein Hemmnis für eine Temperaturerhöhung darstellen. Des Weiteren können Beschränkungen wie ein für alle Komponenten ausgelegter Kühlkreislauf in Verbindung mit heterogenen IT-Komponenten einer Temperaturerhöhung im Wege stehen, da dies zur Folge hat, dass die Komponente mit den restriktivsten thermischen Bedingungen die maximale Einlasstemperatur bestimmt. Allgemein gilt die Aussage, dass auf Rack-Ebene die Einlasstemperatur immer durch die Komponente mit den restriktivsten thermischen Bedingungen beschränkt wird.

Natürlich erhöht sich, statistisch gesehen, die Ausfallwahrscheinlichkeit der Komponenten im Betrieb mit steigenden Einlasstemperaturen. Laut ASHRAE-Norm TC9.9 (ASHRAE 2016) kann der sogenannte x-factor als numerischer Wert zur Abschätzung einer solchen Wahrscheinlichkeit herangezogen werden. Nach dieser Norm würde sich der x-factor bei einer Temperaturerhöhung von 20°C auf 25°C von 1 auf 1,25 erhöhen. Dies bedeutet, dass sich die Ausfallwahrscheinlichkeit relativ um 25 % erhöhen würde. Bei einer üblichen Ausfallwahrscheinlichkeit von, konservativ geschätzt, 4 % bei einem Betrieb bei 20°C über das Jahr gesehen (Niemann 2017) würde sich die Gesamtwahrscheinlichkeit lediglich um 1 % erhöhen. Des Weiteren sollte berücksichtigt werden, dass Server im Regelfall nach ca. 4 Jahren ausgetauscht und beispielsweise Netzwerk-Komponenten in den meisten Fällen bei mehr als 10°C höheren Temperaturen betrieben werden können, wie bspw. die Produkte in (CISCO 2018) zeigen. Diese Zahlenwerte und Überlegungen verdeutlichen, dass eine Risikoabwägung bzgl. einer Erhöhung der Einlasstemperaturen sicherlich lohnenswert ist, wenn die Erhöhung der Energieeffizienz im Mittelpunkt steht. würde. Bei einer üblichen Ausfallwahrscheinlichkeit von, konservativ geschätzt, 4 % bei einem Betrieb bei 20°C über das Jahr gesehen (Niemann 2017), würde sich die Gesamtwahrscheinlichkeit lediglich um 1 % erhöhen. Des Weiteren sollte berücksichtigt werden, dass Server im Regelfall nach ca. 4 Jahren ausgetauscht und beispielsweise Netzwerk-Komponenten in den meisten Fällen bei mehr als 10°C höheren Temperaturen betrieben werden können, wie bspw. die Produkte in (CISCO 2018) zeigen. Diese Zahlenwerte und Überlegungen verdeutlichen, dass eine Risikoabwägung bzgl. einer Erhöhung der Einlasstemperaturen sicherlich lohnenswert ist, wenn die Erhöhung der Energieeffizienz im Mittelpunkt steht.

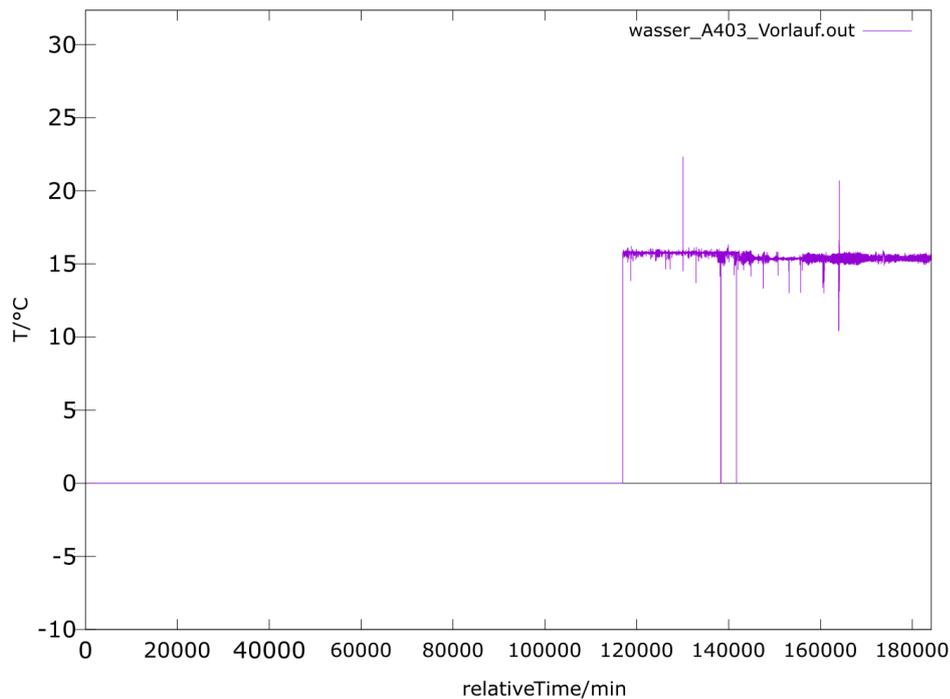


Abbildung 95: Vorlauftemperatur bei rea door cooling

Wie in dem Verlauf in Abbildung 95 zu sehen, liegt in dem untersuchten Rechenzentrum die Einlasstemperatur im Bereich von 17°C. Die ASHRAE-Norm definiert ihren ‚recommended‘ Bereich zwischen 18 °C und 27 °C. Theoretisch wäre somit eine Anhebung im Bereich von 10 °C möglich. Für den untersuchten Standort würden sich dadurch zusätzliche Freikühlstunden im Bereich von 1000 pro Jahr ergeben. Eine Analyse möglicher Amortisationsdauern bei Umstrukturierung der Infrastruktur oder der IT-Komponenten sollten den potenziellen Einsparungen durch die Erhöhung der Freikühlstunden entgegengesetzt werden. Der Vollständigkeit halber sei hier erwähnt, dass im vorliegenden Fall die Spreizung, d.h. der Temperaturunterschied zwischen der Eingangs- und Ausgangstemperatur bei ungefähr 10 °C, also ca. 27 °C liegt. Des Weiteren ergibt sich die anfängliche Nulllinie aus der Tatsache, dass der Temperatur-Sensor in diesem Zeitbereich zwar kalibriert war, jedoch das Daten-Aggregationswerkzeug die Messwerte nach 9 Monaten verwirft. Die darauffolgenden sehr vereinzelt Ausreißer nach 0 °C hängen mit einem kurzfristigen Ausfall der Messtechnik des Sensors zusammen, wohingegen die vereinzelt relativ starken Schwankungen um den 18 °C Bereich mit einer temporären Übersteuerung der Temperaturregelung (bspw. nach einem kurzfristigen Stromausfall nach einem Blitzeinschlag) zusammenhängen.

### 6.1.2 Niedriger Automatisierungsgrad beim Software-Deployment

Die Datenanalyse ergab, dass das Software Deployment und die Lastverteilung in vielen Fällen noch teilautomatisiert bzw. manuell geschieht. Es wird empfohlen, unter Umständen auch mit Hilfe von Dritten oder unter Bezug einer ‚As-A-Service‘ Dienstleistung in der Cloud, ein modernes Werkzeug, welches diese Funktion automatisiert, einzusetzen. Abhängig von der Art der Applikation stehen verschiedene Lösungen bereit. Für klassische monolithische Applikationen gibt es Werkzeuge wie bspw. JuJu<sup>6</sup>, wohingegen für moderne containerisierte ‚Microservice Applikationen‘ Lösungen wie Kubernetes<sup>7</sup> State of the art sind. Über Beschreibungs-Dateien (Helm-Charts) können in Kubernetes Applikationen und Ressourcenabhängigkeiten beschrieben werden und Applikationseigenschaften wie Hochverfügbarkeit über e.g. ‚health-checks‘ und eine Auto-Skalierung über sogenannte pods gewährleistet werden. Zusammengefasst bietet ein höherer Automatisierungsgrad beim Software-Deployment folgende zwei Hauptvorteile:

<sup>6</sup> <https://juju.is/>

<sup>7</sup> <https://kubernetes.io/>

- Stabilerer Betrieb der Software-Applikationen, da dadurch fehleranfällige, sich wiederholende, manuelle Konfigurationen vermieden werden.
- Freiwerdende Ressourcen, da Konfiguration und Deployment der Software-Applikationen nicht mehr manuell durchgeführt werden.

### 6.1.3 Niedrige CPU-Auslastungen

Alle untersuchten Rechenzentren besaßen durchschnittliche CPU-Auslastungen im Bereich zwischen 10 % bis 20 %. Genaue Mittelwerte sind in folgender Tabelle zu finden. Zusätzlich lagen hier Daten aus einem in Kapitel 2.1 untersuchten Rechenzentrum vor.

Tabelle 34: Durchschn. CPU Auslastung der untersuchten Rechenzentren

	Ø-CPU-Auslastungen in %	Anmerkung
Hochschul-RZ	15,37 %	Berechnung aus vorliegender Messwertzeitreihe
Kommunales RZ	18 %	Berechnung aus Messwertzeitreihe (nicht vorliegend)
Kommunales RZ (AP1)	12,43 %	Berechnung aus Messwertzeitreihe (nicht vorliegend)

Wie in Kapitel 3.5.1 betont, erhöht eine höhere CPU-Auslastung den Leistungsindikator ‚IT-Auslastung (ITEU)‘ und sollte daher aus Sicht eines nachhaltigen Betriebs immer angestrebt werden. Untermuert wird diese Empfehlung durch ein im Allgemeinen höheres „Performance to Power Ratio“ bei höheren Auslastungen, worauf in Kapitel 6.3.1 näher eingegangen wird. Gründe für die Unterauslastung der CPUs in den untersuchten Fällen waren eine in Bezug auf die Nutzeranzahl zu groß ausgelegte Serverkapazität und eine ungünstige Verteilung der virtualisierten Komponenten auf die physischen Server. Abhilfe hier könnte der effizientere Einsatz von in den IT-Plattformen integrierten Planern zum Verteilen der virtuellen Ressourcen auf die Server leisten. Diese Planer könnten dahingehend angepasst werden, dass sie ihre Verteilungsstrategie stärker auf eine Konsolidierung der virtuellen Ressourcen auf die Server ausrichten. Auch Werkzeuge wie ‚Kubernetes‘ besitzen einen solchen integrierten Planer und könnten dahingehend angepasst werden. Des Weiteren ist immer zu einer sorgfältigen, erweiterbaren Kapazitätsplanung zu raten, welche die Serveranzahl an der kurz- bzw. mittelfristig zu erwartenden Nutzeranzahl ausrichtet.

## 6.2 Anwendung des Standort Bewertungsinstrumentarium auf ausgewählte Fälle

Das in Kapitel 3 entwickelte Instrumentarium zur Standortbewertung soll nun auf Praxisbeispiele angewandt werden. Dafür werden die 27 in Kapitel 2.1 untersuchten Rechenzentren mit insgesamt 11 verschiedenen Standorten untersucht. Es wird eine statistische Analyse betrieben und eine Bewertung hinsichtlich nicht ausgeschöpfter Potenziale bei der Standortwahl gegeben

### 6.2.1 Resultate

In Tabelle 35 ist die Auswertung der Ergebnisse zusammengefasst. Standorte wie Stuttgart wurden von mehreren untersuchten Rechenzentren besetzt und werden in der Auswertung entsprechend stärker gewichtet. Wie in Abbildung 2 gezeigt, sind die Standorte relativ gleichmäßig im Bundesland verteilt und erlauben somit ein differenzierteres Bild für die Auswertung. Als Referenzwerte sind für jedes Rating die jeweils maximal für einen Standort möglichen Werte in der letzten Zeile eingetragen. Dies soll der Orientierung zur Abweichung des einzelnen Standortwerts bzw. des aggregierten Mittelwerts zu diesem Referenzwert dienen.

<b>RZ Nummer</b>	<b>Standort</b>	<b>Ökol. Rating</b>	<b>Soziales Rating</b>	<b>Ökon. Rating</b>
1-11	Stuttgart	43	97	69
12-17	Karlsruhe	33	95	75
18-19	Ulm	48	81	69
20	Neckarsulm	30	68	75
21	Tübingen	40	64	52
22	Göppingen	41	89	83
23	Freiburg	37	55	42
24	St. Leon-Rot	28	82	70
25	Friedrichshafen	48	73	59
26	Baden-Baden	34	90	50
27	Schwäbisch Hall	34	61	42
	Mittelwert	39,22	88,19	67,41
	Standardabweichung	5,87	12,92	9,98
	Max. Wert	67,5	96,73	94,49

*Tabelle 35: Anwendung des Bewertungsinstrumentariums auf ausgewählte Standorte*

### 6.2.2 Evaluation der Resultate

Zunächst sei angemerkt, dass die Maximalwerte der drei Unterkategorien für alle drei Nachhaltigkeitssäulen (ökologisch, sozial, ökonomisch) so gewählt wurden, dass ihre Summe jeweils den Wert 100 ergibt. Wichtig zu wissen ist, dass die maximalen Werte der jeweiligen Unterkategorien in allen drei Fällen nicht an einem Standort erreicht, sondern an drei verschiedenen Standorten erreicht werden. Bspw. liegen im Falle der ökonomischen Nachhaltigkeit die Maximalwerte für ‚Strompreis‘, ‚Breitbandverfügbarkeit‘ und ‚Höhe der Steuern‘ an drei verschiedenen Standorten, wobei der Standort „Kommune Heddesheim“ den Maximalwert bezogen auf einen einzelnen Standort von 94,49 erreicht. Dieser Sachverhalt soll exemplarisch für die ökonomische Nachhaltigkeit in nachfolgender Tabelle dargestellt werden. Gab es mehrere Standorte, an denen derselbe maximale Wert erreicht wurde, wurde der erste Standort nach alphanummerischer Namen-Sortierung gewählt. Für die

Berechnung der einzelnen Werte der Unterkategorien sei auf die Formeln in Kapitel 3.12.1.1, 3.12.1.2, 3.12.1.3 und die finalen Gewichtungen in Kapitel 3.12.2 verwiesen.

Tabelle 36: Kommunen mit den höchsten ökonomischen Ratings. Bezogen auf Unterkategorien und Gesamtsumme der Unterkategorien

Ökonom. Rating				
Kommune, max.	Steuern (Ste)	Strompreis (Str)	Breitbandverf. (Bv)	Summe
<u>Unterkategorien:</u> Achberg (Ste), Emmendingen (Str), Aichelberg (Bv)	16	37	47	100
<u>Gesamt:</u> Heddesheim	16	33	45	94

Der Mittelwert für das ökologische rating hat, relativ gesehen, den größten Abstand zum Maximalwert (41,9 %) und weist somit auf einen trade-off hin, der ökonomische (Abweichung 28,66 %) und soziale (Abweichung 8,83 %) Kriterien bei der Standortwahl zu bevorzugen scheint. Dies scheint auch im Einklang mit den qualitativen Erfahrungen zu stehen, dass Wärmeabnahmen und Wärmesenken, Stichwörter Abwärmenutzung und Kühlung durch fließende Gewässer bislang eine untergeordnete Rolle spielen. Außerdem wurden auch viele Rechenzentren untersucht, die in ihrer Standortwahl eingeschränkt sind wie Hochschul- oder kommunale Rechenzentren und somit hauptsächlich von dem Standortfaktor ‚Kundennähe‘ getrieben werden. Zusammengefasst spielen ökologische Faktoren nicht so eine große Rolle wie ökonomische und soziale Faktoren. Die relativ geringe Abweichung des Mittelwerts der ‚sozialen Standortkriterien‘ vom Maximalwert legt den Schluss nahe, dass für die untersuchten Rechenzentren Faktoren wie ‚Verkehrsanbindung‘, ‚Kundennähe‘ und ‚Verfügbarkeit von Fachpersonal‘ eine ausschlaggebende Rolle bei der Standortwahl zu spielen scheinen.

### 6.3 Hemmnisse und nachhaltige Optimierungspotenziale im Rechenzentrumsbetrieb

Im Laufe des Projekts kristallisierten sich verschiedene Potenziale und Hemmnisse heraus, die ein Rechenzentrumsbetreiber identifizieren und abhängig von seinen spezifischen Rahmenbedingungen umsetzen beziehungsweise beheben sollte. Konkreter gefasst, die sich aus dem Technologiemic in Kapitel 4 und anschließender Potenzial Evaluation in Kapitel 5 ergebenden Optionen, die einen *kurz- bis mittelfristigen Umsetzungshorizont in der Praxis* haben werden hier diskutiert und erweitert. Mittel- bis langfristig ist im Sinne der Nachhaltigkeit ein Betrieb anzustreben, der die in Kapitel 3 definierten Leistungsindikatoren und Standortfaktoren, bezogen auf den Anwendungsfall, maximiert. Die in folgendem Abschnitt diskutierten Verbesserungsoptionen haben in vielen Fällen eine direkte Verbindung zu den im Projekt definierten Leistungsindikatoren. Neu dazu kommen in diesem Abschnitt die beiden für die Praxis essenziellen Parameter der Anwendungsperformanz und Verfügbarkeit. Prinzipiell sollen praxisrelevante Potenziale und Hemmnisse aus den beiden Bereichen ‚IT‘ und ‚Infrastruktur‘ diskutiert werden, wobei für jeden Bereich eine einfach handhabbar und messbare Zielfunktion zu Grunde gelegt werden soll.

Im Falle der ‚IT‘ sollte abstrakt gesprochen das Produkt aus durchschnittlich verbrauchter Energie und Laufzeit eines Anwendungsprozesses, definiert als ‚Energy Delay Product‘ (EDP) (Merkel et al. 2010) minimiert werden:

$$EDP = \bar{E}_{Runtime} * T_{Runtime}$$

Formel 46: Definition des Energy-Delay-Products

In der Praxis heißt das, dass die Abarbeitung der Anwendungen im Rechenzentrum besonders schnell bei gleichzeitig niedrigem Energieverbrauch erfolgen sollte. Abhängig vom Anwendungsfall können hier mit den Nutzern abgeschlossene Verträge (SLAs) oder die Möglichkeit Prozesse zeitlich zu verschieben die Laufzeit beeinflussen. Einfluss auf die verbrauchte Energie kann abhängig von den finanziellen Möglichkeiten energieeffiziente Hardware oder abhängig von zugesicherter Ausfallsicherheit redundant vorgehaltene IT-Komponenten haben.

Im Falle der Infrastruktur kann die PUE, definiert in Abschn. 3.4.1.1 als passender Indikator für besagtes Verhältnis angesehen werden. Abhängig vom jeweiligen Anwendungsfall kann ein Rechenzentrumsbetrieb auch bei erhöhter PUE als energieeffizient und nachhaltig angesehen werden, wenn beispielsweise eine erhöhte Verfügbarkeitsklasse vorliegt oder, wie in Abschn. 5.4.4 beschrieben, die Kühlung exklusiv mit Hilfe einer Wärmepumpe betrieben wird. Im ersten Fall ist ein erhöhter Infrastruktur Energieverbrauch unabdingbar, da, um eine erhöhte Ausfallsicherheit sicherzustellen, redundante Komponenten installiert sein müssen. Im zweiten Fall wird der erhöhte Energieverbrauch, bei korrekter technischer Realisierung, durch den ökologischen und ökonomischen Mehrwert überkompensiert.

Die in den folgenden Abschnitten diskutierten Hemmnisse und Potenziale sollten daher aus Sicht des Rechenzentrumsbetreibers immer als mögliche Stellschrauben angesehen werden, die bezogen auf den Anwendungsfall und Rahmenbedingungen, nachjustiert werden können mit dem Ziel den Betrieb energieeffizienter und nachhaltiger zu gestalten ohne die von den Kunden erwarteten Leistungen zu opfern. An dieser Stelle soll noch erwähnt werden, dass in Kapitel 7.3 weitere Handlungsempfehlungen ausgesprochen werden. Diese beziehen sich jedoch nicht wie hier auf den technischen Detail-Bereich, sondern vielmehr auf eine ganzheitliche Optimierung verschiedener Einflussbereiche aller an der Errichtung von Rechenzentren beteiligten Interessensvertretern (e.g. aus der Politik).

Vorab wird eine kompakte Abhandlung der in den folgenden Abschnitten benutzten aber dort nicht näher definierten Begrifflichkeiten gegeben:

**On-premise (IT):** Nach (IONOS 2020) bedeutet on-premise die Nutzung unternehmenseigener Server und der eigenen IT-Umgebung.

**Big Data (IT):** Nach (Gartner Inc. 2020a) handelt es sich bei Big Data um hochvolumige, schnelle und / oder vielfältige Informationsressourcen, die kostengünstige, innovative Formen der Informationsverarbeitung ermöglichen, welche verbesserte Einblicke, Entscheidungsfindung und Prozessautomatisierung ermöglichen.

**Robustheit (IT):** Nach (IEEE 1990) ist die Robustheit einer Softwarekomponente der Grad, bei welchem sie bei außergewöhnlichen Eingaben oder belastenden Umgebungsbedingungen ordnungsgemäß funktioniert.

**Server-Cluster:** Der Begriff Server-Cluster steht äquivalent für einen Verbund mehrerer Rechenzentrums Server.

**I/O-Operation (IT):** Eine I/O-Operation bezeichnet im Allgemeinen den Vorgang des Lesens bzw. Schreibens von Daten, bspw. vom Arbeitsspeicher auf eine Festplatte.

**Anomalie (IT):** Nach (Noble und Cook 2003) ist eine Anomalie das Auftreten eines überraschenden oder ungewöhnlichen Ereignisses.

**Metrik (IT):** Metriken sind in der IT Messgrößen bestimmter Parameter aus dem operativen Betrieb wie bspw. die CPU-Auslastung oder Geschwindigkeiten der Lüfter in Servern.

**GPU:** GPU steht für ‚Graphical Processing Unit‘ und entspricht einer speziellen Prozessorart, die nach (Intel 2020) für die parallele Verarbeitung entwickelt wurde und in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt wird (Grafik- und Video-Rendering, Gaming und künstliche Intelligenz).

### 6.3.1 Hemmnisse und nachhaltige Optimierungspotenziale im IT-Bereich

In diesem Abschnitt sollen typische Hemmnisse im IT-Bereich identifiziert und mögliche Lösungs- bzw. Verbesserungspotenziale aufgezeigt werden. Bevor die einzelnen Problemfelder diskutiert werden, soll eine kompakte Darstellung in folgender Tabelle erfolgen:

Problemfeld	Optimierungspotenzial
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ineffizient arbeitenden Netzteile</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Netzteile mit Energieeffizienz Label</li> <li>• Bessere Abstimmung zwischen IT- und Infrastrukturpersonal beim Einkauf</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gruppieren von IT-Komponenten mit unterschiedlichen Wärmelastgrenzen im selben Rack</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gruppieren von IT-Komponenten mit ähnlichen Wärmelastgrenzen im selben Rack</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ineffiziente Nutzung von Virtualisierungskonzepten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anwendung moderner Cloud-Paradigmen:           <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Elastizität</li> <li>◦ Autoskalierung</li> <li>◦ Überbuchung</li> <li>◦ Hochverfügbarkeit</li> <li>◦ Live-Migration</li> </ul> </li> <li>• Teilweise Auslagerung der IT an große Cloud-Provider</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geringe Serverauslastungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einsatz ‚smarter‘ Anwendungs-Orchestrierung</li> <li>• Verbesserte Anwendungsverteilung bzw. Planung</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ineffizient genutzte Speicherhierarchie (vertikal)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einsatz heterogener Speichermedien</li> <li>• Speicherung auf unterschiedlichen Medien abh. von Zugriffshäufigkeit und Dringlichkeit</li> <li>• Softwaregestütztes Speichermanagement</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ineffizient genutzte Speicherhierarchie (horizontal)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Software zum räumlich nahen Platzen der Daten an der Verarbeitungsenke</li> <li>• Deduplizierungssoftware</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rudimentäre Überwachung der IT-Infrastruktur</li> <li>• Entstehung von ‚Zombie-Servern‘</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einsatz moderner Software-Werkzeuge zur vollumfassenden Überwachung der IT</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einsatz energieineffizienter Hardware</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einkauf energieeffizienter bzw. energieeffizient zertifizierter Hardware</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verschrottung überholter IT-Komponenten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Refurbishment, unter Umständen mit Hilfe eines externen Dienstleisters</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geringe Kühleffizienz auf Server Ebene</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einsatz flüssiggekühlter Servermodelle</li> </ul>

Ein Problem, welches inhärent mit der Definition der PUE verbunden ist, ist die Beschaffung von Servernetzteilen. Da die elektrische Leistungsaufnahme von Netzteilen dem Stromverbrauch der IT zugeordnet wird, kann bei ineffizient arbeitenden Netzteilen (i.e. niedriger Wirkungsgrad) die PUE sogar nach unten gedrückt werden. Dies steht jedoch im Widerspruch zur Maxime des energieeffizienten Rechenzentrumsbetriebs. Es wird empfohlen, energieeffizient zertifizierte Netzteile, e.g. mit ‚80 Plus label‘, in den Einkaufsrichtlinien zu berücksichtigen, auch wenn dies in einem vermeintlichen Widerspruch zur Energieeffizienz zu stehen scheint (Erhöhung PUE).

Oft werden IT-Komponenten inhomogen, was ihre Wärmelastgrenzen angeht, in Racks gruppiert. Dies bedeutet, dass die Komponente, welche die restriktivsten Bedingungen hat, die Einlasstemperatur bestimmt. Der ASHRAE TC9.9 Standard lässt prinzipiell Spielraum zwischen 18 °C - 27 °C Einlasstemperatur, der im Falle ineffizient verteilter IT-Komponenten ungenutzt bleibt und somit indirekt die Bilanz an potenziellen Freikühl Stunden verschlechtert. Des Weiteren besteht dieses Problem ganz allgemein, wenn nur ein Kühlkreislauf zur Verfügung steht, da dann unabhängig von der Verteilung der Komponenten in den Racks die Einlasstemperatur durch mögliche Altlasten nach unten beschränkt wird. Das Gruppieren der IT-Komponenten in Racks sollte derart erfolgen, dass Komponenten mit ähnlichen bis gleichen thermischen Lastgrenzen in denselben Racks untergebracht werden. Reihen-

bzw. rackbasierte Kühlverfahren ermöglichen in diesem Falle ein zielgenaues, feingranulares Temperaturlösung.

Aufgrund erhöhter Flexibilität oder einfacherer Wartbarkeit sind Virtualisierungskonzepte heute bereits State of the art im Rechenzentrumsbetrieb, jedoch werden diese Konzepte oft nicht effizient genutzt. Im Extremfall wird eine virtuelle Maschine statisch auf einem physikalischen Server betrieben, womit genau genommen sogar ein Nachteil gegenüber einer ‚on-premise Lösung‘ besteht, bei der die Anwendung direkt „auf dem Blech“ läuft und sogar eine bessere Performanz aufweist. Es fehlt somit an Flexibilität und Konsolidierungsmechanismen, die einerseits zur Energieeffizienz- als auch zur Performanzsteigerung beitragen können. Um die Virtualisierung effizienter zu gestalten gibt es viele Methodiken, die sich vor allem im Zusammenhang mit dem Aufkommen von Cloud-Computing Paradigmen entwickelt haben. Stichworte sind in diesem Zusammenhang Elastizität und Auto-Skalierung. Unter Elastizität versteht man die Fähigkeit von virtuellen Ressourcen, e.g. virtuellen Maschinen, sich der anfallenden Last dynamisch anzupassen, d.h. mit steigender Last werden weitere virtuelle Ressourcen generiert, um die gesteigerte Anfrage auf mehrere Ressourcen verteilen zu können. Die somit neu entstandenen virtuellen Ressourcen sollten zunächst auf so wenigen physikalischen Servern wie möglich konsolidiert werden. Dies eröffnet neben dem Vorteil des gezielten Abschaltens nicht benutzter Server die Möglichkeit den Server stärker zu belasten. Daraus ergibt sich zum einen das Potenzial den im Allgemeinen flacheren Verlauf der el. Leistungsaufnahme bei höheren Serverlasten auszunutzen. Zum anderen hat dies den einfachen energetischen Vorteil, dass die Grundlast bei höheren Auslastungen weniger Anteil am Gesamtenergieverbrauch besitzt. Formal ergibt sich mit:

$E_0$  : Grundlast  
 $E_{var}(L)$  : Von der Last L abhängiger variabler Energieanteil

und

$$E_{var}(L_1) < E_{var}(L_2), \quad \text{für } L_1 < L_2$$

*Formel 47: Vergleich variabler Serverenergieverbräuche für verschiedene Lasten*

der Zusammenhang:

$$\frac{E_0}{E_0 + E_{var}(L_2)} < \frac{E_0}{E_0 + E_{var}(L_1)}, \quad \text{für } L_1 < L_2$$

*Formel 48: Vergleich des relativen Anteils der Grundlast am Gesamtenergieverbrauch eines Servers für verschiedene Lasten*

Abbildung 96 verdeutlicht diese Zusammenhänge.



Abbildung 96: El. Leistung und Performanz-Leistungs-Verhältnis bezogen auf die Last eines Server Modells nach (SPEC 2019)

Beide Möglichkeiten (Server Abschaltung, Konsolidierung) eröffnen große Spielräume zur Energieeinsparung. Kommt es auf den höher ausgelasteten Servern in der Folge zu Performanz-Einbußen sollten im Sinne eines elastischen Virtualisierungsmanagement wieder virtuelle Maschinen von dem Server abgezogen und auf weniger ausgelasteten Servern platziert werden. Geht die Lastnachfrage in der Folge wieder nach unten, können die temporär generierten Ressourcen eingespart und wieder vernichtet werden. Unter Auto-Skalierung versteht man die Automatisierung dieses Prozesses. Die Konsolidierung der virtuellen Ressourcen hat neben der Einsparung der Grundlasten nicht genutzter Server, welche sich im Bereich von 40 % der Spitzenenergieaufnahmen bewegen, den Vorteil bei der Planung mit weniger Servern und damit weniger Serverraumfläche auszukommen, was sehr hohe finanzielle Einsparungen ermöglicht (Investitionskosten im Bereich von ca. 10.000 Euro pro m<sup>2</sup> Serverraumfläche bei einem TIER3 (i.e. Verfügbarkeitsklasse 3) Rechenzentrum (Gruchot 2015a), siehe dazu auch die Diskussion in Kapitel 2.3.1. Eine weitere noch restriktivere Methodik zur Konsolidierung besteht in der Überbuchung von Ressourcen, welche bereits in Kapitel 5.3 angesprochen wurde. Dabei werden mehr virtuelle Ressourcen auf einem physikalischen Server konsolidiert als eigentlich möglich ist. Stellt ein Server beispielsweise 16 CPUs und 32 GB Ram zur Verfügung, könnte dieser mit zwei virtuellen Maschinen mit jeweils 12 CPUs und 16 GB Ram überbucht werden. Kalkül dahinter ist, dass die virtuellen Ressourcen in den aller seltensten Fällen alle ihnen auf dem physikalischen Server zugeteilten Ressourcen voll ausnutzen. Eine Plattform für die Umsetzung von Cloud-Paradigmen ist beispielsweise die freie Software ‚Openstack‘. Diese Software ist führend im Bereich der ‚Private-Cloud‘ und unzählige andere proprietäre Cloud-Lösungen wie bspw. die Open-Telekom Cloud setzen auf Openstack auf. Für Methodiken wie Auto-Skalierung oder Hochverfügbarkeit der Anwendung hat sich die Softwarelösung ‚Kubernetes‘ auf dem Markt durchgesetzt. Kubernetes lässt sich beispielsweise auf Openstack aufgesetzt betreiben und ermöglicht eine Anwendung robust und hochverfügbar zu konfigurieren und verteilt auf einem Server-Cluster auszurollen. Plattformen zum grünen Betrieb der IT-Ressourcen haben, was den heutigen Stand betrifft, noch keine große Marktdurchdringung erlangt und sind hauptsächlich im wissenschaftlichen Umfeld zu finden (Dhiman et al. 2009). Zusammengefasst lässt sich die Empfehlung aussprechen, sich mit erwähnten modernen Virtualisierungskonzepten auseinanderzusetzen und diese in Abhängigkeit der gegebenen Rahmenbedingungen, auch mit Hilfe von Drittanbietern, zu implementieren. Im Sinne der Aussage in der Einleitung zu Kapitel 6 sollte das Ziel sein, ein Virtualisierungsmanagement zu betreiben, welches ein ausbalanciertes Maß an hoher Verfügbarkeit bzw. Performanz der Anwendungen und einem energieeffizienten Betrieb gewährleistet.

Eine weitere Option im Bereich Virtualisierung ist, Teile der IT-Infrastruktur an große internationale Cloud-Dienstleister auszulagern. Als Empfehlung kann hier nur die auf den Einzelfall bezogene

sorgfältige Prüfung des Nutzens einer solchen Migration ausgesprochen werden. Auf der einen Seite sind deren Rechenzentren führend im Bereich Energieeffizienz und Infrastrukturadministration. Auf der anderen Seite stehen unter Umständen hohe Kosten, rechtliche und Datenschutzfragen (Stichwort DSGVO und US CLOUD Act) sowie ein nicht notwendigerweise nachhaltiger Betrieb der eigenen IT-Ressourcen.

Mit ineffizienten Virtualisierungskonzepten gehen oft auch geringe Serverauslastungen einher, da virtuelle Maschinen nicht effizient auf vorhandene physikalische Server verteilt werden. Durch fehlende Konsolidierung entstehen dem Betreiber sowohl höhere Betriebskosten durch höhere Server Energieaufnahmen als auch höhere Investitionskosten durch eine Überdimensionierung der Serverraumfläche.

Oft wird die Speicherhierarchie ineffizient genutzt. D.h. Daten werden teils manuell ohne intelligente Software-Unterstützung unflexibel auf festen Blöcken abgelegt, teils lokal oder über einen Netz-Speicher. Auch die Speichermedien sind nicht auf die Art der Daten angepasst, d.h. Daten die sehr häufig oder nur sehr selten genutzt werden, werden auf dem selben Medium (e.g. Hard-Disk-Drives) abgelegt, was zu ineffizienten Energieverbräuchen und Performanzwerten führen kann. Das Platzieren der Daten kann von intelligenten Software-Lösungen dadurch unterstützt werden, dass Daten beispielsweise nahe am Ort der Verarbeitung abgespeichert werden, was sich positiv auf die Performanz auswirkt. Beispiel hierfür ist das Software framework *Spark*<sup>8</sup>, welches hauptsächlich im Umfeld von Big-Data Anwendungen zum Einsatz kommt. Des Weiteren gibt es Software-Lösungen zum Platzieren, Konsolidieren und Deduplizieren von Daten, welche Potenziale zu Energieeinsparungen bieten. Beispiele hierfür wären auf dem Markt erhältliche Lösungen von NEC<sup>9</sup> oder Hitachi<sup>10</sup>.

Verschiedene Speichermedien eignen sich zur Ablage verschiedener Daten besser oder schlechter. Prinzipiell lassen sich Daten auf Hard-Disk-Drives (HDDs), Solid-State-Drives (SSDs), Magnetbändern oder einer hybriden Lösung ablegen. Im besten Fall geschieht dies vollautomatisiert derart, dass häufig und performant benötigte Daten auf schnellen, teuren SSDs, weniger häufig und weniger kritisch benötigte Daten auf HDDs und sehr selten, e.g. archivierte Daten, auf langsameren, energieeffizienten Magnetbändern abgelegt werden. SSDs sind im Allgemeinen energieeffizienter als HDDs, jedoch auch teurer. Bestimmte HDDs sind mit variabler Lüfterfrequenz ausgestattet, welche sich der vorliegenden Last (i.e. I/O-Operationen) anpasst, womit in gewissem Maße Energie eingespart werden kann. Magnetbänder stellen die energieeffizienteste Variante dar. Es wird empfohlen, ein effizientes, softwaregestütztes Speichermanagement mit hohem Automatisierungsgrad zu betreiben. Im Speziellen sollten, abhängig von geforderten Zugriffszeiten und Häufigkeiten, ‚heiße Daten‘ auf schnellen, teuren SSDs, ‚warme Daten‘ auf HDDs mit variablen Lüfterfrequenzen und Rotationsgeschwindigkeiten und ‚kalte Daten‘ auf langsameren, energieeffizienten Magnetbändern platziert werden. Dateninseln sollten vermieden und stattdessen ein globaler, rollenbasierter, hochverfügbarer Datenzugriff ermöglicht werden.

Die Infrastruktur und die IT werden oft nur rudimentär überwacht. Problemfälle, sei es beispielsweise im IT Netzwerkverkehr oder an einer PSU werden somit häufig zu spät erkannt und behoben, was zu Problemen in der Verfügbarkeit und IT-Sicherheit führen kann. Nach der Analyse in (Koomey und Taylor 2017) wurden im Betrieb 10 ausgewählter US-amerikanischer Rechenzentren mit 16000 installierten Servern 25 % der untersuchten Server als sogenannte ‚Zombie-Server‘ identifiziert. Zombie-Server sind dadurch definiert, dass sie keinerlei externe Kommunikation zu anderen IT-Komponenten aufweisen und außer Stromverbrauch keine Funktionalität aufweisen. Durch eine ungenügende Überwachung der Infrastruktur werden diese Server oft spät oder gar nicht erkannt. All die genannten Probleme sind mit einer Verschwendung von monetären und Energieressourcen verknüpft. Heutzutage gibt es Möglichkeiten, die Infrastruktur und die IT vollumfassend zu überwachen. Beispiele des nützlichen Einsatzes wären das genannte Detektieren von Anomalien im

---

<sup>8</sup> <https://spark.apache.org/>

<sup>9</sup> <https://www.necam.com/storage/M-Series/Software/NECStoragePerforOptimizer/>

<sup>10</sup> <https://www.hitachivantara.com/go/hvsp/assets/pdf/hitachi-solution-profile-virtualized-tiered-storage.pdf?source=hds-redirect>

Netzwerk, Überlastungen einzelner Server, Springen von Sicherungen oder die Lokalisierung von ‚Zombie-Servern‘. Auf Infrastrukturseite gibt es eine Vielzahl an schlüsselfertigen Lösungen in Form eines DCIM (Data Center Infrastructure Management) Werkzeugs. Wie bereits in Abschn. 4.1.3.3 erläutert sind DCIMs Systeme, um sowohl die Verwaltung, Überwachung und Planung der Gebäudeinfrastruktur wie auch die der IT-Komponenten zu erfassen. Beispiele für Hersteller moderner DCIMs sind Nylte<sup>11</sup> oder speedikon FM<sup>12</sup>. Auf IT-Seite gibt es weitere spezielle Überwachungswerkzeuge wie Nagios<sup>13</sup> oder Prometheus. Mit Hilfe dieser Werkzeuge kann über eine Vielzahl von Metriken die IT-Infrastruktur vollumfassend überwacht und frühzeitig auf Störfälle oder Anomalien reagiert werden. Um Stör- oder Problemfälle in der Infrastruktur oder auf IT-Seite rechtzeitig zu erkennen wird empfohlen für beide Bereiche die diskutierten passenden Werkzeuge zu verwenden.

Auf Serverseite gibt es die Möglichkeit des Einkaufs energieeffizienter Modelle. Energy-Star zertifizierte Server-Modelle<sup>14</sup> müssen bestimmte Anforderungen aus den Bereichen der Effizienz der Stromversorgung, des Stromverbrauch im Idle-Betrieb und der Messbarkeit bestimmter Parameter erfüllen, wie detailliert in Abschn. 4.1.3.1 dargelegt. Mit Ablauf des ‚European Energy Star Programme‘ im Februar 2018 (JRC 2020) ist es für auf dem europäischen Markt zugelassene Enterprise-Server Typen nicht mehr möglich diese Zertifizierung zu erhalten. Des Weiteren hat dies zur Folge, dass hier vertriebene Geräte, aufgrund unterschiedlicher Versorgungsspannungen in Nordamerika und der EU, mit in den USA nach dem Energy-Star zertifizierten Geräten hinsichtlich typischer Stromverbräuche nicht mehr verglichen werden können. Bis zum Inkrafttreten eines neuen europaweiten Zertifizierungsprogramms hinsichtlich Energieeffizienz kann als Empfehlung lediglich eine hinreichend genaue Produktanalyse und ein Anforderungsabgleich auf dem Markt verfügbarer Servermodelle ausgesprochen werden. Viele Anbieter von Enterprise-Servern haben mittlerweile eigene auf den Bereich Energieeffizienz zugeschnittene Produkt-Familien<sup>15</sup>, deren Modelle als potenzielle Kandidaten in den Einkaufsentscheidungen berücksichtigt werden sollten.

In Anlehnung an die Erhöhung des Leistungsindikators MRR sollte ein sogenanntes ‚Refurbishment‘ überholter Komponenten aus Nachhaltigkeitsgründen immer in Betracht gezogen werden. In vielen Fällen stellt sich diese Option im Rahmen des Datenschutzes und eigener Betriebsvorgaben als schwierig dar. Sind jedoch die Voraussetzungen erfüllt, sollte für die Weiterverwendung der Komponenten ein zertifiziertes, und bei Vorliegen rechtlicher Verpflichtungen, DSGVO-konformes Datenlöschverfahren verwendet werden. Dabei stellt das Auslagern der beaufsichtigten Durchführung dieser Löschverfahren und der anschließende Weitervertrieb durch einen externen Dienstleister eine sinnvolle Option dar.

In Laptops und Spielcomputern kommt die Flüssigkeitskühlung immer häufiger zum Einsatz. Zu kühlende Komponenten sind hier meist die CPU oder auch die GPU. Gründe sind eine hohe Kühleffizienz, mehr Performanz oder auch weniger Geräusche. Neben flüssig gekühlten Servermodellen kommen nun auch flüssigkeitsgekühlte Server-Racks für Rechenzentren auf den Markt. Ein zusätzlicher Vorteil der Flüssigkeitskühlung für Rechenzentren sind die höheren Temperaturniveaus von 50 °C – 75 °C abhängig von der Verwendung von einphasigem Kältemittel oder einem Zweiphasen-Tauchkühlverfahren. Beide Optionen erhöhen das Potenzial zur direkten Nutzung der Abwärme erheblich. Des Weiteren kann das Medium aufgrund der hohen Temperatur, auch bei fehlender Abwärmenutzung, das ganze Jahr problemlos direkt mit freier Kühlung gekühlt werden. Auf der anderen Seite muss natürlich auch berücksichtigt werden, dass eine Flüssigkeitskühlung die technische Komplexität erhöht und den Betrieb erschwert. Als ein Punkt seien hier zusätzlich zu installierende Flüssigkeitsrohre an der Rückseite der Racks genannt, welche eine saubere Luftstromführung innerhalb der Racks erschweren. Für den jeweiligen Rechenzentrums-

---

<sup>11</sup> <https://www.nlyte.com/solutions/data-center-infrastructure-management-dcim/>

<sup>12</sup> <https://www.speedikonfm.com/project/dams-c/>

<sup>13</sup> <https://www.nagios.org/>

<sup>14</sup> [https://www.energystar.gov/products/data\\_center\\_equipment/enterprise\\_servers](https://www.energystar.gov/products/data_center_equipment/enterprise_servers)

<sup>15</sup> <https://www.fujitsu.com/de/products/computing/servers/primergy/energy-efficiency/>

anwendungsfall wird empfohlen eine Wirtschaftlichkeits- und Machbarkeitsanalyse durchzuführen, ob eine Investition in diese Technologie lohnenswert ist. Aufgrund besagter hoher Temperaturniveaus und der fortschreitenden Erkenntnis, dass eine Abwärmenutzung aus Gründen der Energie Sektorkopplung in Zukunft unverzichtbar sein wird, wird sich das Einsatzpotenzial dieser Lösung weiter erhöhen. Die Diskussion in Abschn. 5.4.3.2 zeigt jedoch, dass für das dort gewählte Szenario momentan eine Wasserkühlung noch keinen Sinn macht.

### 6.3.2 Hemmnisse und nachhaltige Optimierungspotenziale im Infrastrukturbereich

In diesem Abschnitt sollen typische Hemmnisse im Infrastruktur-Bereich identifiziert und mögliche Lösungs- bzw. Verbesserungspotenziale aufgezeigt werden. Wie im vorherigen Abschnitt soll, bevor die einzelnen Problemfelder diskutiert werden, eine kompakte Darstellung in folgender Tabelle erfolgen:

Tabelle 37: Hemmnisse und Potenziale im Infrastrukturbereich

Problemfeld	Optimierungspotenzial
<ul style="list-style-type: none"> <li>Zu niedrig angesetzte Server-Einlasstemperaturen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ausschöpfen vom Hersteller maximal zulässiger und innerhalb der ASHRAE Norm (&lt;27°C) liegender Einlasstemperaturen</li> <li>Bessere Abstimmung zwischen IT- und Infrastrukturpersonal bei der Temperaturlauslegung</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Ineffiziente, raumbasierte Kühlverfahren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Einhausungen</li> <li>Warm-, Kaltgänge</li> <li>CRAC bzw. CRAH Installationen abhängig von Größe und künftigen Kapazitätsplanungen des RZ</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Zu groß dimensionierte USV</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Modulare USV mit aktivem Management</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Ineffiziente Stromverteilung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Smarte PDU</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Keine Abwärmenutzung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kühlung und Temperaturerhöhung durch Wärmepumpe</li> <li>Anbindung an Nah-, Fernwärmenetz</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Bezug erneuerbarer Energien:               <ul style="list-style-type: none"> <li>In geringem Umfang durch eigene Anlagen</li> <li>Durch intransparentes Zertifikatssystem</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bezug über PPAs</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Veraltete Klimatechnikkomponenten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lüftungs- und Klimatechnikkomponenten mit höherer Wärmetauscherleistung und Rückkühlerleistung</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Ineffizienter Einsatz der NEA</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bereitstellung von NEA Kapazität an Netzbetreiber</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Zu hohe Laufzeiten der Kompressionskältemaschine</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Intensivere Nutzung der freien Kühlung</li> </ul>

Server Einlass-Temperaturen werden oft zu niedrig angesetzt. Dies kann mehrere Gründe haben. Zum einen kann dies durch Beschränkungen aufgrund von Altlasten im IT-Bestand geschehen. Zum anderen können Service Level Agreements (SLAs), oft im Colocation Bereich, dies erzwingen. Weitere Gründe können eingeschränkte Garantiebestimmungen der Hersteller im Falle des Betriebs bei zu hohen Temperaturen sein oder ganz allgemein ein zu konservatives Denken der Infrastrukturverantwortlichen. All diese Einschränkungen hemmen den Umgang mit höheren Temperaturen in der Kühlinfrastruktur, was das Potenzial der Nutzung von Freier Kühlung einschränkt. Nach dem ASHRAE

Standard TC9.9 und den Normen VDI 2054 (VDI 2019) und DIN EN 50600-2-3 (Deutsches Institut für Normierung 2019) ist eine Zulufttemperatur zum Rack von maximal 27° C zulässig. Mit einer gut ausgelegten Architektur der Freien Kühlung kann bei 20° C Außenluft ein Wert von 25° C bis 27° C gut erreicht werden. Im Idealfall gehen im Rückkühler 2° C, im Wasser-Luft Wärmetauscher 2° C sowie in den Leitungen und vor der Pumpe 1-2° C verloren. Zur Steigerung der Kühleffizienz wird empfohlen, die Betriebsrahmenbedingungen derart zu gestalten, dass höchstmögliche Servereinlasstemperaturen ermöglicht werden.

Vor allem ältere Rechenzentren nutzen immer noch häufig ineffiziente raumbasierte Kühlverfahren, welche neben einer inhärenten Ineffizienz bei schlechter Auslegung zu thermischen hotspots führen können. Im Allgemeinen sind diese Kühlverfahren durch eine nicht saubere Kalt- Warmluft Trennung gekennzeichnet. Falls die Kaltluftverteilung über einen Doppelboden erfolgt, sollte zur Effizienzsteigerung vor allem bei größeren Rechenzentren Computer Room Air Handlers (CRAHs) einem einzeln installierten Computer Room Air Conditioner (CRAC) vorgezogen werden. Zum einen lassen sich mehrere CRAHs mit einer Kältemaschine verbinden, was die Flexibilität im Betrieb erhöht. Außerdem lässt sich durch diese Eigenschaft die Luft im Doppelboden gleichmäßiger verteilen, was die Energieeffizienz erhöht.

Verbesserte Lüftungs- und Klimatechnik Komponenten mit höherer Wärmetauscherleistung und Rückkühlerleistung bieten Optionen für Energieeinsparungen, da damit erhöhte Wärmeübertragungseffizienzen zwischen Außentemperatur und Server-Zulufttemperatur verbunden sind.

Als Daumenregel für den Einsatz eines vollständig geführten Kalt- bzw. Warmgangs im Serverraum wird ein Wert von mindestens 3 Racks mit einer durchschnittlichen Auslastung von mindestens 6 kW empfohlen, siehe auch die Resultate aus Abschn. 4.1.1. Ebenfalls dienen 40 kW IT-Leistung als Richtwert für den Einsatz Freier Kühlung (mit Hilfe eines Rückkühlers). Als Umschaltwert für die Freie Kühlung sollten mindestens 20 °C Außenlufttemperatur gewählt werden und zusätzlich eine Kompressionskältemaschine für die Kühlung in Sommerzeiten installiert werden. Leider wird häufig die Freie Kühlung unzureichend genutzt, obwohl diese in den Breiten Baden-Württembergs zu 75 % der Jahresstunden ausreichend ist.

Groß dimensionierte USV sind oft unflexibel und nicht feingranular betreibbar. Bei niedriger Gesamtlast ohne externes USV Management verschlechtert der ineffiziente Wirkungsgrad die Energiebilanz. Um die Effizienz der Stromversorgung zu steigern, kann die Beschaffung auf den Bedarf abgestimmter, modular dimensionierter USV mit aktivem Management und smarter, bestenfalls auf Rack-Ebene betriebener PDU in Betracht gezogen werden.

Abwärmenutzung spielt bei den allermeisten Rechenzentren in Baden-Württemberg noch keine Rolle. Ausnahmen bilden hier meistens vereinzelt High-Performance-Computing (HPC) Rechenzentren aus dem Hochschul-Bereich, die mit einer effizienten Warmwasserkühlung bspw. im Niedertemperaturbereich (40°/45° Vor-/Rücklauftemperatur) angrenzende Bürogebäude beheizen können. Hauptgründe für eine Unterlassung der Abwärmenutzung sind unter anderem im technischen (niedrige Rücklauftemperaturen), im ökonomischen (hohe Betriebskosten für mögliche Wärmepumpen) und im regulatorischen (keine zugesicherte Abnahme der Abwärme) Bereich zu finden. Als künftige Lösungsoption könnte ein möglicher Ersatz der Kompressionskältemaschine durch eine Wärmepumpe betrachtet werden. Der Einsatz der Wärmepumpe bringt in diesem Fall auch bei niedrigem Coefficient of Performance (COP) Vorteile durch die Erzeugung hochwertig nutzbarer Abwärme. Momentan erfordert es einen stärkeren Schub auf Seiten der Politik und die Bereitschaft der Wärmenetzbetreiber solche Abwärmenutzungsszenarien in der Praxis rentabel zu machen. Die Effizienz eines solchen Szenarios wurde eingehend in Kapitel 5.4.4 und 5.7 beschrieben.

Es findet wenig transparenter Bezug von Strom aus erneuerbaren Quellen statt. In vielen Fällen geschieht der Einkauf über Zertifikate, welche jedoch keine zugesicherte Bereitstellung einer Erzeugeranlage gewährleisten. Eine direkte Generierung von Strom aus erneuerbaren Quellen auf dem Rechenzentrums-Gelände, e.g. PV, findet zwar, wie die Datenauswertung in Kapitel 2.1 andeutete in manchen Fällen statt, von einem signifikanten Anteil zur Gesamtenergieabdeckung kann hier jedoch keine Rede sein, siehe auch die Ergebnisse aus Kapitel 5.4.4.1. Folglich kann der allgemeine

Strombezug auf Grundlage des deutschen Energiemixes (ca. 35 % Strom aus erneuerbaren Quellen, Stand Ende 2019<sup>16</sup>) grob abgeschätzt werden. Dies bedeutet, dass der CO<sub>2</sub> Footprint des genutzten Stroms im Allgemeinen hoch ist, da dieser größtenteils aus konventioneller Erzeugung stammt. Um einen nachhaltigen und transparenten Strombezug zu gewährleisten, besteht die Option, auch wenn in Deutschland noch in den Kinderschuhen steckend, des Einkaufs über sogenannte Power Purchase Agreements (PPAs). Prinzipiell geht es dabei um einen bilateralen Vertrag zwischen einem Rechenzentrumsbetreiber und einem Betreiber einer EE-Anlage (Wind, PV oder Wasserkraft), welche dem Abnehmer eine gesicherte Stromlieferung gewährleistet und auch rechtlich die Fälle abhandelt, falls dies temporär nicht möglich ist. Im Falle eines physischen PPAs geschieht der Stromfluss entweder über eine dedizierte Verbindung (on-site) oder, verbunden mit Netzentgelten, über das öffentliche Stromnetz (off-site). Im Falle eines synthetischen PPAs wird ein Energiedienstleister zwischen Erzeuger und Verbraucher zwischengeschaltet, der den erzeugten Strom mit in seine Bilanz aufnimmt, an der Strombörse handelt und in der Folge den Erzeuger bzw. Verbraucher dazu verpflichtet die anfallende Differenz an den anderen Partner auszuzahlen.

Ein weiteres künftiges Szenario könnte sein, den Netzbetreibern Kapazitäten der Netzersatzanlage (NEA) zur Verfügung zu stellen. Mit dem größeren Anteil fluktuierender erneuerbarer Energien im Stromnetz sind die Netzbetreiber ständig auf der Suche nach aktiven Marktteilnehmern, die mittels Sekunden- und Minutenreserveleistungen zur Stabilität des Netzes beitragen. Auf Wunsch des Netzbetreibers kann das Rechenzentrum helfen mit der NEA das Angebot im Netz zu stabilisieren

#### 6.4 Gegenüberstellung verschiedener Rechenzentren

Es sollen ein typisches Bestandsrechenzentrum, ein Referenz-Rechenzentrum, welches nach heutigem Stand der Technik gebaut werden kann und ein optimiertes, virtuelles Rechenzentrum miteinander verglichen werden. Typische Bestandsrechenzentren haben eine durchschnittliche Lebensdauer im Bereich von 20 Jahren, eine Austauschrate bei Servern im Bereich von 4 Jahren und bei Infrastrukturelementen wie USV im Bereich von 7 Jahren. Das Referenz-Rechenzentrum entspricht einem Kandidaten, welcher von einem deutschen Rechenzentrumsbauer heute prinzipiell errichtet werden kann. Das virtuelle Rechenzentrum vereint künftige Optimierungsoptionen, die im Laufe des Projekts erarbeitet wurden und zeigt mögliche Potenziale auf, die ausgeschöpft werden können, wenn gewisse Beschränkungen regulatorisch gelockert werden.

Ziel dieses Abschnitts ist es, die Ergebnisse des Projekts kompakt und möglichst anschaulich zusammenzuführen. Die Eigenschaften des Bestands- und Referenz-Rechenzentrums ergaben sich aus den Ergebnissen der Rechenzentrumslandschaft Bestandsaufnahme in Kapitel 2 (e.g. Schätzung der PUE, Entwicklung der Rechenzentrums-Größe) und der Bestandsaufnahme der Technologien in Kapitel 4 unter Berücksichtigung der diskutierten Hemmnisse in Kapitel 6.3. Außerdem wurden für den Großteil der in Kapitel 3.4 definierten Leistungsindikatoren qualitative Schätzwerte angegeben. Die Eigenschaften des Referenz-Rechenzentrums wurden des Weiteren mit den Erfahrungswerten des Konsortium-Partners ‚ICT Facilities‘ abgestimmt. Das optimierte Rechenzentrum wurde aufgrund der Erkenntnisse aus Kapitel 2.3.2 (e.g. Synergieeffekte durch ‚Right-Sizing‘) größer gewählt. Optimierte Infrastrukturauslegungen ergaben sich aus Kapitel 4.1 und bestmögliche Praktiken für den Betrieb der ‚IT‘ wurden aus den Erkenntnissen in Kapitel 4.1.3 und 6.3.1 entnommen. Für die optimale Konfiguration hinsichtlich Energiegewinnung, Abwärmennutzung und CO<sub>2</sub> Vermeidung wurde insbesondere auf die quantitativen Ergebnisse aus Kapitel 5.4.4 und 5.7 zurückgegriffen. Es wurde die Technologiekonfiguration aus Abschn. 5.6.2 gewählt, welche die Zielgröße der künftigen CO<sub>2</sub> Gesamtemissionen (unter Einbeziehung der CO<sub>2</sub> Substitution) minimiert.

$$CO_{2,min} = \min_{tech\_config} \{CO_2(tech\_config)\}$$

Formel 49: Zielgröße zur Konfiguration des optimierten RZ

<sup>16</sup> [https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Energie/Erzeugung/\\_inhalt.html](https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Energie/Erzeugung/_inhalt.html)

Dies entsprach der Kombination aus (künftigem) Netzstrom, Wärmepumpe, Wärmenetzintegration und optional flexibel angebundenem BHKW. Auch für den optimierten Fall wurden für den Großteil der in Kapitel 3.4 definierten Leistungsindikatoren qualitative Schätzwerte angegeben.

### 6.4.1 Bestandsrechenzentrum

Ein typisches Rechenzentrum mittlerer Größe hat heute 200 kW IT-Leistung und wird im besten Fall gekühlt mit einer Kombination aus Freier Kühlung und einer Kompressionskältemaschine. In Anlehnung an Kapitel 6.3 können als größte Hebel für die Nachhaltigkeit eines Rechenzentrums die Nutzung von Elektrizität aus Erneuerbaren Energien, die Abwärmenutzung, der Einsatz von effizienten IT-Komponenten und IT-Lösungen und die stetige hohe Auslastung der Komponenten angesehen werden.

Typische Eigenschaften eines solchen Rechenzentrums sind in Tabelle 38 und Tabelle 39 zu finden.

Tabelle 38: Eigenschaften eines Bestands Rechenzentrums

Steckbrief		
Energieinfrastruktur	Energiequellen und Abwärmenutzung	IT Technologien
<ul style="list-style-type: none"> <li>•IT Leistung: 200 kW</li> <li>•Kompressionskühlung</li> <li>•PUE: 1,7</li> <li>•Serverzuluft:20°C, Serverabluft: 35 °C</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Verwendung des deutschen Strommix</li> <li>•Keine Abwärmenutzung (ERF = 0)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Simple Virtualisierungstechniken (ohne Automatisierung)</li> <li>•Speicherhierarchie und –medien konventionell und unflexibel</li> </ul>

Tabelle 39: Qualitative Leistungsindikatorenbewertung des typischen Bestands Rechenzentrums

Bewertungsfaktoren		
Ökonomische Bewertung	Ökologische Bewertung	Soziale Bewertung
<ul style="list-style-type: none"> <li>•Investitionskosten      ++</li> <li>•Betriebskosten            --</li> <li>•Serverauslastung        --</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Energiebedarf            ++</li> <li>•CO<sub>2</sub>-Anteil                --</li> <li>•Abwärmenutzung        --</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Beschaffungsrichtlinien</li> <li>•Ausbildungsplätze</li> <li>•Fortbildungspläne für Mitarbeiter</li> </ul>

### 6.4.2 Referenz-Rechenzentrum

Ein Referenz-Rechenzentrum stellt den State of the art Fall dar. Typische Eigenschaften eines solchen Rechenzentrums sind in Tabelle 40 und Tabelle 41 dargestellt. Bzgl. der Energieeffizienz ist eine deutliche Steigerung gegenüber einem Bestandsrechenzentrum zu verzeichnen. Dies ist im Allgemeinen auf große Fortschritte im Bereich der Kühltechnik zurückzuführen, wie der konsequente Einsatz von Einhausungen (Trennung von Warm-, Kaltluftströmen) und Freier Kühlung. Ein PUE von 1,3 kann heute auch mit hochverfügbarem Design erreicht werden, obwohl der Trend einer immer effizienter arbeitenden Virtualisierung einer Verbesserung der PUE eigentlich entgegenwirkt. Das Problem der Nicht-Nutzung von Abwärme ist, wie bereits diskutiert, auch bei dem Referenz-Rechenzentrum nicht behoben

Tabelle 40: Eigenschaften des Referenz Rechenzentrums

Steckbrief		
Energieinfrastruktur	Energiequellen und Abwärmenutzung	IT Technologien
<ul style="list-style-type: none"> <li>•IT Leistung: 200 kW</li> <li>•Freie Kühlung und Kompressionskühlung</li> <li>•PUE: 1,3</li> <li>•Serverzuluft: 25 °C, Serverabluft: 40 °C</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Nutzung von Zertifikaten für EE-Strom</li> <li>•Keine oder geringe Abwärmenutzung für Büroheizung (ERF &lt; 0,1)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Teilautomatisierte, intelligente Virtualisierungstechniken</li> <li>•Heterogene Speichermedien und softwaregestützte Verwaltung</li> <li>•VM Konsolidierung, Abschalten von Zombie Servern</li> </ul>

Tabelle 41: Qualitative Leistungsindikatorenbewertung des Referenz Rechenzentrums

Bewertungsfaktoren		
Ökonomische Bewertung	Ökologische Bewertung	Soziale Bewertung
<ul style="list-style-type: none"> <li>•Investitionskosten +</li> <li>•Betriebskosten -</li> <li>•Serverauslastung +/-</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Energiebedarf +</li> <li>•CO<sub>2</sub>-Anteil +</li> <li>•Abwärmenutzung -</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Beschaffungsrichtlinien +</li> <li>•Ausbildungsplätze -</li> <li>•Fortbildungspläne für Mitarbeiter +</li> </ul>

### 6.4.3 Optimierte Rechenzentrum

Das optimierte Rechenzentrum legt seinen Hauptfokus auf eine technologische Konfiguration, welche die im Rechenzentrum entstehende Abwärme nutzbar macht. Wie in Kapitel 5.4.4 beschrieben, kann durch einen Ersatz der Kältemaschine durch eine Wärmepumpe und optimaler Auslegung die im Rechenzentrum entstehende Abwärme für ein Fernwärmenetz nutzbar gemacht werden. Im Rahmen eines nachhaltigen Energiesystems und der fortschreitenden Sektorkopplung ist es im Sinne aller Interessensgruppen die bei der Stromerzeugung bzw. Stromverbrauch entstehende Abwärme konsequent zu nutzen. Die PUE bezogen auf das Referenz-Rechenzentrum ist schlechter geworden, was durch den kontinuierlichen Einsatz der Wärmepumpe begründet ist. Jedoch lässt sich durch Einsatz dieser Technologie selbst bei Zugrundelegung des heutigen deutschen Strommix mehr CO<sub>2</sub> in Gesamtsumme einsparen als durch den Einsatz der Infrastruktur-Technologien des Referenz-Rechenzentrums. Im Folgenden soll noch ein quantitativer Blick auf die Potenziale der möglichen Abwärmenutzung geworfen werden.

Das diskutierte Bestandsrechenzentrum mit 200 kW IT-Leistung verbraucht im Jahr rund 1.473 MWh<sub>el</sub> Strom. Dies entspricht dem elektrischen Energiebedarf von rund 600 Haushalten, ohne deren Bedarf an Wärme. Die Energiemenge in kWh<sub>el</sub> an Strom, die ins Rechenzentrum fließt, steht „nach getaner Arbeit“ als thermische Energie (gemessen in kWh<sub>th</sub>) in Form von Abwärme auf einem Temperaturniveau von 35 bis 40 °C zur Verfügung.

Diese enorme Wärmemenge gilt es nutzbar zu machen. Die in Kapitel 5.4 durchgeführten Simulationen zeigen, dass eine Wärmepumpe aus der Abwärme des Rechenzentrums pro Jahr 2300MWh<sub>th</sub> an nutzbarer Wärme auf einem Temperaturniveau von 80 °C zur Einspeisung in ein Wärmenetz erzeugen kann. Würde man die Abwärme ganzjährig nutzen, werden für den Betrieb der Wärmepumpe zwar rund 640 MWh<sub>el</sub> mehr Strom benötigt als mit konventioneller Kältemaschinennutzung. Dadurch steigt

der PUE-Wert. Jedoch übersteigt der Gewinn durch einen positiven ERF den Verlust durch den erhöhten PUE.

Sofern die Abwärme auf einem niedrigeren Temperaturniveau genutzt werden kann, etwa in einem modernen Niedertemperaturwärmenetz, sinkt der Strombedarf der Wärmepumpe und dadurch die CO<sub>2</sub>-Belastung der entstehenden Nutzwärme. Die CO<sub>2</sub>-Belastung der entstehenden Nutzwärme ist selbst beim aktuellen deutschen Strommix deutlich geringer als durch die Wärmeerzeugung aus fossilen Brennstoffen und sinkt bei der Nutzung von erhöhten Anteilen an erneuerbarem Strom weiter.

Da es üblich ist in Rechenzentren Kältemaschinen redundant vorzuhalten, würde eine Kompressionskältemaschine neben der Wärmepumpe parallel installiert. Falls die entstehende Abwärme jahreszeitbedingt keinen Abnehmer findet, wird nicht die Wärmepumpe, sondern die Kompressionskältemaschine oder eine zusätzliche Freie Kühlung genutzt. Letztere kann mit geringerem Strombedarf die Abwärme des Rechenzentrums abführen.

Wird das Rechenzentrum zeitweise oder vollständig über ein Blockheizkraftwerk mit Strom versorgt, ist die Nutzung der Abwärme aus dem Blockheizkraftwerk, die mit rund 90°C anfällt, besonders wichtig um den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck für das Gesamtsystem zu senken.

Tabelle 42 und Tabelle 43 zeigen Eigenschaften des optimierten Rechenzentrums.

Tabelle 42: Eigenschaften des optimierten Rechenzentrums

Steckbrief		
Energieinfrastruktur	Energiequellen und Abwärmenutzung	IT Technologien
<ul style="list-style-type: none"> <li>IT Leistung: &gt;200 kW (durch Konsolidierung von RZ)</li> <li>Freie Kühlung und Wärmepumpe (WP)</li> <li>PUE: 1,5, ERF = 0,5</li> <li>Serverzuluft: 25 °C, Serverabluft: 40 °C</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>EE-Strom über PPAs</li> <li>Reststrom optional aus BHKW</li> <li>Abwärmenutzung im Wärmenetz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vollautomatisierte, intelligente Virtualisierungstechniken</li> <li>Heterogene Speichermedien und softwaregestützte Verwaltung</li> <li>VM Konsolidierung, Abschalten von Zombie Servern</li> </ul>

Tabelle 43: Qualitative Leistungsindikatorenbewertung des optimierten Rechenzentrums

Bewertungsfaktoren		
Ökonomische Bewertung	Ökologische Bewertung	Soziale Bewertung
<ul style="list-style-type: none"> <li>Investitionskosten --</li> <li>Betriebskosten +/-</li> <li>Serverauslastung ++</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Energiebedarf +/-</li> <li>CO<sub>2</sub>-Anteil ++</li> <li>Abwärmenutzung ++</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Beschaffungsrichtlinien ++</li> <li>Ausbildungsplätze ++</li> <li>Fortbildungspläne für Mitarbeiter ++</li> </ul>

### 6.5 Werkzeug zur Messung der Leistungsaufnahme eines bestehenden Web-Setups

Im Rahmen des Projekts wurde ein Werkzeug entwickelt, mit dessen Hilfe sich mit hoher Automatisierung die Performanz und Energieaufnahme eines typischen Web-Setups testen lässt. Die Software wurde unter einer Open-Source Lizenz veröffentlicht, generisch entwickelt und einem Design unterzogen, welches leicht zu erweitern ist. Wie im Folgenden beschrieben, wurde das Werkzeug

vorerst für eine bestimmte Cloud- und Monitoring-Plattform entwickelt, weitere Plattformen können jedoch aufgrund der Software-Architektur zukünftig mit moderatem Aufwand in das System eingepflegt werden. Des Weiteren besteht auch die Möglichkeit, die Architektur des zu testenden Setups zu erweitern. Momentan entspricht dieses einer typischen Webarchitektur, bestehend aus einem „loadbalancer“ und dahinterliegender Webserver. Sinn des Werkzeugs ist es, einem Entwickler oder Administrator die Möglichkeit zu geben, die Performanz und Energieaufnahme seiner Anwendung unter vorgegebener Nutzerlast zu testen. Sowohl das Werkzeug als auch die zu testende Anwendung lassen sich automatisiert in einem State of the art Cloud Umfeld aufsetzen und installieren. Mit Hilfe verschiedener Testläufe (i.e. Simulation verschiedener Nutzerlasten) und sich ergebender Resultate lässt sich die Anwendung unter Berücksichtigung eines optimalen Performanz-Energieverhältnis anpassen. Eine ausführliche Dokumentation und Installationsanweisungen der Software finden sich auf github: <https://github.com/EcoRZ>.

Da in diesem Abschnitt sehr viele fachspezifische Begriffe aus dem Feld der Informatik verwendet werden, sollen jene an dieser Stelle vorab definiert werden:

**Open Source:** *Open Source (Software) ist nach (opensource 2020) Software mit Quellcode, die jeder überprüfen, ändern und verbessern kann.*

**Monitoring:** *Monitoring steht meist im Zusammenhang mit messbaren Metriken. Monitoring-Werkzeuge werden nach (Fatema et al. 2014) dazu verwendet, Ressourcen zu überwachen und die Leistung von Systemen und Netzwerken zu verbessern.*

**Loadbalancer:** *Die Aufgabe eines loadbalancers ist nach (NGINX 2020) die effiziente Verteilung des eingehenden Netzwerkverkehrs auf eine Gruppe von Back-End-Servern, die auch als Serverfarm oder Server-Cluster bezeichnet werden.*

**Webserver (Software):** *Nach (MDN 2020) enthält ein Webserver mehrere Teile, die steuern, wie Webbenutzer auf gehostete Dateien (i.e. Webseiten Inhalte) zugreifen.*

**Continuous Integration (CI):** *Nach (Atlassian 2020) ist CI die Praxis der Automatisierung der Integration von Codeänderungen von mehreren Mitwirkenden in ein einziges Softwareprojekt.*

**REST:** *Representational State Transfer (REST) ist nach (oracle 2020b) ein Architekturstil, der Einschränkungen wie die einheitliche Schnittstelle angibt, die bei Anwendung auf einen Webdienst wünschenswerte Eigenschaften wie Leistung, Skalierbarkeit und Modifizierbarkeit hervorrufen. Dies soll den Diensten ermöglichen, im Web bestmöglich zu funktionieren.*

**http:** *Das Hypertext Transfer Protocol (HTTP) ist nach (The Internet Society 1999) ein Protokoll auf Anwendungsebene für verteilte, kollaborative Hypermedia-Informationssysteme (e.g. das Internet).*

**JSON-Format:** *JSON (JavaScript Object Notation) ist nach (JSON 2020) ein leichtgewichtiges Datenaustauschformat, welches von Menschen leicht gelesen und geschrieben werden kann.*

**Thread (IT):** *Nach (oracle 2020a) sind Threads leichtgewichtige Prozesse. Sowohl Prozesse als auch Threads bieten eine Ausführungsumgebung. Das Erstellen eines neuen Threads erfordert jedoch weniger Ressourcen als das Erstellen eines neuen Prozesses. Threads existieren innerhalb eines Prozesses - jeder Prozess hat mindestens einen. Threads teilen sich die Ressourcen des Prozesses, einschließlich Speicher und geöffneter Dateien.*

**Dashboard:** *Nach (Gartner Inc. 2020b) sind Dashboards Auswertungsinstrumentarien, die Metriken und Key Performance Indicators (KPIs) aggregieren und anzeigen, sodass sie von allen Benutzern auf einen Blick überprüft werden können, bevor sie mithilfe zusätzlicher Business Analytics-Tools (BA) weiter untersucht werden.*

**csv-Format:** *csv ist nach (LOC 2020) ein einfaches Format zur Darstellung eines rechteckigen Arrays (Matrix) aus numerischen und Textwerten. Es ist ein begrenztes Datenformat, bei dem Felder / Spalten durch Kommas getrennt sind.*

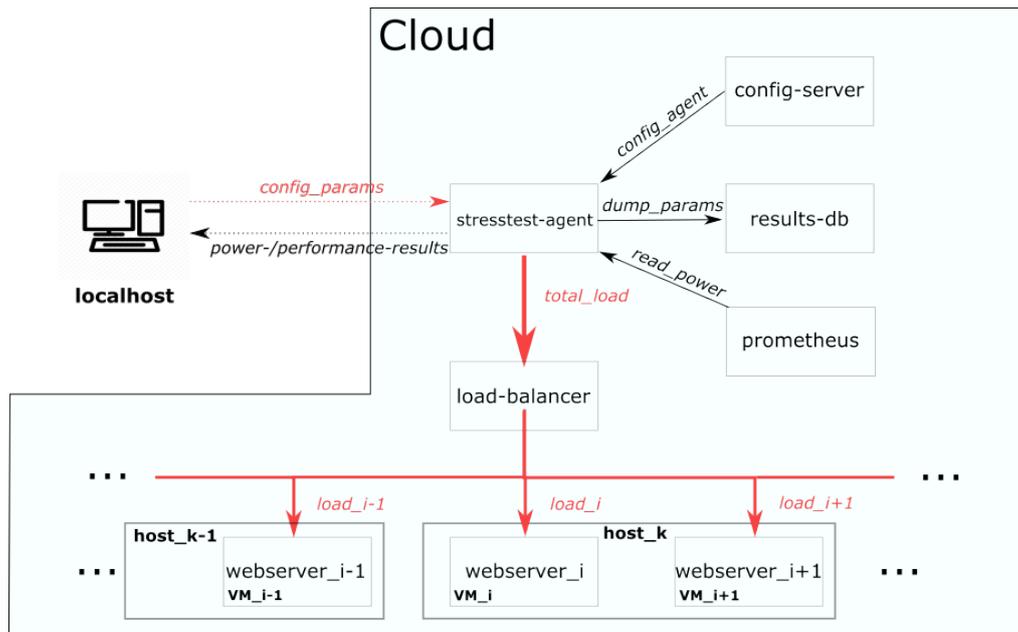


Abbildung 97: Aufbau der Software-Architektur und des Test Setups

Abbildung 97 zeigt die Architektur der Software (i.e. Werkzeug) und das dazugehörige Test Setup (i.e. Anwendung). Voraussetzungen sind Zugriff auf eine ‚Openstack‘ Cloud-Plattform, eine Prometheus Monitoring-Instanz und optional eine CI Anbindung wie Gitlab<sup>17</sup>. Ziel ist es, ein generisches Web-Setup unter „Stress“ zu setzen und die Leistungsaufnahme und Performanz-Werte parallel zu messen. Der Kontroll- und Datenfluss sieht bei einem typischen Test-Lauf dabei wie folgt aus. Ein lokaler Computer (localhost) kommuniziert über das Netzwerk mit der Software-Komponente „stresstest-agent“, welche auf einem Server in der Cloud läuft. Dabei werden Parameter wie die Anzahl der gleichzeitig auf die Anwendung zugreifenden Nutzer oder die Anfrageintensität übertragen. Der „stresstest-agent“ speichert diese, einen Test-Lauf beschreibenden Parameter und eine dazugehörige Test-Lauf Identifikationsnummer in der „results-db“ Datenbank ab und schickt diese Identifikationsnummer an den localhost zurück. Der localhost kann nun mit Hilfe der Identifikationsnummer den „stresstest-agent“ auffordern, den Test-Lauf entsprechend der gesetzten Parameter zu starten. In der Folge generiert der „stresstest-agent“ die Nutzeranfragen und erzeugt damit eine zeitlich beschränkte Anfragelast auf die Anwendung mit dem „loadbalancer“ als Schnittstelle. Parallel zur Belastung der Anwendung misst der „stresstest-agent“ Performanzwerte (e.g. Antwortzeiten der Anwendung) und Leistungsaufnahmen der Server (über die Netzwerkkommunikation mit prometheus). Am Ende des Test-Laufs speichert der „stresstest-agent“ die Performanz- und Energieverbrauchswerte auf seiner Komponente ab, welche der localhost im Anschluß auslesen und auswerten kann. Die Funktion des „config-server“ besteht darin, den „stresstest-agent“ vor der Inbetriebnahme mit Cloud-spezifischen Werten (bspw. Netzwerkadresse des „loadbalancers“) zu konfigurieren.

Das zu testende Setup, i.e. der „load-balancer“ und die „webserver“ und alle Werkzeugkomponenten in Abbildung 97 werden, falls Gitlab’s CI verwendet wird, voll automatisiert aufgesetzt und somit reduziert sich der ganze Testaufbau, vorausgesetzt die Konfigurationen sind korrekt, auf einen Mausklick. Andernfalls muss das Setup über sogenannte ansible<sup>18</sup> playbooks aufgebaut werden.

### 6.5.1 Beispielhafter Test-Lauf

Im Folgenden soll die beispielhafte Benutzung des Werkzeugs vorgestellt werden. Es wird der komplette ‚workflow‘ abgebildet, d.h. es wird gezeigt, wo und in welcher Reihenfolge welche Parameter zu setzen sind, welche Ergebnisse generiert, diese visualisiert und ausgewertet werden

<sup>17</sup> <https://about.gitlab.com/>

<sup>18</sup> [https://docs.ansible.com/ansible/latest/installation\\_guide/intro\\_installation.html](https://docs.ansible.com/ansible/latest/installation_guide/intro_installation.html)

können. Dabei wird vorausgesetzt, dass das gesamte setup, wie auf der github-Seite beschrieben, erfolgreich aufgesetzt wurde.

#### 6.5.1.1 Lauf-Werte

Wurde das Test Setup korrekt aufgesetzt, kann über eine sogenannte REST-Schnittstelle mit dem „stresstest-agent“ kommuniziert werden. Aufrufe über eine REST-Schnittstelle sind technisch gesehen das gleiche wie die übliche Kommunikation eines Browsers mit einer Webressource (e.g. Teil einer homepage) über http. Zur einfachen Handhabung steht ein freies grafisches Werkzeug namens ‚postman<sup>19</sup>‘ bereit, bei welchem die Aufrufart (e.g. ‚POST‘ oder ‚GET‘), der Endpunkt (e.g. `http://134.60.64.1:8080/v1/run/setconfig`) und der ‚body‘, also der Inhalt gesetzt werden können. Das folgende Beispiel zeigt die Vorgehensweise zur Konfiguration eines bestimmten Laufs. Zunächst muss ein Endpunkt in der Form:

```
http://<ip-Adresse>:8080/v1/run/setconfig
```

gesetzt werden. Als Aufrufart wird ‚POST‘ gewählt und als ‚body‘ wird folgender Inhalt im ‚json-Format<sup>20</sup>‘ gesetzt:‘

```
{
  "bmName": "TGROUP_BENCH",
  "arg1": "8",
  "arg2": "5",
  "arg3": "0",
  "stuff": [
    "bin",
    "bash"
  ]
}
```

Dabei sind beim Stand des Schreibens dieses Endberichts die beiden Parameter ‚arg1‘, ‚arg2‘ von Bedeutung, die restlichen Parameter können unverändert übernommen werden. Der erste Parameter gibt die Anzahl der threads an, mit der das Test Setup belastet werden soll (i.e. Nutzeranzahl), der zweite gibt die ramp-up Periode in Sekunden an, welche die Zeit beschreibt nach welcher bei linearem Anstieg die Nutzeranzahl mit der das Setup belastet werden soll, erreicht wurde.

Der Testlauf wird über einen zweiten Rest-Aufruf gestartet. Dabei ist zu beachten, dass der ‚stresstest-agent‘ bei dem eben beschriebenen Aufruf einen Rückgabewert in Form eines ‚Universally unique identifier‘ (UUID) zurückgibt. Dieser kann bspw. die Form:

```
4b53e1cd-3821-4b7a-b5f4-0d3047cd3885
```

besitzen. Mithilfe dieses Wertes und der Aufrufmethode ‚POST‘ kann der ‚stresstest-agent‘ zum Starten des Laufs bei Benutzung des folgenden Endpunkts gebracht werden:

```
http://<ip-Adresse>:8080/v1/run/4b53e1cd-3821-4b7a-b5f4-0d3047cd3885
```

#### 6.5.1.2 Performanz Resultate (Auszug)

Die Performanz Resultate werden übersichtlich in einem html-dashboard dargestellt, d.h. nach Öffnen der generierten Datei ‚index‘ über einen webbrower lassen sich alle relevanten Performanz Daten des Testlaufs visualisieren.

<sup>19</sup> <https://www.postman.com/>

<sup>20</sup> [https://www.w3schools.com/js/js\\_json\\_syntax.asp](https://www.w3schools.com/js/js_json_syntax.asp)

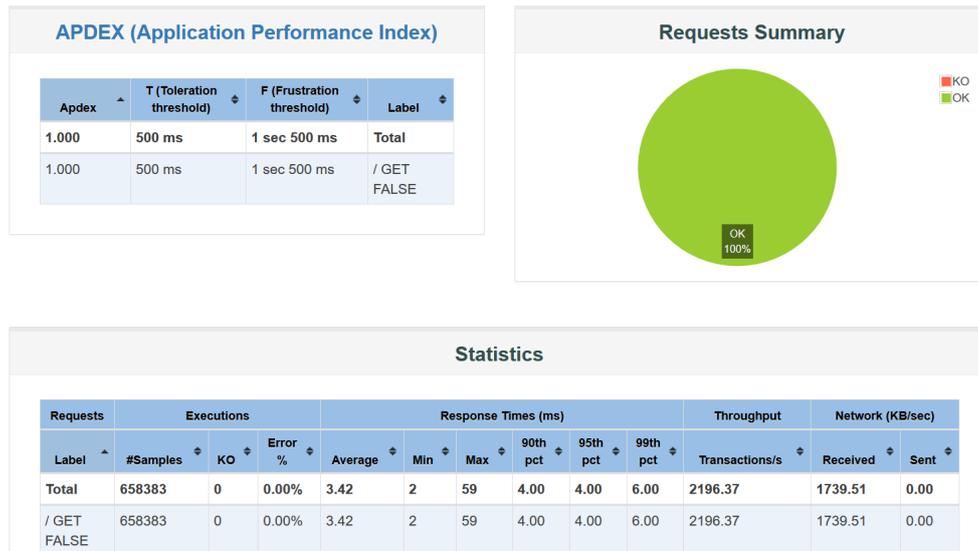


Abbildung 98: Visualisierte Performanz Resultate des Testlaufs

Abbildung 98 zeigt einen Ausschnitt davon. Der APDEX gibt Auskunft darüber, wie die Performanz aus Nutzersicht zu bewerten ist. Wenn die Werte aus obigem Beispiel genommen werden, gelten alle ‚Requests‘ die in weniger als 0,5s (inklusive) beantwortet werden können als ‚befriedigt‘, alle ‚Requests‘ die zwischen 0,5s (exklusive) und 1,5s (inklusive) beantwortet werden können als ‚toleriert‘ und alle Werte über 1,5s bzw. wenn der Server eine Fehlermeldung zurückgibt als ‚frustriert‘. Mit:

- $satisfied_{total}$  : Anzahl aller befriedigter Requests
- $tolerated_{total}$  : Anzahl aller tolerierter Requests
- $frustrated_{total}$  : Anzahl aller frustrierter Requests

Berechnet sich der APDEX nach der Formel:

$$APDEX = \frac{satisfied_{total} + \frac{tolerated_{total}}{2}}{satisfied_{total} + tolerated_{total} + frustrated_{total}}$$

Formel 50: Berechnung des APDEX

Im obigen Beispiel wurden von dem ‚stresstest-agent‘ insgesamt 658383 Anfragen abgegeben, welche alle im Bereich zwischen 2ms und 59ms von den webservern „hinter“ dem loadbalancer beantwortet werden konnten. Folglich lag der Zeitverzug bei der Beantwortung der Anfragen in allen Fällen unter der ‚befriedigt‘ Grenze, was einen APDEX von 1 zur Folge hat.

### 6.5.1.3 Elektrische Leistungsaufnahmen

Die Messdaten der ‚prometheus‘ Instanz werden vom ‚stresstest-agent‘ akquiriert und stehen als csv-Datei zur Verfügung dessen Werte mit einem Werkzeug wie ‚gnuplot<sup>21</sup>‘ geplottet werden können.

<sup>21</sup> <http://www.gnuplot.info/>

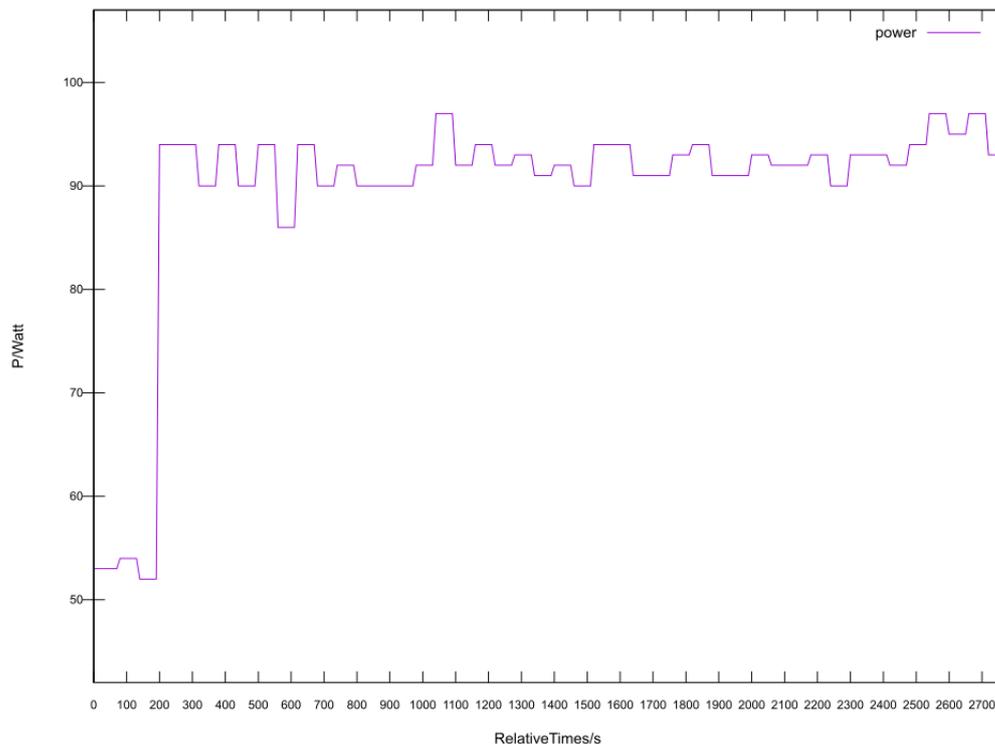


Abbildung 99: El. Leistungsaufnahme einer CPU

Abbildung 99 zeigt einen Beispielverlauf der Leistungsaufnahme einer CPU auf dem Server. Die Metrik der Leistungsaufnahme der CPU auf einem bestimmten Server wurde so in der Konfigurationsdatei des „config-Servers“, festgelegt und kann auf eine andere Metrik der ‚prometheus‘ Instanz bei Bedarf umgeändert werden. Die Kombination und Evaluierung der APDEX Werte und der Leistungs- bzw. Energieaufnahmen auf Serverlevel ermöglichen dem Anwendungsadministrator ein Feintuning des Performanz-Energieverhältnisses und damit das Potenzial zur Optimierung seiner Anwendung.

### 6.5.2 Lizenz und Code-Veröffentlichung

Die Software wird unter der Apache Licence 2.0<sup>22</sup> als freie Software veröffentlicht und die Codebasis ist unter <https://github.com/EcoRZ> zu finden. Die Software wurde so entwickelt, dass sie großes Potenzial zur Erweiterbarkeit bietet und künftig für Forschungszwecke am Institut für Organisation und Management von Informationssystemen der Universität Ulm weiter eingesetzt wird. Durch den ‚Open-Source‘ Charakter der Software steht es prinzipiell jedem Entwickler auf ‚github‘ frei, an der Fortentwicklung der Software mitzuwirken.

## 6.6 Zusammenfassung

Im diesem Kapitel wurde versucht, Ergebnisse, Erkenntnisse und entwickelte Methodiken des Projekts auf Praxisbeispiele anzuwenden. Außerdem wurde ein Werkzeug entwickelt, welches hilft, eine Anwendung in einem modernen Cloud-Umfeld so zu konstruieren, dass sie ein möglichst optimales Performanz-Energieaufnahme Verhältnis aufweist.

Das Ziel der Analyse von Infrastrukturdaten war, die mit Messwerten aus dem produktiven Betrieb dreier Rechenzentren angereicherten Daten der Bestandsaufnahme (Kapitel 2.1) einer kritischen Bewertung hinsichtlich möglicher Technologieoptionen (Kapitel 4) zu unterziehen. Dies zeigte vor allem, dass es bei den Punkten Erhöhen der Servereinlasttemperaturen und Erhöhung der Serverauslastungen in vielen Fällen noch großes Verbesserungspotenzial gibt. Vorteile wären im ersten Fall unter anderem Erhöhung der Freikühlstunden und im zweiten Fall auf konzeptioneller Ebene eine Verbesserung des Leistungsindikators ITEU (Kapitel 3.5.1), was in der Praxis eine Einsparung von Serverkapazität ermöglicht.

<sup>22</sup> <https://www.apache.org/licenses/LICENSE-2.0>

Um einen Praxisbezug zur Nachhaltigkeit von Standorten in Baden-Württemberg herzustellen, wurde das Standortbewertungsinstrumentarium (Kapitel 3.11) auf 27 Rechenzentren mit insgesamt 11 verschiedenen Standorten aus Kapitel 2.1 angewandt. Es zeigte sich, dass ökologische Faktoren, was den status quo betrifft, gegenüber wirtschaftlichen und sozialen Faktoren eine scheinbar untergeordnete Rolle spielen. Die durchschnittlichen sozialen Standortkriterien wichen dabei nur 8,83 % vom optimalen Wert ab, die ökonomischen 28,66 % und die ökologischen gar um 41,9 %.

Es wurden verschiedenste praxisrelevante Potenziale und Hemmnisse im Rechenzentrumsbetrieb sowohl auf der IT als auch auf der Infrastrukturseite, die sich aus dem Technologiemarkt in Kapitel 4 und anschließender Potenzial Evaluation in Kapitel 5 ergaben und einen *kurz- bis mittelfristigen Umsetzungshorizont in der Praxis* haben diskutiert. Dabei wurde betont, dass bspw. der Einsatz effizienter Kühl- oder Virtualisierungstechnologien immer vom Anwendungsfall und den finanziellen Möglichkeiten des Betreibers abhängt.

Bei der Gegenüberstellung verschiedener Rechenzentren wurde auf Ergebnisse aller Themenpunkte des Projekts zurückgegriffen. Dies umfasste Erkenntnisse wie die Vorteile einer Konsolidierung hin zu großen Rechenzentren (Kapitel 2), die Potenziale und Hemmnisse des verfügbaren Technologiemarkt (Kapitel 4, Kapitel 5), die optimale Energieflusskonfiguration (Kapitel 5.4.4) und die mögliche qualitative Verteilung der Leistungsindikatorwerte. Als Differenzierungsmerkmal wurde der mögliche Bauzeitpunkt verwendet. Es wurde ein Bestandsrechenzentrum, dessen Bau im Bereich der letzten 20 Jahre liegt, ein Referenz-Rechenzentrum, das sich mit heutigen State of the art Technologien errichten lässt und ein virtuelles, optimiertes Rechenzentrum, welches eine Menge an Optimierungsoptionen, welche im Laufe des Projekts erarbeitet wurden in sich vereint, miteinander verglichen.

Zum Schluss wurde noch ein selbst entwickeltes Werkzeug, welches zur Evaluierung eines optimalen Performanz-Energie Verhältnisses einer modernen Web Applikation in der Cloud herangezogen werden kann, vorgestellt. Die Software ist frei verfügbar, erweiterbar und wird im Rahmen von weiteren Forschungsarbeiten an der Universität Ulm weiterentwickelt.

## 7. Beispiel-Projekte, Erfolgsfaktoren und Handlungsempfehlungen

### 7.1 Beispiel-Projekte

Die folgenden Beispiele zeigen erfolgreiche Projekte, die einen in verschiedenen Aspekten nachhaltigen, Rechenzentrumsbetrieb ermöglichen und verdeutlichen, dass eine Umsetzung unter aktuellen Rahmenbedingungen möglich ist.

Seewasserkühlung an der Universität Konstanz: Bereits im Jahr 1972 hat das Rechenzentrum der Universität Konstanz das Wasser des Bodensees zur Kühlung ihres Rechenzentrums genutzt. Die Klimaanlage wurde mit Wasser aus dem Bodensee gekühlt und damit konnte der Kältemaschineneinsatz vermieden werden. Heute kann das Wasser zu Kühlzwecken direkt zu den Rechnern geführt werden, wodurch auch ganzjährig ohne Seewasser eine freie Kühlung möglich ist.

Interne Abwärmenutzung am Karlsruher Institut für Technologie: Das im Jahr 2016 in Karlsruhe errichtete Rechenzentrum des KIT verfügt über eine Warmwasserkühlung der Racks mit 42/47 °C. Diese hohen Temperaturen erlauben es, die angrenzenden Bürogebäude zu 100 % über die Abwärme der Server ohne zusätzliche Wärmepumpe zu heizen und überschüssige Wärme ganzjährig über trockene Rückkühler abzuführen. Das System wurde 2017 mit dem Deutschen Rechenzentrumspreis ausgezeichnet.

Externe Abwärmenutzung am VW Rechenzentrum Braunschweig: In Braunschweig hat VW Financial Services im Jahr 2018 ein Rechenzentrum in Betrieb genommen, dessen Abwärme für das angrenzende Wohn- und Gewerbegebiet genutzt wird. Die Abwärme des Rechenzentrums wird mit Hilfe einer Wärmepumpe auf das notwendige Temperaturniveau zur Versorgung des Nahwärmenetzes angehoben. Die Wärmepumpe dient gleichzeitig als Kältemaschine für das Rechenzentrum. Als zusätzliche Wärmequelle als Backup und Spitzenlastsystem steht für das Wohn- und Gewerbegebiet ein BHKW zur Verfügung.

Externe Abwärmenutzung in Stockholm: Bereits über 30 Rechenzentren speisen überschüssige Abwärme in das Fernwärmenetz von Stockholm Exergi ein. Die Wärmepumpen dienen in diesen Systemen für die Rechenzentrumsbetreiber als Kälteerzeugung. Die Abnahme der Wärme wird dem Betreiber garantiert und vergütet. Neue Bauplätze für Rechenzentren werden in Stockholm gezielt erschlossen, um eine Abwärmenutzung zu ermöglichen sowie die nötige Infrastruktur bereitzustellen (Strom, Glasfaser etc.). Die Stadt Stockholm (Schweden) verfügt über ein weitverzweigtes Fernwärmenetz und hat sich zum Ziel gesetzt, mit Hilfe der Abwärme aus Rechenzentren bis 2040 komplett auf fossile Energieträger in der Wärmeversorgung verzichten zu können.

## 7.2 Erfolgsfaktoren

Während der Projektlaufzeit wurden zwei elementare Erfolgsfaktoren für nachhaltige Rechenzentren identifiziert. Diese Erfolgsfaktoren beziehen sich nicht auf konkrete technischen Lösungen, sondern auf planerische bzw. organisatorische Rahmenbedingungen die für einen nachhaltigen Betrieb gegeben sein müssen, denn auch ein nicht nachhaltig betriebenes Rechenzentrum erfüllt die primären technische Anforderung an ein Rechenzentrum. Der Einsatz von nachhaltigen Technologien, welche in diesem Projekt analysiert und bewertet wurden, kann sich jedoch nur langfristig durchsetzen, wenn die folgenden Faktoren berücksichtigt werden.

### Kommunikation

Als Infrastruktur mit sich konstant ändernden Bedingungen (sowohl auf der Hardware- als auch auf der Softwareebene), getrennten Zuständigkeiten (IT-Betrieb und Infrastruktur-Betrieb) und hierarchisch strukturierter Verantwortung ist Kommunikation der entscheidende Erfolgsfaktor für einen nachhaltigen Betrieb. Der Nachhaltigkeitsgedanke muss auf allen Ebenen der Hierarchie und in allen Zuständigkeitsbereichen verankert sein und Entscheidungen bzw. Planungen bezüglich der Nachhaltigkeit abteilungsübergreifend kommuniziert und geplant werden. Besonders die zuständigkeitsübergreifende Kommunikation und Absprache zwischen IT-Betrieb und Infrastrukturbetrieb ist nötig um die funktionierte Einbindung einer Maßnahme in das Gesamtsystem zu garantieren.

### Kooperation

Das Potenzial der Abwärmenutzung und weitere systemübergreifende Lösungen (z.B. netzdienliche Leistungen) sind nur möglich, wenn Rechenzentrumsbetreiber die Kooperation mit anderen Stakeholdern aktiv suchen und befürworten. Der „Inselbetrieb“ und die Wahrnehmung des Rechenzentrums als isolierter Akteur ohne wechselseitigen Austausch mit der Umgebung ist ein Paradigma welches einem nachhaltigen Betrieb entgegensteht und überwunden werden muss. Sind unternehmensnahe oder sogar unternehmenseigene Akteure lokal verfügbar kann dieser Paradigmenwechsel leichter vollzogen werden (z.B. durch interne Abwärmenutzung). Dies ist vor allem dadurch erkennbar das Abwärmenutzung in Baden-Württemberg bis dato eigentlich ausschließlich unternehmens- bzw. universitätsintern durchgeführt wurde. Die Kooperationsbereitschaft wird häufig als logischer Gegensatz zur Betriebsstabilität/Betriebssicherheit verstanden da der isolierte Betrieb fälschlicherweise aufgrund weniger externer Abhängigkeiten als sicherer gesehen wird. Die externe Kooperation ist jedoch kein Gegensatz zur Sicherheit eines Rechenzentrums und kann sogar durch Redundanzen die Sicherheit eines Systems erhöhen. Um einen nachhaltigen Rechenzentrumsbetrieb zu ermöglichen ist die Kooperationsbereitschaft ein zentraler Baustein des Selbstverständnisses von Betreibern.

## 7.3 Handlungsempfehlungen

Die Handlungsempfehlungen werden in drei Hauptbereiche unterteilt. Diese sind Handlungsempfehlungen für Rechenzentrumsplaner, Rechenzentrumsbetreiber sowie politische Entscheidungsträger. Einige Handlungsempfehlungen haben Schnittmengen mit den anderen Bereichen und bereichsübergreifenden Einfluss. Um Doppelungen zu vermeiden sind diese jedoch nur einem Bereich zugeteilt und werden in den anderen Bereichen nicht erneut erwähnt.

## 7.3.1 Handlungsempfehlungen für Rechenzentrumsplaner

### 7.3.1.1 Standortwahl als Variable nutzen

Mit steigendem Ausbau digitaler Infrastruktur wachsen die Freiheitsgrade der Standortwahl für Rechenzentren. Diese Option ist vielen Auftraggebern von Rechenzentren-Neubauten jedoch nicht ausreichend bewusst da historisch die Wahl eines Immobilienstandorts für Unternehmen meist daraus bestand nah an bestehenden Immobilien zu expandieren oder näher an den Kunden zu rücken. Rechenzentrumsplaner können diese Freiheitsgrade verschiedener Standorte ökonomisch/ökologisch quantifizieren und bereits in einer frühen Phase, Kunden über alternative Standorte hinweisen. Ein Beispiel dieser Freiheitsgrade ist der Freikühlunterschied von bis zu 1300 Stunden pro Jahr zwischen dem klimatisch optimalsten und klimatisch suboptimalsten Standort in Baden-Württemberg (siehe Kapitel [3.12.1.4](#)).

### 7.3.1.2 Umgebung als Synergie verstehen

Die Umgebung als Synergie zu einem Rechenzentrum anzusehen ist sowohl für Betreiber als auch Planer ein Paradigmenwechsel. Historisch wurden Rechenzentren als Inselsysteme gesehen die neben den Betriebskritischen (Daten und Strom) möglichst keine Verbindungen mit der Umgebung haben. Die Umgebung eines Rechenzentrums wurde lediglich als Risikoquelle (Tankstellen, Hochwassergebiete etc.) gesehen. Die Umgebung als Synergiepotenzial zu verstehen welches positive Eigenschaften wie Netzdienlichkeit und Abwärmenutzung ermöglicht versetzt sowohl Planer als auch Betreiber in eine neue Situation in der die Nachhaltigkeit gesteigert werden kann aber auch ökonomische Potenziale wie beispielsweise eine Vergütung für die Abwärme erschlossen werden können.

### 7.3.1.3 TCO fokussieren

Der Begriff Total-Cost-of-Ownership wurde maßgeblich durch IT-Geräte geprägt, da diese über Ihre Lebenszeit eine Vielfaches ihrer Anschaffungskosten als Betriebskosten erzeugen. Diese Betrachtungsweise ist im Sinne der Nachhaltigkeit auf das ganze Rechenzentrum zu übertragen. Wird die gesamte Lebenszeit eines Gerätes betrachtet werden energieeffiziente PDU, PSU und USV ineffizienteren Geräten vorgezogen welche zwar einen geringeren Invest, aber höhere Betriebskosten haben. Da die Gerätewahl dem Kunden obliegt gilt dieser Punkt ebenfalls als Handlungsempfehlung für Rechenzentrumsbetreiber. Planer können hier lediglich das Portfolio und die Beratungsleistungen erweitern um diesen Punkt zu berücksichtigen.

### 7.3.1.4 Synergietechnologien also Kompetenz aufbauen

Die schnelle Umsetzung eines Bauvorhabens bzw. eine geringe Time-to-market ist für Rechenzentren sehr wichtig. Deswegen werden häufig Planer von Rechenzentren als Generalunternehmer beauftragt um den Bau so zeiteffizient wie möglich umzusetzen. Um trotzdem die oben erwähnten Synergiepotenziale zu nutzen sollten Rechenzentrumsplaner diese Technologien als Kompetenzen aufbauen bzw. in Ihr Portfolio aufnehmen um ohne Bauverzögerungen Maßnahmen wie Abwärmenutzung umsetzen zu können.

### 7.3.1.5 Suffizienz als Planungsmaxime

Das Sprichwort „Hosenträger und Gürtel zusammen tragen“ trifft auf Rechenzentrumsbetreiber sehr häufig zu. Als betriebskritische Infrastruktur ist es verständlich das Risikobedenken und Sicherheitsbedürfnisse sehr weit oben auf der Agenda eines RZ-Betreibers stehen. Dies führt aber dazu das Infrastrukturen überdimensioniert werden und Redundanzen verbaut werden die nicht zwingend nötig wären. Auch hier ist der Kunde der Entscheidungsträger, der Rechenzentrumsplaner kann lediglich die Beratung um Aspekte der Suffizienz erweitern.

## 7.3.2 Handlungsempfehlungen für Rechenzentrumsbetreiber

### 7.3.2.1 Politische Wahrnehmung stärken

Rechenzentren sind für 200.000 Arbeitsplätze in Deutschland verantwortlich und der Garant für den Betrieb von Wirtschaft, Industrie und Gesellschaft. Die Corona-Pandemie von 2020 hat diese Abhängigkeit nochmals verdeutlicht und verstärkt da neben Homeoffice, Onlinemeetings und Onlineschulungen im Wirtschaftsbereich, auch das soziale Leben auf die digitalen Infrastrukturen angewiesen ist. Politische Entscheidung die dieser Relevanz Rechnung tragen sind nicht oder

unzureichend getroffen worden. Rechenzentrumsbetreiber sind hier in der Verantwortung auch selbst aktiv zu werden um die politische Wahrnehmung von Rechenzentren in der Politik zu stärken. Abhängig von der Unternehmensgröße können kleinere Rechenzentrumsbetreiber jedoch keinen direkten politischen Einfluss ausüben. Hier können Branchenverbände wie der BITKOM und die GDA (German Data Center Association) helfen die Themen der Rechenzentrumsbetreiber gegenüber der Politik zu kommunizieren.

#### 7.3.2.2 Untereinander austauschen

Die Rechenzentrumsbranche und die dazugehörigen Technologien sind eine der volatilsten Branchen. Zugleich sind vor allem in kleineren Rechenzentren wenige Personen für den gesamten Betrieb zuständig und meist mit dem aktiven Betrieb bereits voll ausgelastet. Dies führt dazu, dass Best-Practices und neue Technologien/Maßnahmen zwar vorhanden aber nicht in der Fläche bekannt sind. Ein regelmäßiger und unterstützter Austausch von Rechenzentrumsbetreibern untereinander kann hier die Wissensdiffusion fördern. Dieser Austausch sollte jedoch nicht nur auf der organisatorischen Ebene geführt werden. Besonders das operative Personal kann von einem Austausch mit anderen Rechenzentrumsbetreibern profitieren und im fachlichen Austausch Optimierungspotenziale erkennen und erschließen.

#### 7.3.2.3 Optimierungspotenziale erfassen und staffeln

Das Rechenzentrum als technisches System lässt sich in viele unterschiedliche Bereiche einteilen, auch auf administrativer Ebene wird ein Rechenzentrum in unterschiedliche Bereiche eingeteilt. Elementarer Schritt einer nachhaltigen Optimierung ist es, mögliche Optimierungen in allen Bereichen zu erst einmal zu erfassen, zu quantifizieren und anschließend basierend auf einer Nutzwertanalyse zu staffeln. Klassische Staffellungen basieren auf dem ROI (Return on Investment), sollten jedoch im Sinne der Ganzheitlichkeit um weitere Nachhaltigkeitsaspekte wie beispielsweise der CO<sub>2</sub>-Vermeidung erweitert werden. Aufgrund der heterogenen Rechenzentrumslandschaft fallen die identifizierten Maßnahmen für jedes Rechenzentrum unterschiedlich aus. Konkrete Beispiele einzelner Technologiemaßnahmen sind in Kapitel 6 aufgeführt.

#### 7.3.2.4 Kennzahlen erheben/verbessern

Die Optimierung eines Rechenzentrums ist keine abschließende Maßnahme, sondern sollte Teil eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses (KVP) sein. Kernelement eines KVPs ist, es Kennzahlen regelmäßig zu erheben und Maßnahmen umzusetzen die diese verbessern. Die im Rahmen dieses Projektes vorgestellten Kennzahlen und Indikatoren können als Grundlage verwendet werden um den Rechenzentrumsbetrieb langfristig zu optimieren und sollten die Basis der Bewertung darstellen. Eine Erweiterung des Indikatorensatzes um weitere zweckmäßige Indikatoren wie beispielsweise dem Wasserverbrauch sollte regelmäßig überprüft werden.

#### 7.3.2.5 Mitarbeiter schulen und sensibilisieren

Der aktive Betrieb ist für einen Rechenzentrumsbetreiber das wichtigste Anliegen. Eingriffe in diesen sind ein Betriebsrisiko und sollten weitestgehend vermieden werden. Das Personal im Rechenzentrum ist mit dem aktiven Betrieb meistens bereits voll ausgelastet. Trotzdem ist es für einen langfristig nachhaltigen Betrieb elementar wichtig alle Mitarbeiter regelmäßig (z.B. im Rahmen eines Fortbildungsplan) in Fortbildungen weiter zu qualifizieren und in neuen Entwicklungen zu schulen. Hierfür ist es nötig Mitarbeiter für kurze Zeit aus dem aktiven Betrieb freizustellen. Die Sensibilisierung für das Thema Nachhaltigkeit sollte Leitgedanke der Fortbildungsmaßnahme sein und Mitarbeitern sollte die Möglichkeit gegeben werden Verbesserungsvorschläge vorzubringen.

#### 7.3.2.6 Organisatorisches Umdenken (Beschaffungsrichtlinien) Incentives setzen

Die Lifecycle-Zeit von Komponenten (z.B. Server und Storage) ist in Rechenzentren mit durchschnittlich 4 Jahren vergleichsweise kurz. Dies führt dazu das in einem Rechenzentrum regelmäßig Systeme ausgetauscht und durch andere ersetzt werden was Beschaffungsrichtlinien zu einem entscheidenden Punkt der Energieeffizienz macht. Sieht die Beschaffung den alleinigen Fokus auf Performance (z.B. Storagekapazität; FLOPS, GBit/s) für ein fixes Budget, sind Einkäufer gezwungen periphere Komponenten wie die Energieeffizienz von Netzteil oder Effiziente Kühlung (z.B. Warmwasserkühlung) in einem Angebot zu ignorieren. Hier müssen Rechenzentrumsbetreiber die

Beschaffungsrichtlinien um Nachhaltigkeitsaspekte wie Energieeffizienz und Konfliktfreiheit der Rohstoffe erweitern.

### 7.3.3 Handlungsempfehlungen für Politische Entscheider

#### 7.3.3.1 Abwärmenutzung fördern / konkurrenzfähig machen

Die Energiewende ist neben der Senkung des Energiebedarfs eine Bemühung der Technologieverdrängung. Klimaschädliche Technologien/Systeme sollen durch nachhaltigere verdrängt werden um den quasi konstanten Bedarf an Energieformen wie Wärme, Kälte, Treibstoff und Strom zu decken. Im Stromsektor wird diese Verdrängung durch das EEG unterstützt. Im Wärmebereich wurden Maßnahmen wie die KWK-Förderung implementiert. Die Abwärmenutzung (unter anderen auch in Rechenzentren) sollte durch Investitionsförderungen von beispielsweise Wärmepumpen unterstützt werden. Diese Förderung reichte jedoch nicht um andere Wärmeerzeugungstechnologien zu verdrängen und die Abwärmenutzung in Deutschland signifikant zu erhöhen. Fördermaßnahmen die auf die elementaren Kostenpunkte der Abwärmenutzung (Betriebskosten in Form von hohen Stromkosten und hohe Kosten in der Fernwärmeerschließung) ausgerichtet sind können hier die Umsetzung von Abwärmenutzung stärker vorantreiben. Nicht-Monetäre Fördermaßnahmen zur Kostensenkung der Abwärmenutzung könnten des Weiteren darin bestehen Rechenzentren gezielt in der Nähe von Synergiepartnern anzusiedeln um die räumliche Nähe und somit die Wärmetransportkosten zu senken. Dies kann beispielsweise durch eine Verschlinkung der Genehmigungsprozesse für spezielle Gewerbegebiete erreicht werden.

#### 7.3.3.2 Wettbewerbsfähigkeit stärken

Rechenzentren stehen im internationalen Wettbewerb, besonders bei latenzunkritischen Applikationen da diese auch aus großer Distanz aus dem Ausland bedient werden können. Die Standortbedingungen von Baden-Württemberg (Deutschland) schneiden in Umfragen in fast allen Aspekten gut ab (Hintemann 2017b). Dennoch sinkt der Marktanteil an Rechenzentrumsflächen im relativen Europavergleich. Ausschlaggebend hierfür sind die Stromkosten die in Deutschland im Vergleich zu anderen EU-Ländern sehr hoch sind. Die Stromerzeugung ist im deutschen Strompreis ein kleiner Posten im Vergleich zu den Steuern und Abgaben. Diese fallen für Rechenzentren voll an, da diese keine Ausnahmen und Subventionen erhalten. Eine Berücksichtigung der internationalen Wettbewerbssituation von Rechenzentren durch die Politik kann hier den Rechenzentrumsmarkt in Deutschland stärken und durch die allgemein positiven Standortbedingungen zum führenden Standort in Europa entwickeln.

#### 7.3.3.3 Öffentliche Beschaffung als Hebel

Die Öffentliche Hand ist der größte Einkäufer von IT-Hardware in Deutschland (BITKOM 2020). Entscheidungen in den Beschaffungsrichtlinien der öffentlichen Hand wirken sich somit auf das Angebot auf dem Markt aus. Hersteller reagieren auf die Nachfrage auf dem Markt und Nachhaltigkeitsaspekte lassen sich hierdurch verankern. Kernaspekte die in den Beschaffungsrichtlinien aufgenommen bzw. noch stärker verankert werden sollen sind Effizienz, Modularität, Konfliktfreiheit und die Arbeitsbedingungen der Hersteller (siehe Kapitel 3.4.3).

#### 7.3.3.4 Breitbandausbau stärker/unkomplizierter fördern

Seit 2015 versucht die Bundesregierung mit einer Breitbandförderung in Höhe von 4,5 Milliarden Euro den digitalen Ausbau zu unterstützen. Von dieser Fördersumme wurden bis Mitte 2019 jedoch lediglich 150 Millionen abgerufen was einem Anteil von 3,3 % entspricht. Als Gründe werden unter anderem der hohe Verwaltungsaufwand sowie die breitbandabhängigen Förderbedingungen genannt. Entbürokratisieren und verschlanken von Förderanträgen können Kommunen dazu anreizen den digitalen Ausbau flächendeckend in Angriff zu nehmen.

#### 7.3.3.5 Qualifikation/Weiterbildung im Bereich der Digitalisierung vorantreiben/fördern

Der Ablauf Schule, Ausbildung und dann bis zur Rente im gleichen Beruf verbleiben ist vor allem im IT-Bereich selten vorzufinden. Das lebenslange Lernen ist eine der Kernpunkte um langfristig für den konstanten Wandel in der Branche gewappnet zu sein. Neben anderen Gründen ist der Fachkräftemangel ein Hinderungsgrund warum Unternehmen die Weiterbildung/Fortbildung von Mitarbeitern nicht priorisieren. Mitarbeiter aus bereits unterbesetzten Bereichen freizustellen ist

häufig nicht möglich. Werden Mitarbeiter für eine Weiterbildung freigestellt hat der Staat die Möglichkeit über steuerliche Vergünstigungen diese zu unterstützen. Eigenfinanzierte Weiterbildungen können dadurch unterstützt werden das diese ohne Höchstgrenze steuerlich absetzbar gemacht werden.

#### 7.3.3.6 Rechenzentren in kommunaler Wärmeplanung berücksichtigen

Städte und Gemeinden in Baden-Württemberg sind seit 2019 dazu verpflichtet einen kommunalen Wärmeplan zu erstellen. Rechenzentren als Quelle konstanter und klimafreundlicher Abwärme sollen hier sowohl als Bestandsimmobilien als auch potenzielle Neubauten berücksichtigt werden. Eine strategische Ansiedlung von Abwärmequellen in Form von Rechenzentren ist in vielen Gebieten attraktiv da diese neben Gewerbe- und Industriegebieten prinzipiell auch in Mischgebieten nah am Endkunden platziert werden können.

#### 7.4 Leitfaden für Rechenzentrumsbetreiber

Ein Leitfaden für Betreiber, Planer und politische Entscheidungsträger wurde als praxistaugliche Erweiterung zu diesem Endbericht erstellt. Den Leitfaden „Nachhaltige Rechenzentren“ können Sie auf der Website [www.nachhaltige-rechenzentren.de/#downloads](http://www.nachhaltige-rechenzentren.de/#downloads) herunterladen.

#### 7.5 Website des Projekts

Weiter ausführliche Informationen zum Projekt „EcoRZ“ und interaktive Grafiken können Sie über die Website [www.nachhaltige-rechenzentren.de](http://www.nachhaltige-rechenzentren.de) abrufen.

## Literaturverzeichnis

3M Novec Engineered Fluids (2015): Two-Phase Immersion Cooling - A revolution in data center efficiency. Online verfügbar unter <https://multimedia.3m.com/mws/media/11279200/2-phase-immersion-cooling-a-revolution-in-data-center-efficiency.pdf>, zuletzt geprüft am 25.06.2018.

Abbasov, A. M.; Aliev, I. M.; Kerimova, L. H. (2009): Optimal location of internet data centers taking into account the risks. In: *Aut. Control Comp. Sci.* 43 (6), S. 309–316. DOI: 10.3103/S0146411609060042.

Acton, M.; Bertoldi, P.; Booth, J.; Newcombe, L.; Rouyer, A.; Tozer, R. (2018): Best Practice Guidelines for the EU Code of Conduct on Data Centre Energy Efficiency. EUR 29103 EN. Hg. v. Publications Office of the European Union. Luxembourg. Online verfügbar unter <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC110666/kjna29103enn.pdf>, zuletzt geprüft am 25.07.2019.

Aebischer, Bernard; Frischknecht, Rolf (2003): Energy- and Eco-Efficiency of Data Centres. A study commissioned by DIAE / ScanE of the Canton of Geneva. Online verfügbar unter [http://www.biblioite.ethz.ch/downloads/data\\_centres\\_final\\_report\\_05012003.pdf](http://www.biblioite.ethz.ch/downloads/data_centres_final_report_05012003.pdf), zuletzt geprüft am 26.07.2019.

Agentur für Erneuerbare Energien: BW - Daten und Fakten zur Entwicklung Erneuerbarer Energien in einzelnen Bundesländern - Föderal Erneuerbar. Online verfügbar unter <https://www.foederal-erneuerbar.de/landesinfo/bundesland/BW/>, zuletzt geprüft am 04.07.2018.

Agentur für Erneuerbare Energien (2020): Spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen der Fernwärmeerzeugung - Wärme - BW - Daten und Fakten zur Entwicklung Erneuerbarer Energien in einzelnen Bundesländern - Föderal Erneuerbar. Online verfügbar unter [https://www.foederal-erneuerbar.de/landesinfo/bundesland/BW/kategorie/waerme/auswahl/734-spezifische\\_co2-emis/#goto\\_734](https://www.foederal-erneuerbar.de/landesinfo/bundesland/BW/kategorie/waerme/auswahl/734-spezifische_co2-emis/#goto_734), zuletzt aktualisiert am 31.03.2020, zuletzt geprüft am 31.03.2020.

Agora Energiewende (2018): Flexibilität. Online verfügbar unter <https://www.agora-energiewende.de/themen/flexibilitaet/>, zuletzt geprüft am 30.10.2018.

Alshuqayran, Nuha; Ali, Nour; Evans, Roger (2016): A Systematic Mapping Study in Microservice Architecture. Hg. v. IEEE Computer society.

Apple to build second renewables-powered data center in Denmark (2017). In: *Reuters*. Online verfügbar unter <https://www.reuters.com/article/us-apple-denmark/apple-to-build-second-data-center-in-denmark-in-push-for-renewable-energy-idUSKBN19V0MJ>, zuletzt geprüft am 12.03.2018.

Ascierto, R. (2018): 2018-data-center-industry-survey.

ASHRAE (2008): ASHRAE Terminology. A Comprehensive Glossary of Terms for the Build Environment. Online verfügbar unter <https://xp20.ashrae.org/terminology/index.php?term=cooling%20efficiency%20ratio>, zuletzt geprüft am 26.07.2019.

ASHRAE (2016): ASHRAE TC9.9, Data Center Networking Equipment - Issues and Best Practices.

Atlantic, www.atlantic.cz (2020): Erdgas - TEDOM BHKW. Hg. v. TEDOM. Online verfügbar unter <https://www.tedom.com/de/blockheizkraftwerke/erdgas/>, zuletzt aktualisiert am 27.05.2020, zuletzt geprüft am 27.05.2020.

Atlassian (Hg.) (2020): What is Continuous Integration. Online verfügbar unter <https://www.atlassian.com/continuous-delivery/continuous-integration>, zuletzt geprüft am 09.09.2020.

Azevedo, Dan; Cooley, Jud; Patterson, Michael, Blackburn, Mark (2011): Data Center Efficiency Metrics: mPUE, Partial PUE, ERE, DCcE. Online verfügbar unter [https://www.cloud-finder.ch/fileadmin/Dateien/PDF/Reports/Data\\_Center\\_Efficiency\\_Metrics\\_2011.pdf](https://www.cloud-finder.ch/fileadmin/Dateien/PDF/Reports/Data_Center_Efficiency_Metrics_2011.pdf), zuletzt geprüft am 26.07.2019.

Barroso, Luiz André; Hölzle, Urs; Ranganathan, Parthasarathy (2018): The Datacenter as a Computer: Designing Warehouse-Scale Machines, Third Edition. In: *Synthesis Lectures on Computer Architecture* 13 (3), i-189. DOI: 10.2200/S00874ED3V01Y201809CAC046.

Battery-direct GmbH (2017): Sicherheitsdatenblatt. USV Batteriemodul mit eingebauten Blei Säure Akkus in AGM Technik. Hg. v. Battery direct. Bad Schönborn. Online verfügbar unter [https://www.battery-direct.de/Datenblaetter/battery-direct\\_MSDS\\_deutsch.pdf](https://www.battery-direct.de/Datenblaetter/battery-direct_MSDS_deutsch.pdf), zuletzt geprüft am 25.07.2019.

Beitelman, A. H.; Fabris, D. (2014): Servers and data Centers energy performance Metrics. Santa Clara University. Online verfügbar unter <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0378778814003594?token=B6A315BCC6D1AA9876393BFA44920E1092896EAB175CF81FD389E5FC0EC327FCA0B5E79CC12DBA033F848ABA5893D138>, zuletzt geprüft am 25.07.2019.

Belady, C. (2007a): TGG Data Center Power Efficiency Metrics PUE and DCiE FINAL.doc.

Belady, Christian (2007b): Green Grid Data Center Power Efficiency Metrics: PUE and DCiE. The Green Grid. Online verfügbar unter [https://www.missioncriticalmagazine.com/ext/resources/MC/Home/Files/PDFs/TGG\\_Data\\_Center\\_Power\\_Efficiency\\_Metrics\\_PUE\\_and\\_DCiE.pdf](https://www.missioncriticalmagazine.com/ext/resources/MC/Home/Files/PDFs/TGG_Data_Center_Power_Efficiency_Metrics_PUE_and_DCiE.pdf), zuletzt geprüft am 26.07.2019.

Belady, Christian (2010): Carbon Usage Effectiveness (CUE): A Green Grid Data Center Sustainability Metric. Microsoft. Online verfügbar unter [https://www.netalis.fr/wp-content/uploads/2016/04/Carbon-Usage-Effectiveness-White-Paper\\_v3.pdf](https://www.netalis.fr/wp-content/uploads/2016/04/Carbon-Usage-Effectiveness-White-Paper_v3.pdf), zuletzt geprüft am 26.07.2019.

Belady, Christian; Patterson Michael (2008): Green Grid Productivity Indicator. The Green Grid. Online verfügbar unter <https://www.thegreengrid.org/en/resources/library-and-tools/395-WP>, zuletzt geprüft am 26.07.2019.

Belady, Christian L.; Malone, Christopher G. (2007): Metrics and an Infrastructure Model to Evaluate Data Center Efficiency. In: Proceedings of the ASME InterPACK Conference - 2007. Presented at 2007 ASME InterPACK Conference, July 8 - 12, 2007, Vancouver, BC, Canada. ASME 2007 InterPACK Conference collocated with the ASME/JSME 2007 Thermal Engineering Heat Transfer Summer Conference. Vancouver, British Columbia, Canada, July 8–12, 2007. American Society of Mechanical Engineers; ASME InterPACK Conference; IPACK 2007; ASME/Pacific Rim Technical Conference and Exhibition on Integration and Packaging of MEMS, NEMS, and Electronic Systems. New York, NY: ASME, S. 751–755.

Bertoldi, Paolo (2019): The European Programme for Energy Efficiency in Data Centers. The Code of Conduct. Joint Research Centre, 2019.

Bilger, Frauke; Behringer, Friederike; Kuper, Harm; Schrader, Josef (2016): Weiterbildungsverhalten in Deutschland 2016. Ergebnisse des Adult Education Survey (AES). Online verfügbar unter <https://www.die-bonn.de/doks/2017-weiterbildungsforschung-01.pdf>.

BITKOM (Hg.) (2013): Betriebssichere Rechenzentren. Leitfaden. Version Dezember 2013. Unter Mitarbeit von Holger Skurk.

BITKOM (Hg.) (2018a): Bitkom zum Mobilfunkgipfel. Online verfügbar unter <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Bitkom-zum-Mobilfunkgipfel.html>, zuletzt geprüft am 01.12.2020.

BITKOM (2018b): Weiterbildung für die digitale Arbeitswel. Eine repräsentative Untersuchung von Bitkom Research im Auftrag des VdTÜV e. V. und des Bitkom e. V. Online verfügbar unter [https://www.bitkom.org/sites/default/files/2018-12/20181221\\_VdTV%CC%88V\\_Bitkom\\_Weiterbildung\\_Studienbericht.pdf](https://www.bitkom.org/sites/default/files/2018-12/20181221_VdTV%CC%88V_Bitkom_Weiterbildung_Studienbericht.pdf), zuletzt geprüft am 31.07.2019.

BITKOM (Hg.) (2020): Arbeitskreis Öffentliche Aufträge. Online verfügbar unter <https://www.bitkom.org/Bitkom/Organisation/Gremien/Oeffentliche-Auftraege.html>, zuletzt geprüft am 09.09.2020.

BK-Amt (2016): Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie - Neuauflage 2016, zuletzt geprüft am 26.04.2018.

Blackburn, Mark (2010): The Green Grid Data Center Compute Efficiency Metric: DCCe. The Green Grid. Online verfügbar unter <https://www.thegreengrid.org/en/resources/library-and-tools/240-WP>, zuletzt geprüft am 26.07.2019.

Blackburn, Mark (2012): Data Center Storage Efficiency Metric. The Green Grid. Online verfügbar unter <https://www.thegreengrid.org/en/resources/library-and-tools/145-2012-Forum-%E2%80%93-Data-Center-Storage-Efficiency-Metric>, zuletzt geprüft am 26.07.2019.

BMVI (Hg.) (2017): Pressemitteilung. Online verfügbar unter <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2017/065-dobrindt-gesetz-automatisiertes-fahren.html>.

Böhnke, Petra; Renneberg, Ann-Christin (2016): Atypische Beschäftigung und Gesundheit in Europa. Hg. v. WSI Mitteilung.

Böhnke, Petra; Renneberg, Ann-Christin; Cifuentes, Isabel Valdés (2016): Atypische Beschäftigung und Gesundheit in Europa. In: *WSI* 69 (2), S. 113–120. DOI: 10.5771/0342-300X-2016-2-113.

Bollmann, O.; Neuhausen, J. (2018): Automotive strategy in a world of diverse mobility.

Bowman, Ronald; Deneny, terence (2012): Data Cetners: Site Selection 101. Hg. v. Site Selection magazine. Online verfügbar unter <https://siteselection.com/issues/2012/nov/data-centers.cfm>, zuletzt geprüft am 09.09.2020.

Brauer, Janette (2001): Die Qual der Wahl. Welches Kältemittel für die Klimatechnik? Hg. v. Carrier GmbH. Unterschleißheim, zuletzt geprüft am 07.05.2018.

Brill, Kenneth (2007): Data Center Energy Efficiency and Productivity. Uptime Institute. Online verfügbar unter <http://large.stanford.edu/courses/2017/ph240/you2/docs/brill.pdf>, zuletzt geprüft am 26.07.2019.

Brill, Kenneth; Strong, Lars (2013): Cooling Capacity Factor (CCF) Reveals Stranded Capacity and Data Center Cost Savings. Upsite Technologies, Inc. Online verfügbar unter <https://www.datacenterexperts.com/files/cooling/CCFWhitePaper84002B.pdf>.

Brown, Eric (2013): Electronics Disposal Efficiency (EDE). An IT Recycling Metric for Enterprises and Data Centers. The Green Grid. Online verfügbar unter <https://www.thegreengrid.org/en/resources/library-and-tools/235-Electronics-Disposal-Efficiency-%28EDE%29%3A-An-IT-Recycling-Metric-for-Enterprises-and-Data-Centers->, zuletzt geprüft am 25.07.2019.

Brown, Matt (2017): The Top 5 Best-Selling Server Brands Of Q2 2017. Hg. v. CRN. Online verfügbar unter <https://www.crn.com/slide-shows/storage/300091331/the-top-5-best-selling-server-brands-of-q2-2017.htm>, zuletzt geprüft am 01.05.2020.

BSI (Hg.) (2018): Redundanz Modularität Skalierbarkeit. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. Online verfügbar unter [https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Sicherheitsberatung/Redundanz-Modularitaet-Skalierbarkeit/redundanz-modularitaet-skalierbarkeit.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Sicherheitsberatung/Redundanz-Modularitaet-Skalierbarkeit/redundanz-modularitaet-skalierbarkeit.pdf?__blob=publicationFile&v=1), zuletzt geprüft am 09.09.2020.

Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (Hg.) (2013): Band G, Kapitel 1: Einführung. Hochverfügbarkeit eine herausfordernde Aufgabenstellung für ein professionelles IT-Service Management. Online verfügbar unter [https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Hochverfuegbarkeit/BandG/G1\\_Einfuehru](https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Hochverfuegbarkeit/BandG/G1_Einfuehru)

ng.pdf;jsessionid=ABB7D8509724C31E12E76D61A2020B13.2\_cid360?\_\_blob=publicationFile&v=1, zuletzt geprüft am 01.05.2020.

Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (2017): BSI-Standard 200-3.

Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (2019): Kriterien für die Standortwahl von Rechenzentren. Standort-Kriterien RZ. 2.0. Aufl. Online verfügbar unter [https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Sicherheitsberatung/Standort-Kriterien\\_RZ/Standort-Kriterien\\_Rechenzentren.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=12](https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Sicherheitsberatung/Standort-Kriterien_RZ/Standort-Kriterien_Rechenzentren.pdf?__blob=publicationFile&v=12), zuletzt geprüft am 08.09.2020.

Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (2019): Modul 4: Energiebezogene Optimierung von Anlagen und Prozessen. Hg. v. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle. Online verfügbar unter [https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Energieeffizienz\\_und\\_Prozesswaerme/Modul4\\_Energiebezogene\\_Optimierung/modul4\\_energiebezogene\\_optimierung\\_node.html](https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Energieeffizienz_und_Prozesswaerme/Modul4_Energiebezogene_Optimierung/modul4_energiebezogene_optimierung_node.html), zuletzt aktualisiert am 27.05.2020, zuletzt geprüft am 27.05.2020.

Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz (2017): Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2017).

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, [www.bmub.bund.de](http://www.bmub.bund.de) (2016): Kurzinformationen Elektromobilität bezüglich Strom- und Ressourcenbedarf.

Bundesnetzagentur (2019): Kennzahlen der Versorgungsunterbrechungen Strom. Online verfügbar unter [https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen\\_Institutionen/Versorgungssicherheit/Versorgungsunterbrechungen/Auswertung\\_Strom/Versorgungsunterbrech\\_Strom\\_node.html](https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Versorgungsunterbrechungen/Auswertung_Strom/Versorgungsunterbrech_Strom_node.html), zuletzt aktualisiert am 21.04.2020, zuletzt geprüft am 21.04.2020.

Bundesverband WindEnergie e.V.: Windenergiepotenzial Baden-Württemberg. Online verfügbar unter <https://www.wind-energie.de/sites/default/files/files/region/baden-wuerttemberg/baden-wuerttemberg-potenzial.pdf>, zuletzt geprüft am 03.07.2018.

Bunger, Robert (2012): An Argument for kW Capacity to Measure Data Center Size. Hg. v. Schneider Electric Blog. Online verfügbar unter <https://blog.schneider-electric.com/datacenter/2012/09/21/an-argument-for-kw-capacity-to-measure-data-center-size/>, zuletzt geprüft am 21.06.2018.

Capozzoli, Alfonso; Primiceri, Giulio (2015): Cooling Systems in Data Centers: State of Art and Emerging Technologies. In: *Energy Procedia* 83, S. 484–493. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.12.168.

Capozzoli, Alfonso; Serale, Gianluca; Liuzzo, Lucia; Chinnici, Marta (2014): Thermal Metrics for Data Centers. A Critical Review. In: *Energy Procedia* 62, S. 391–400. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.12.401.

Carter, Mike; Hines, Robert (2018): Data centers: Choosing an optimal site location. Online verfügbar unter <https://www.7x24exchange.org/7x24-news/data-centerschoosing-an-optimal-site-location/>, zuletzt geprüft am 09.09.2020.

Chwieduk, D. A. (2016): Seasonal Performance Factor (Advances in Solar Heating and Cooling). Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/seasonal-performance-factor>, zuletzt geprüft am 04.09.2020.

CISCO (2018): Cisco 4000 Family Integrated Services Router Data Sheet.

Cleaning Up Data Center Power is Dirty Work (2015). In: *Data Center Knowledge*. Online verfügbar unter <http://www.datacenterknowledge.com/archives/2015/07/20/cleaning-data-center-power-dirty-work>, zuletzt geprüft am 12.03.2018.

CLEARResult Consulting Inc. (2020): CLEARResult Plug Load Solutions website. Online verfügbar unter [https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2019/07/Executive-Summary\\_EN\\_The-unsustainable-use-of-online-video.pdf](https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2019/07/Executive-Summary_EN_The-unsustainable-use-of-online-video.pdf), zuletzt aktualisiert am 22.04.2020, zuletzt geprüft am 22.04.2020.

- Cloud&Heat Blog (2016): Current CPUs produce 4 times more heat than hot plates; future performance increases (only) possible by using direct water cooling. In: *Cloud&Heat Blog*. Online verfügbar unter <https://blog.cloudandheat.com/index.php/en/2016/11/02/current-cpus-produce-4-times-more-heat-than-hot-plates-future-performance-increases-only-possible-by-using-direct-water-cooling/>, zuletzt geprüft am 17.04.2018.
- Cole, David (2011): Data Center Energy Efficiency –Looking Beyond PUE. So Limits Software. Online verfügbar unter [https://www.missioncriticalmagazine.com/ext/resources/MC/Home/Files/PDFs/WP\\_LinkedIN%20DataCenterEnergy.pdf](https://www.missioncriticalmagazine.com/ext/resources/MC/Home/Files/PDFs/WP_LinkedIN%20DataCenterEnergy.pdf), zuletzt geprüft am 26.07.2019.
- Courtemanche, Meredith (2014): How do you define data center size, density? Online verfügbar unter <https://searchdatacenter.techtarget.com/feature/How-do-you-define-data-center-size-density>, zuletzt geprüft am 01.05.2020.
- Covas, Miguel T.; Silva, Carlos A.; Dias, Luis C. (2013a): Multicriteria decision analysis for sustainable data centers location. In: *International Transactions in Operational Research* 20 (3), S. 269–299.
- Covas, Miguel Trigueiros; Silva, Carlos A.; Dias, Luis C. (2013b): On locating sustainable Data Centers in Portugal: Problem structuring and GIS-based analysis. In: *Sustainable Computing: Informatics and Systems* 3 (1), S. 27–35.
- Daim, Tugrul U.; Bhatla, Ashok; Mansour, Mohammad (2013): Site selection for a data centre—a multi-criteria decision-making model. In: *International Journal of Sustainable Engineering* 6 (1), S. 10–22.
- Dallmus, Alexander (2018): Ist Wasser sparen in Deutschland unsinnig? Bayerischer Rundfunk, 21.03.2018. Online verfügbar unter <https://www.br.de/radio/bayern1/inhalt/expertentipps/umweltkommissar/wasser-sparen-umwelt100.html>, zuletzt geprüft am 01.08.2019.
- Davies, G. F.; Maidment, G. G.; Tozer, R. M. (2016): Using data centres for combined heating and cooling: An investigation for London. In: *Applied Thermal Engineering* 94, S. 296–304. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.09.111.
- DC4cities (2016): Trial Results. Online verfügbar unter <http://www.dc4cities.eu/en/trial-results/>, zuletzt geprüft am 26.07.2019.
- Delta Power Solutions 2018 (2020): Konvergente Stromversorgung - DELTA Power Solutions. Online verfügbar unter <https://www.deltapowersolutions.com/de-de/mcis/data-center-solutions-converged-power.php>, zuletzt aktualisiert am 20.04.2020, zuletzt geprüft am 20.04.2020.
- Depoorter, Victor; Oró, Eduard; Salom, Jaume (2015): The location as an energy efficiency and renewable energy supply measure for data centres in Europe. In: *Applied Energy* 140, S. 338–349. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.11.067.
- DESTATIST (2016): Zahlen & Fakten. Indikatoren - Qualität der Arbeit. Dimension 6: Qualifikation und Weiterbildung. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Online verfügbar unter [https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Indikatoren/QualitaetArbeit/QualitaetArbeit.html?cms\\_gtp=318944\\_slot%253D6](https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Indikatoren/QualitaetArbeit/QualitaetArbeit.html?cms_gtp=318944_slot%253D6).
- Deutsches Institut für Normierung (2019): DIN EN 50600-2-3; Informationstechnik - Einrichtungen und Infrastrukturen von Rechenzentren - Teil 2-3: Regelung der Umgebungsbedingungen (2-3).
- DE-UZ 161 (2019): Blauer Engel. Energieeffizienter Rechenzentrumsbetrieb. Version nach der Expertenanhörung am 10.10.2018. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Online verfügbar unter <https://produktinfo.blauer-engel.de/uploads/criteriafile/de/DE-UZ%20161-201901-de%20Kriterien.pdf>, zuletzt geprüft am 25.07.2019.
- Dhiman, Gaurav; Marchetti, Giacomo; Rosing, Tajana (2009): vGreen. In: Jörg Henkel, Ali Keshavarzi, Naehyuck Chang und Tahir Ghani (Hg.): Proceedings of the 14th ACM/IEEE international symposium on Low power electronics and design - ISLPED '09. New York, New York, USA: ACM Press, S. 243.

VDE 0801-600-2-1, 01.09.2014: DIN EN 50600 2-1.

Norm DIN EN ISO 9004, 2018: DIN EN ISO 9004: Leiten und lenken für den nachhaltigen Erfolg einer Organisation - ein Qualitätsmanagementansatz.

Duffie, John A.; Beckman, William A. (1980): Solar engineering of thermal processes. New York: Wiley.

Eaton Electric GmbH (Hg.) (2018): EPS EATON USV Produktkatalog 2019 (171482).

Ebay Inc. (2013): Digital Service Efficiency. Ebay Inc. Online verfügbar unter <https://static.ebayinc.com/static/assets/Uploads/Archive/eBay-DSE-130523.pdf>, zuletzt geprüft am 26.07.2019.

EcoDataCenter (Hg.) (2018): Colocation Data Center ABC. Online verfügbar unter [https://cdn2.hubspot.net/hubfs/4066548/PP\\_Colocation%20Data%20Center%20ABC.pdf](https://cdn2.hubspot.net/hubfs/4066548/PP_Colocation%20Data%20Center%20ABC.pdf), zuletzt geprüft am 09.09.2020.

EEG 2017: Die wichtigsten Änderungen (2016). In: *EnergieDialog.NRW*. Online verfügbar unter <http://www.energedialog.nrw.de/eeg-2017-die-wichtigsten-aenderungen/>, zuletzt geprüft am 04.04.2018.

ELTEK DEUTSCHLAND GMBH (2020): Eltek: DC USV (CPS). Online verfügbar unter <https://www.eltek.de/de/produkte/data-center-power/dc-usv-cps/>, zuletzt aktualisiert am 20.04.2020, zuletzt geprüft am 20.04.2020.

Eltrop, L.; Moerschner, M.; Härdtlein, M.; König, A. (2006): Bilanz und Perspektiven der Holzenergienutzung in Baden-Württemberg. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart. Stuttgart.

Emerson Network Power: Welche Entwicklungen und Trends beeinflussen Rechenzentren bis zum Jahr 2025? In: *funkschau.de*. Online verfügbar unter <https://www.funkschau.de/datacenter/artikel/123867/>, zuletzt geprüft am 17.04.2018.

Emerson Network Power (2012): The Four Trends Driving the Future of Data Center Infrastructure Design and Management.

Energieatlas - Energieatlas (2018). Online verfügbar unter <http://www.energieatlas-bw.de/>, zuletzt geprüft am 04.07.2018.

EnergyStar (Hg.) (2020): Energy Star Enterprise Server. Online verfügbar unter [https://www.energystar.gov/products/data\\_center\\_equipment/enterprise\\_servers](https://www.energystar.gov/products/data_center_equipment/enterprise_servers), zuletzt geprüft am 01.12.2020.

Erneuerbare Energien (2018). Online verfügbar unter <https://um.baden-wuerttemberg.de/de/energie/erneuerbare-energien/>, zuletzt geprüft am 04.07.2018.

ETSI (2014): Global KPIs. ETSI ES 205 200-2-1. Online verfügbar unter [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_es/205200\\_205299/2052000201/01.02.01\\_60/es\\_2052000201v010201p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_es/205200_205299/2052000201/01.02.01_60/es_2052000201v010201p.pdf), zuletzt geprüft am 26.07.2019.

Evans, Tony: Humidification Strategies for Data Centers and Network Rooms. White Paper 58. Schneider Electric.

Fachausschuss 2/99 (2002): Mitarbeiterzufriedenheit. Fachausschuss der Engeren Mitarbeiter der Arbeitsdirektoren Stahl. Arbeitspapier 54. Hg. v. Hans-Böckler-Stiftung. Online verfügbar unter [https://www.boeckler.de/pdf/p\\_arbp\\_054.pdf](https://www.boeckler.de/pdf/p_arbp_054.pdf), zuletzt geprüft am 25.07.2019.

Fatema, Kaniz; Emeakaroha, Vincent; Healy, Philip; Morrison, John; Lynn, Theo (2014): A survey of Cloud monitoring tools: Taxonomy, capabilities and objectives. Hg. v. Journal of Parallel and Distributed Computing.

Fischer-Uhrig, Friedrich (2019): STANET Netzberechnungen für Gas, Wasser, Strom, Fernwärme und Abwasser. Hg. v. Ingenieurbüro Fischer-Uhrig. Online verfügbar unter <http://stafu.de/de/home.html>, zuletzt aktualisiert am 20.03.2019, zuletzt geprüft am 27.05.2020.

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE: Energy Charts. Online verfügbar unter [https://www.energy-charts.de/index\\_de.htm](https://www.energy-charts.de/index_de.htm), zuletzt geprüft am 04.07.2018.

Fuchs, H.; Shehabi, A.; Ganeshalingam, M. (2017): Characteristics and Energy Use of Volume Servers in the United States. Lawrence Berkeley National Laboratory. Online verfügbar unter <https://escholarship.org/uc/item/8bb5j7ww>, zuletzt geprüft am 25.07.2019.

Gartner Inc. (Hg.) (2019): Gartner Identifies Top 10 Data and Analytics Technology Trends for 2019. Press Release. Online verfügbar unter <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2019-02-18-gartner-identifies-top-10-data-and-analytics-technolo>, zuletzt geprüft am 02.05.2020.

Gartner Inc. (Hg.) (2020a): Big Data. Gartner Glossary. Online verfügbar unter <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/big-data>, zuletzt geprüft am 09.09.2020.

Gartner Inc. (Hg.) (2020b): Dashboards. Gartner Glossary. Online verfügbar unter <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/dashboard>, zuletzt geprüft am 09.09.2020.

Geißler, Otto; Ostler, Ulrike (2019): Steigende Rechenleistungsdichte fordert Umdenken bei der Kühlung. Hg. v. Data Center Insider. Online verfügbar unter <https://www.datacenter-insider.de/steigende-rechenleistungsdichte-fordert-umdenken-bei-der-kuehlung-a-845181/>, zuletzt geprüft am 01.05.2020.

Gemeinde Wüstenrot (Hg.) (2020): envisage Wüstenrot. Wüstenrot auf dem Weg zur Plusenergiegemeinde. Online verfügbar unter <http://www.envisage-wuestenrot.de/>, zuletzt aktualisiert am 27.05.2020, zuletzt geprüft am 27.05.2020.

Germany, Kiel, Schleswig-Holstein, Kieler Nachrichten: Windenergie soll Interesse von Google wecken. Online verfügbar unter <http://www.kn-online.de/Nachrichten/Wirtschaft/Rechenzentren-im-Norden-Windenergie-soll-Interesse-von-Google-wecken>, zuletzt geprüft am 12.03.2018.

Gimarc, Richard (2015): Quantifying Trends in Server Power Usage. CA Technologies, 13.10.2015, zuletzt geprüft am 25.07.2019.

GITPC (2011): Proposal of OGE Onsite Generation Efficiency Metric and OGE, On-site Generation Efficiency Metric, and ECI, Energy Carbon Intensity Metric. Green IT Promotion Council. Online verfügbar unter [https://home.jeita.or.jp/greenit-pc/topics/release/pdf/dppe\\_e\\_20110222.pdf](https://home.jeita.or.jp/greenit-pc/topics/release/pdf/dppe_e_20110222.pdf), zuletzt geprüft am 26.07.2019.

GITPC (2012a): Enhancing the Energy Efficiency and Use of Green Energy in Data Centers. Data Center Performance per Energy (DPPE) Enhances Energy Efficiency and Use of Green Energy in Data Centers. Hg. v. Green IT Promotion Council. Online verfügbar unter <https://home.jeita.or.jp/greenit-pc/sd/pdf/ds2.pdf>, zuletzt geprüft am 25.07.2019.

GITPC (2012b): New Data Center Energy Efficiency Evaluation Index DPPE (Datacenter Performance per Energy). Green IT Promotion Council. Online verfügbar unter [https://home.jeita.or.jp/greenit-pc/topics/release/pdf/dppe\\_e\\_DPPE\\_Measurement\\_Guidelines.pdf](https://home.jeita.or.jp/greenit-pc/topics/release/pdf/dppe_e_DPPE_Measurement_Guidelines.pdf), zuletzt geprüft am 26.07.2019.

Gleick, Peter (1994): Water and Energy. Hg. v. Annual Reviews Inc. Pacific Institute for Studies in Development, Environment and Security. Oakland, California. Online verfügbar unter <https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.eg.19.110194.001411>.

Google (2013): Google's Green PPAs: What, How, and Why. Online verfügbar unter <https://static.googleusercontent.com/media/www.google.com/en//green/pdfs/renewable-energy.pdf>, zuletzt geprüft am 12.03.2018.

Google Inc. (Hg.) (2019): Data Centers Efficiency. Online verfügbar unter <https://www.google.com/about/datacenters/efficiency/>, zuletzt geprüft am 01.05.2020.

Green Data Net (2015): Urban Data Centre Definition and Specification. Hg. v. Seventz Framework Programme. Online verfügbar unter [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=2ahUKEwivuuqykNLjAhUkzIUkHVKGAsYQFjACegQIBxAC&url=http%3A%2F%2Fwww.greendatanet-project.eu%2Ftzt%2Fscripts%2Fdownloader2.php%3Ffilename%3DT004%2Ffichier%2Fe8%2F9f%2F53laermjaj6r%26mime%3Dapplication%2Fpdf%26originalname%3DGreenDataNet\\_D1\\_1\\_WP1\\_UDC\\_Definition\\_and\\_Specification\\_rev\\_1\\_3.pdf&usg=AOvVaw1kBaNaw5JpyCikInpqcTIV](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=2ahUKEwivuuqykNLjAhUkzIUkHVKGAsYQFjACegQIBxAC&url=http%3A%2F%2Fwww.greendatanet-project.eu%2Ftzt%2Fscripts%2Fdownloader2.php%3Ffilename%3DT004%2Ffichier%2Fe8%2F9f%2F53laermjaj6r%26mime%3Dapplication%2Fpdf%26originalname%3DGreenDataNet_D1_1_WP1_UDC_Definition_and_Specification_rev_1_3.pdf&usg=AOvVaw1kBaNaw5JpyCikInpqcTIV), zuletzt geprüft am 26.07.2019.

Greenberg, Steve; Tschudi, William (2006): Self Benchmarking Guide for Data Center Energy Performance. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. Online verfügbar unter [https://datacenters.lbl.gov/sites/all/files/self\\_benchmarking\\_guide-2.pdf](https://datacenters.lbl.gov/sites/all/files/self_benchmarking_guide-2.pdf), zuletzt geprüft am 26.07.2019.

Greenhill, David (2012): SWaP Space Watts and Power. Sun Microsystems. Online verfügbar unter [https://www.energystar.gov/ia/products/downloads/Greenhill\\_Pres.pdf](https://www.energystar.gov/ia/products/downloads/Greenhill_Pres.pdf), zuletzt geprüft am 26.07.2019.

GreenpeaceEnergy: Das Grünstrom-Markt-Modell. Online verfügbar unter [https://www.youtube.com/watch?v=wMNe\\_RLa1bk](https://www.youtube.com/watch?v=wMNe_RLa1bk), zuletzt geprüft am 04.04.2018.

Grellen, Martin; Bieberbach, Florian (2015): Entwurf eines technischen und ökologischen Strukturwandels in der Fernwärmeversorgung. In: *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*.

Gröger, J. (2017): Green IT Inventar Baden-Württemberg. Abschlussbericht. Hg. v. Öko-Institut. Berlin.

Gruchot, A. (2015a): Planung von Rechenzentren, Projektentwicklung eines Rechenzentrums "Make or Buy".

Gruchot, Andreas (2015b): Planung von Rechenzentren, Projektentwicklung eines Rechenzentrums, „Make or buy“. Hg. v. Dr. Braun Consultants GmbH.

Guttek, Martina: Definition Power Purchase Agreement – PPA-Varianten und ihre Vorteile. Online verfügbar unter <https://iam.innogy.com/ueber-innogy/innogy-innovation-technik/erneuerbare-energien/power-purchase-agreements/ppa-definition>, zuletzt geprüft am 14.03.2018.

Guyer, Paul (2019): An Introduction to Energy Efficiency for Buildings. California: The Clubhouse Press.

Hanstein, Bernd (2016): Whitepaper - Metriken in der IT und RZ Technologie. Hg. v. Rittal. Online verfügbar unter [https://www.rittal.com/it-solutions/fileadmin/Redakteur/Downloads/Rittal\\_Whitepaper\\_Metriken\\_in\\_der\\_IT-\\_und\\_RZ-Technologie\\_5\\_3645.pdf](https://www.rittal.com/it-solutions/fileadmin/Redakteur/Downloads/Rittal_Whitepaper_Metriken_in_der_IT-_und_RZ-Technologie_5_3645.pdf), zuletzt geprüft am 22.04.2018.

Hanstein, Bernd (2018): Warum sich IT-Verantwortliche jetzt für Gleichstrom interessieren sollten. In: *COMPUTERWOCHE*, 23.04.2018. Online verfügbar unter <https://www.computerwoche.de/a/warum-sich-it-verantwortliche-jetzt-fuer-gleichstrom-interessieren-sollten,3544688>, zuletzt geprüft am 19.04.2020.041Z.

Hanstein, Bernd (2020): Bausteine für das zukunftssichere RZ ▪ LANline. Online verfügbar unter [https://www.eco.de/wp-content/uploads/2014/04/080911\\_keynote1\\_schramm\\_dell.pdf](https://www.eco.de/wp-content/uploads/2014/04/080911_keynote1_schramm_dell.pdf), zuletzt aktualisiert am 21.04.2020, zuletzt geprüft am 21.04.2020.

Hass, O.; et al. (2015): Studie zur Stromeffizienz bei Rechenzentren in der Schweiz - Potentialanalyse und Massnahmenkatalog für Effizienzsteigerung IT-Hardware und Infrastruktur.

Haverinen, Noora; Hyyppä, Petri; Känkänen, Riina (2014): Finnish sustainability rating system for data centers. User manual, v0.4 New Construction. Hg. v. Ministr of Transport and Communication. Online

verfügbar unter [http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/77877/Publications\\_21-2014.pdf](http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/77877/Publications_21-2014.pdf), zuletzt geprüft am 25.07.2019.

Havighorst, Frank (2006): Personalkennzahlen. HansBöcklerStiftung. Online verfügbar unter [https://www.boeckler.de/pdf/p\\_edition\\_hbs\\_167.pdf](https://www.boeckler.de/pdf/p_edition_hbs_167.pdf), zuletzt geprüft am 31.07.2019.

Hensel, Martin; Ostler, Ulrike (2018): Die beliebtesten Datacenter-USVs und -PDUs 2018. Damit der Strom nie ausgeht und effizient verteilt wird. Online verfügbar unter <https://www.datacenter-insider.de/die-beliebtesten-datacenter-usvs-und-pdus-2018-a-780832/>, zuletzt aktualisiert am 21.04.2020, zuletzt geprüft am 21.04.2020.

Herrlin, Magnus (2008): Airflow and Cooling Performance of Data Centers: Two Performance Metrics. ASHRAE. Online verfügbar unter [http://www.ancis.us/images/SL-08-018\\_Final.pdf](http://www.ancis.us/images/SL-08-018_Final.pdf), zuletzt geprüft am 26.07.2019.

Hintemann, R. (2012): Energieverbrauch und Energiekosten von Servern und Rechenzentren in Deutschland - Aktuelle Trends und Einsparpotenziale bis 2015.

Hintemann, Ralph (2008): Energieeffizienz im Rechenzentrum. Ein Leitfaden zur Planung, zur Modernisierung und zum Betrieb von Rechenzentren. BITKOM. Online verfügbar unter <https://www.hamburg.de/contentblob/418696/f587126932912505fb05885fd32f4bb1/data/zz-green-it-leitfaden.pdf>, zuletzt geprüft am 26.07.2019.

Hintemann, Ralph (2016): Rechenzentren – Energiefresser oder Effizienzwunder? Hg. v. Informatik Aktuell. Online verfügbar unter <https://www.informatik-aktuell.de/betrieb/server/rechenzentren-energiefresser-oder-effizienzwunder.html>, zuletzt geprüft am 01.05.2020.

Hintemann, Ralph (2017a): Rechenzentren in Deutschland. Eine Studie zur Darstellung der wirtschaftlichen Bedeutung und der Wettbewerbssituation. Hg. v. BITKOM. Borderstep Institute. Online verfügbar unter <https://www.bitkom.org/sites/default/files/file/import/Kurzstudie-RZ-Markt-Bitkom-final-20-11-2017.pdf>, zuletzt geprüft am 05.09.2019.

Hintemann, Ralph (2017b): Rechenzentrumsmarkt in Deutschland. Werden wir von Asien, Skandinavien und Nordamerika abgehängt? Borderstep Institute. Online verfügbar unter [https://www.germandatacenters.com/fileadmin/user\\_upload/Hintemann\\_GDA.pdf](https://www.germandatacenters.com/fileadmin/user_upload/Hintemann_GDA.pdf), zuletzt aktualisiert am 2017, zuletzt geprüft am 25.07.2019.

Hintemann, Ralph (2018): Boom führt zu deutlich steigendem Energiebedarf der Rechenzentren in Deutschland im Jahr 2017. Borderstep Institute. Berlin. Online verfügbar unter [https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2019/01/Borderstep-Rechenzentren-2017-final-Stand-Dez\\_2018.pdf](https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2019/01/Borderstep-Rechenzentren-2017-final-Stand-Dez_2018.pdf), zuletzt geprüft am 09.09.2020.

Hochschule für Technik Stuttgart (2018): SimStadt2. Überblick & Projektziele. Online verfügbar unter <http://www.simstadt.eu/de/index.jsp>, zuletzt aktualisiert am 27.05.2020, zuletzt geprüft am 27.05.2020.

Hofmann, S.; Laukhuf, A.; Spies, S.; Storl, D.; Hans, S. P. (2017): Fachkräfte in den IT-Berufen zur Umsetzung der Digitalisierung in Baden-Württemberg. Studie im Auftrag des Ministeriums für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg. Wirtschaftsforschungsinstitut Wifor. Online verfügbar unter [https://wm.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-wm/intern/Publikationen/Arbeit/171108\\_WifOR\\_Studie\\_Fachkr%C3%A4fte\\_in\\_den\\_IT-Berufen.pdf](https://wm.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-wm/intern/Publikationen/Arbeit/171108_WifOR_Studie_Fachkr%C3%A4fte_in_den_IT-Berufen.pdf), zuletzt geprüft am 25.07.2019.

Hohendanner, Christian (2018): Reform der befristete Beschäftigung im Koalitionsvertrag.

Humanrights (Hg.) (2016): Unmenschliche Arbeitsbedingungen bei Foxconn bleiben bestehen. Online verfügbar unter <https://www.humanrights.ch/de/menschenrechtethemen/tnc/nachrichten/unmenschliche-arbeitsbedingungen-foxconn>, zuletzt geprüft am 01.12.2020.

- Huneke, S.; Göß, S.; Österreicher, J.; Dahroug, O. (2018): Power Purchase Agreements: Finanzierungsmodell von Erneuerbaren Energien. Whitepaper. Energy Brainpool. Berlin. Online verfügbar unter [https://www.energybrainpool.com/fileadmin/download/Whitepapers/2018-01-31\\_Energy-Brainpool\\_White-Paper\\_Power-Purchase-Agreements.pdf](https://www.energybrainpool.com/fileadmin/download/Whitepapers/2018-01-31_Energy-Brainpool_White-Paper_Power-Purchase-Agreements.pdf), zuletzt geprüft am 14.03.2018.
- Icha, Petra (2019): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2018. Dessau-Roßlau (Climate Change, 10/2019), zuletzt geprüft am 31.03.2020.
- IEEE (Hg.) (1990): IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology.
- IHK (Hg.) (2020): Fachkräftemonitor BW. Online verfügbar unter <http://www.fachkraefte-monitoring-bw.de/fachkraefte-monitor.html#2V58Hol>, zuletzt geprüft am 01.12.2020.
- ISO/IEC 30134-3:2016, 2016: Information technology - Data Centres - Key performance indicators.
- ISO/IEC 30134-5:2017, 2017: Information technology - Data Centres - Key performance indicators.
- innovIT AG (2020): Netzersatzanlagen für Ihr Rechenzentrum, 100% stromausfallsicher! | innovIT. Online verfügbar unter <https://www.innovit.ag/de/loesungen/energieversorgung/netzersatzanlage/>, zuletzt aktualisiert am 21.04.2020, zuletzt geprüft am 21.04.2020.
- Intel (Hg.) (2020): What is a GPU? Online verfügbar unter <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/docs/processors/what-is-a-gpu.html>, zuletzt geprüft am 09.09.2020.
- IONOS (Hg.) (2020): On-Premises: Das Lizenzmodell für serverbasierte Software. Digital Guide. Online verfügbar unter <https://www.ionos.de/digitalguide/server/knowhow/was-ist-on-premises/>, zuletzt geprüft am 09.09.2020.
- ITWissen (2016): PAR4. Power Assure rating. Online verfügbar unter <https://www.itwissen.info/PAR4-Power-Assure-rating.html>, zuletzt geprüft am 29.07.2019.
- Johnson, Eric (2017): Advanced Concepts for Renewable Energy Supply of Data Centres. Atlantic Consulting. Online verfügbar unter [https://www.riverpublishers.com/pdf/ebook/RP\\_9788793519411.pdf](https://www.riverpublishers.com/pdf/ebook/RP_9788793519411.pdf), zuletzt geprüft am 26.07.2019.
- JRC (Hg.) (2020): EU Energy Star Programme. Joint Research Centre. Online verfügbar unter <https://e3p.jrc.ec.europa.eu/node/189>, zuletzt geprüft am 09.09.2020.
- JSON (Hg.) (2020): Introducing JSON. Online verfügbar unter <https://www.json.org/json-en.html>, zuletzt geprüft am 09.09.2020.
- Jürgen Maaß, Paul Feddeck (2003): Wasser als Kältemittel. Hg. v. Fachinformationszentrum Karlsruhe. Karlsruhe, zuletzt geprüft am 19.06.2018.
- Kaplan, James; Forrest, William; Kindler, Noah (2008): Revolutionizing Data Center Energy Efficiency. McKinsey & Company. Online verfügbar unter [https://www.sallan.org/pdf-docs/McKinsey\\_Data\\_Center\\_Efficiency.pdf](https://www.sallan.org/pdf-docs/McKinsey_Data_Center_Efficiency.pdf), zuletzt geprüft am 26.07.2019.
- KIT-Zentrum Energie (2016): Die Weiterentwicklung der Energiewirtschaft in Baden- Württemberg bis 2025 unter Berücksichtigung der Liefer- und Preissicherheit.
- KnowTheChain (2018): Information and Communications Technology Benchmark Findings Report. Online verfügbar unter <https://knowthechain.org/wp-content/uploads/KTC-ICT-May2018-Final.pdf>, zuletzt geprüft am 25.07.2019.
- Koch, Peter (2017): Abwärmenutzung ist der Schlüssel zum grünen Rechenzentrum. Hg. v. Data Center Insider. Online verfügbar unter <https://www.datacenter-insider.de/abwaermenutzung-ist-der-schluessel-zum-gruenen-rechenzentrum-a-652185/>, zuletzt geprüft am 01.05.2020.
- Koomey, J.; Taylor, J. (2017): ZOMBIE/COMATOSE SERVERS REDUX: Koomey Analytics and Anthesis.

Koomey, Jonathan; Naffziger, Sam (2016): Energy Efficiency of Computing: What's Next? Hg. v. Electronic Design. Online verfügbar unter <https://www.electronicdesign.com/microprocessors/energy-efficiency-computing-what-s-next>, zuletzt geprüft am 25.07.2019.

Kraftfahrtsbundesamt (Hg.) (2020a): Der Fahrzeugbestand am 1. Januar 2020. Pressemitteilung Nr.6/2020. Online verfügbar unter [https://www.kba.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2020/pm\\_06\\_19\\_bestand\\_01\\_20\\_pdf.pdf;jsessionid=8D8C37701E5DDEE8D0070BC1A61BC1D5E.live21304?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.kba.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2020/pm_06_19_bestand_01_20_pdf.pdf;jsessionid=8D8C37701E5DDEE8D0070BC1A61BC1D5E.live21304?__blob=publicationFile&v=3), zuletzt geprüft am 01.05.2020.

Kraftfahrtsbundesamt (Hg.) (2020b): Personenkraftwagen am 1. Januar 2020 nach ausgewählten Merkmalen. Online verfügbar unter [https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Jahresbilanz/2020\\_b\\_barometer.html?nn=2084378](https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Jahresbilanz/2020_b_barometer.html?nn=2084378).

Lannoo, Bart; Lambert, Sofie; van Heddeghem, Ward; Pickavet, Mario (2013): D8.1. Overview of ICT energy consumption. Hg. v. Network of Excellence in Internet Science. Online verfügbar unter <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.683.621&rep=rep1&type=pdf>, zuletzt geprüft am 27.09.2019.

Lauf, Dr. Thomas; Memmler, Michael; Schneider, Sven (2019): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger. Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2018. Dessau-Roßlau (Climate Change, 37/2019), zuletzt geprüft am 31.03.2020.

Leemann, Robert (1992): Grundbegriffe der Energiewirtschaft (Glossar): Ravel. Online verfügbar unter [http://www.verenum.ch/Dokumente/1992\\_Leemann\\_RAVEL.pdf](http://www.verenum.ch/Dokumente/1992_Leemann_RAVEL.pdf), zuletzt geprüft am 01.07.2020.

ISO 26000:2010: Leitfaden zur gesellschaftlichen Verantwortung.

Lerner, Andrew (2014): The Cost of Downtime. Gartner. Online verfügbar unter <https://blogs.gartner.com/andrew-lerner/2014/07/16/the-cost-of-downtime/>, zuletzt geprüft am 29.07.2019.

Levy, Moises; Raviv, Daniel (2017): A Novel Framework for Data Center Metrics using a Multidimensional Approach. Online verfügbar unter <https://pdfs.semanticscholar.org/aea8/724ec4f6b4da7b5635120475aaaf5971d405.pdf>, zuletzt geprüft am 26.07.2019.

LGL (Hg.) (2020). Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg. Online verfügbar unter <https://www.lgl-bw.de/>, zuletzt geprüft am 09.09.2020.

LGRB (Hg.) (2020): Kartenviewer. Online verfügbar unter [https://maps.lgrb-bw.de/?view=lgrb\\_geotope](https://maps.lgrb-bw.de/?view=lgrb_geotope), zuletzt geprüft am 01.12.2020.

LOC (Hg.) (2020): CSV, Comma Separated Values (RFC 4180). Online verfügbar unter <https://www.loc.gov/preservation/digital/formats/fdd/fdd000323.shtml>, zuletzt geprüft am 09.09.2020.

LUBW (Hg.) (2020): Wohnflächenspezifischer Wärmebedarf. Energieatlas. Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg. Online verfügbar unter [https://www.energieatlas-bw.de/waerme/waermebedarf\\_wohnen/waermebedarf\\_von\\_wohngebaeuden](https://www.energieatlas-bw.de/waerme/waermebedarf_wohnen/waermebedarf_von_wohngebaeuden), zuletzt geprüft am 09.09.2020.

MagnaGen GmbH (2018): Anleitung zur Berechnung des Kraftstoffverbrauchs von Notstromaggregaten. MagnaGen GmbH. Online verfügbar unter [https://www.notstromdiesel.com/images/\\_pdf/Verbrauch-Kraftstoff-Notstromaggregat.pdf](https://www.notstromdiesel.com/images/_pdf/Verbrauch-Kraftstoff-Notstromaggregat.pdf), zuletzt aktualisiert am 25.07.2019.

Marwan, Peter (2016): ZTE und Tencent entwickeln modulares Rechenzentrum mit PUE-Wert von 1,0665. In: *silicon.de*, 27.05.2016. Online verfügbar unter <https://www.silicon.de/41627309/zte-und-tencent-entwickeln-modulares-rechenzentrum-mit-pue-wert-von-10665>, zuletzt geprüft am 19.04.2020.895Z.

Mathew, Paul; Greenberg, Steve; Sartor, Dale (2009): Self-benchmarking Guide for Data Center Infrastructure: Metrics, Benchmarks, Actions. Lawrence Berkeley National Laboratory. Online verfügbar unter <https://eetd.lbl.gov/sites/all/files/publications/lbnl-3393e.pdf>, zuletzt geprüft am 22.04.2018.

McAllister, Sara; van Carey, P.; Shah, Amip; Bash, Cullen; Patel, Chandrakant (2008): Strategies for effective use of exergy-based modeling of data center thermal management systems. In: *Microelectronics Journal* 39 (7), S. 1023–1029. DOI: 10.1016/j.mejo.2007.11.005.

MDN (Hg.) (2020): What is a web server? Online verfügbar unter [https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Learn/Common\\_questions/What\\_is\\_a\\_web\\_server](https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Learn/Common_questions/What_is_a_web_server).

Mell, Peter; Grance, Timothy (2011): The NIST Definition of Cloud Computing. Recommendations of the National Institute of Standards and Technology. Special Publication 800-145. National Institute of Standards and Technology.

Mena, Marisa; Musilli, John; Austin, Ed; Lee, Jeff; Vaccaro, Paul (2014): Selecting a Data Center Site: Intel's Approach. Hg. v. IT@Intel White Paper. Intel. Online verfügbar unter [https://media14.connectedsocialmedia.com/intel/02/11447/IT\\_Best\\_Practices\\_Data\\_Center\\_Site\\_Selection.pdf](https://media14.connectedsocialmedia.com/intel/02/11447/IT_Best_Practices_Data_Center_Site_Selection.pdf), zuletzt geprüft am 09.09.2020.

Merkel, Andreas; Stoess, Jan; Bellosa, Frank (2010): Resource-conscious Scheduling for Energy Efficiency on Multicore Processors.

Meunier, Corinne (2014): Marktanalyse Ökostrom: Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/marktanalyse-oekostrom>, zuletzt geprüft am 04.04.2018.

Meyerding, Stephan Gerhard Heinz (2013): Mitarbeiterzufriedenheit als Kernindikator sozialer Nachhaltigkeit. Tagungsband zum 1. Symposium für Ökonomie im Gartenbau. Online verfügbar unter [https://www.researchgate.net/publication/286025110\\_Mitarbeiterzufriedenheit\\_als\\_Kernindikator\\_sozialer\\_Nachhaltigkeit](https://www.researchgate.net/publication/286025110_Mitarbeiterzufriedenheit_als_Kernindikator_sozialer_Nachhaltigkeit), zuletzt geprüft am 25.07.2019.

Milad, M.; Darwish, Mohamed (2015): 2015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). 1 - 4 Sept. 2015, Stoke-on-Trent, United Kingdom. Piscataway, NJ: IEEE. Online verfügbar unter <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=7332335>.

Miller, Rich (2018): Power Densities Edge Higher, But AI Could Accelerate the Trend. Hg. v. Data Center Frontier. Online verfügbar unter <https://datacenterfrontier.com/rack-density-trends-higher-but-ai-could-boost-a-high-density-horizon/>, zuletzt geprüft am 01.05.2020.

Mittelstandagentur Cloud: 4.0 (2018): Entscheidungsfrage Cloud: Ein Entscheidungsmodell für Anwender und Anbieter.

MTU Onsite Energy (2016): Bereitstellung von regelenergie mit mtu BHKW-Aggregaten., zuletzt geprüft am 21.04.2020.

Müller, Claudio (2008): Leistungszahlen für Kälte-, Klima- und Wärmepumpensysteme. 1. Aufl. Hg. v. Friscaldo. Online verfügbar unter <http://www.reftec.ch/downloads/Leistungszahlen.pdf>, zuletzt geprüft am 04.09.2020.

Muttenthaler, Gerhard (2016): USV-Klassifizierung nach IEC 62040-3. Online verfügbar unter <http://www.mtm.at/downloads/usv-klassifizierung-nach-iec-62040-3.pdf>, zuletzt geprüft am 20.04.2020.

- New Windfarms to Power Google Data Centers in Europe (2016). In: *Data Center Knowledge*. Online verfügbar unter <http://www.datacenterknowledge.com/archives/2016/07/01/new-windfarms-to-power-google-data-centers-in-europe>, zuletzt geprüft am 12.03.2018.
- Next Kraftwerke GmbH (2019): Regelenergievermarktung für Notstromaggregate. Online verfügbar unter <https://www.next-kraftwerke.de/virtuelles-kraftwerk/stromproduzenten/notstrom>, zuletzt aktualisiert am 24.09.2019+02:00, zuletzt geprüft am 21.04.2020.
- NGINX (Hg.) (2020): What is Load Balancing? Online verfügbar unter <https://www.nginx.com/resources/glossary/load-balancing/>, zuletzt geprüft am 09.09.2020.
- NI (Hg.) (2014): The Industrial Internet of Things. Online verfügbar unter [http://www.ni.com/pdf/company/en/Trend\\_Watch\\_IOT.pdf](http://www.ni.com/pdf/company/en/Trend_Watch_IOT.pdf), zuletzt geprüft am 09.09.2020.
- Niemann, J. (2017): Is it Time to Let the X-Factor Determine Data Center Temperature? Online verfügbar unter <https://blog.se.com/datacenter/2017/05/01/x-factor-data-center-temperature/>, zuletzt geprüft am 04.04.2020.
- Noble, Caleb C.; Cook, Diane J. (2003): Graph-Based Anomaly Detection.
- Ohadi, M. M.; Dessiatoun, S. V.; Choo, K.; Pecht, M.; Lawler, John V. (2012): A comparison analysis of air, liquid, and two-phase cooling of data centers. In: *IEEE*, S. 58–63. Online verfügbar unter <http://ieeexplore.ieee.org/document/6188826/>, zuletzt geprüft am 25.06.2018.
- opensource (Hg.) (2020): What is open source? Online verfügbar unter <https://opensource.com/resources/what-open-source>, zuletzt geprüft am 09.09.2020.
- OpenStreetMap Foundation (Hg.) (2020): Main Page. Online verfügbar unter [https://wiki.osmfoundation.org/w/index.php?title=Main\\_Page&oldid=7007](https://wiki.osmfoundation.org/w/index.php?title=Main_Page&oldid=7007), zuletzt aktualisiert am 03.03.2020, zuletzt geprüft am 01.05.2020.
- oracle (Hg.) (2020a): Processes and Threads. The Java Tutorials. Online verfügbar unter <https://docs.oracle.com/javase/tutorial/essential/concurrency/procthread.html>, zuletzt geprüft am 09.09.2020.
- oracle (Hg.) (2020b): The Java EE 6 Tutorial. What are RESTful Web services? Online verfügbar unter <https://docs.oracle.com/javaee/6/tutorial/doc/gijqy.html>, zuletzt geprüft am 09.09.2020.
- Ostler, Ulrike (2009): WO ist der ideale Standort für ein neues Rechenzentrum? Hg. v. *Data Center Insider*. Online verfügbar unter <https://www.datacenter-insider.de/wo-ist-der-ideale-standort-fuer-ein-neues-rechenzentrum-a-190865/>, zuletzt geprüft am 09.09.2020.
- OUNIFI, Hibat-Allah; OUHIMMOU, Mustapha; PAQUET, Marc; MONTECINOS, Julio (2015): Datacenter location for Internet services in the province of Quebec. In: *IFAC-PapersOnLine* 48 (3), S. 2266–2272. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.425.
- Pahl, Claus (2015): Containerization and the PaaS Cloud. Hg. v. *IEEE Cloud Computing*.
- Parsons, Clark; Fuest, Klaus; Krys, Christian (2018): Erfolgsfaktor 5G. Innovation und Vielfalt für die nächste Stufe der Digitalisierung. Hg. v. Internet Economy Foundation (IE.F) und Roland Berger GmbH.
- Patterson Michael (2011): Water Usage Effectiveness WUE. A Green Grid Data Center Sustainability Metric. The Green Grid. Online verfügbar unter <https://airatwork.com/wp-content/uploads/The-Green-Grid-White-Paper-35-WUE-Usage-Guidelines.pdf>, zuletzt geprüft am 26.07.2019.
- Paul Mathew, Srirupa Ganguly, Steve Greenberg and Dale Sartor (2010): Self-benchmarking Guide for Data Centers: Metrics, Benchmarks, Actions, zuletzt geprüft am 23.04.2018.
- Pauly, Bastian (2020): Pressemitteilung. Deutsche Rechenzentren haben höchste Stromkosten in Europa. Hg. v. BITKOM. Online verfügbar unter <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Deutsche-Rechenzentren-haben-hoehchste-Stromkosten-in-Europa>, zuletzt geprüft am 01.05.2020.

Peper, Søren; Grove-Smith, Jessica (2013a): Monitoring Passivhaus-Hallenbad Lippe-Bad Lünen. Passivhaus Institut. Darmstadt. Online verfügbar unter [https://passiv.de/downloads/05\\_hallenbad\\_luenen\\_monitoring.pdf](https://passiv.de/downloads/05_hallenbad_luenen_monitoring.pdf), zuletzt geprüft am 20.05.20.

Peper, Søren; Grove-Smith, Jessica (2013b): Monitoring Passivhaus-Hallenbad Lippe-Bad Lünen. Hg. v. Passivhaus Institut. Darmstadt, zuletzt geprüft am 27.05.2020.

Petterson, Mike (2010): ERE: A metric for measuring the benefit of reuse energy from a data center. The Green Grid. Online verfügbar unter [https://eehpcwg.llnl.gov/documents/infra/06\\_energyreuseefficiencymetric.pdf](https://eehpcwg.llnl.gov/documents/infra/06_energyreuseefficiencymetric.pdf), zuletzt geprüft am 26.07.2019.

Pflueger, John (2008): Re-defining the Green Data Center. A Dell Technical White Pape. DELL. Online verfügbar unter [https://www.dell.com/downloads/global/vectors/dec\\_2008\\_redefining.pdf](https://www.dell.com/downloads/global/vectors/dec_2008_redefining.pdf), zuletzt geprüft am 26.07.2019.

Powering Ahead with Microsoft's Second Wind Project in Europe (2017). In: *Microsoft Green Blog*. Online verfügbar unter <https://blogs.microsoft.com/green/2017/11/02/powering-ahead-microsofts-second-wind-project-europe/>, zuletzt geprüft am 12.03.2018.

PUBLIC LAW 111-203 (2010): DODD-FRANK WALL STREET REFORM AND CONSUMER PROTECTION ACT. Dodd-Frank Act. Online verfügbar unter <https://www.govinfo.gov/content/pkg/PLAW-111publ203/pdf/PLAW-111publ203.pdf>, zuletzt geprüft am 10.01.2019.

Rasmussen, Neil (2006): Rack Powering Options for High Density in 230 V AC Countries. Hg. v. APC. Online verfügbar unter Rack Powering Options for High Density in 230 V AC Countries. APC.

Ray, Partha Pratim (2010): The Green Grid Saga - A Green Initiative to Data Centers. Indian Journal of Computer Science and Engineering. Online verfügbar unter [https://www.researchgate.net/publication/49616229\\_The\\_green\\_grid\\_saga\\_-\\_a\\_green\\_initiative\\_to\\_data\\_centers\\_a\\_review](https://www.researchgate.net/publication/49616229_The_green_grid_saga_-_a_green_initiative_to_data_centers_a_review), zuletzt geprüft am 26.07.2019.

RedHat OpenShift (Hg.) (2020): Application Health. Online verfügbar unter [https://docs.openshift.com/enterprise/3.1/dev\\_guide/application\\_health.html](https://docs.openshift.com/enterprise/3.1/dev_guide/application_health.html), zuletzt geprüft am 09.09.2020.

Referat 67 (1999): Salzstreuung - Auswirkungen auf die Gewässer. Hg. v. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft. Online verfügbar unter [https://www.lfu.bayern.de/wasser/merkblattsammlung/teil3\\_grundwasser\\_und\\_boden/doc/nr\\_321.pdf](https://www.lfu.bayern.de/wasser/merkblattsammlung/teil3_grundwasser_und_boden/doc/nr_321.pdf), zuletzt geprüft am 19.06.2018.

REHAU (Hg.) (2020): Geothermie. Heizen mit Tiefenwärme. Online verfügbar unter <https://www.rehau.com/de-de/geothermie>, zuletzt aktualisiert am 27.05.2020, zuletzt geprüft am 27.05.2020.

Reply Systel (Hg.) (2014): SLA Management. Online verfügbar unter [https://www.reply.com/Documents/7580\\_img\\_SYTR10\\_SLA\\_Management\\_ENG.pdf](https://www.reply.com/Documents/7580_img_SYTR10_SLA_Management_ENG.pdf), zuletzt geprüft am 09.09.2020.

Rittal (Hg.) (2020): Edge Data Center Konfigurator. Online verfügbar unter [https://www.rittal.com/de-de/content/de/support/software/ausw\\_hlen/edge\\_data\\_center\\_konfigurator/edge-data-center-konfigurator.jsp](https://www.rittal.com/de-de/content/de/support/software/ausw_hlen/edge_data_center_konfigurator/edge-data-center-konfigurator.jsp), zuletzt geprüft am 01.12.2020.

Rouse, Margaret (2020): Job scheduler. Definition. Hg. v. SearchDataCenter. Online verfügbar unter <https://searchdatacenter.techtarget.com/definition/job-scheduler>, zuletzt geprüft am 09.09.2020.

Rüdiger, Ariane; Ostler, Ulrike (2020): Was ist eine Power Distribution Unit – PDU? Online verfügbar unter <https://www.datacenter-insider.de/was-ist-eine-power-distribution-unit-pdu-a-670519/>, zuletzt aktualisiert am 21.04.2020, zuletzt geprüft am 21.04.2020.

RWE Supply & Trading GmbH (2016): Erlöse durch Vermarktung ihres Notstromaggregats, zuletzt geprüft am 21.04.2020.

Norm SA8000 Standard, 1997: SA8000. Online verfügbar unter <http://www.sa-intl.org/index.cfm?fuseaction=Page.ViewPage&PageID=1689>.

Sandrock, Matthias; Et. al (2016): Erneuerbare Energien im Fernwärmenetz Hamburg. Teil 1: Handlungsoptionen für einen kurzfristigen Ersatz des Kraftwerks Wedel. Hg. v. HIC Hamburg Institut Consulting GmbH. Hamburg. Online verfügbar unter <https://www.hamburg-institut.com/images/pdf/studien/161207%20%20Bericht%20BUE.pdf>, zuletzt geprüft am 27.05.2020.

Schäfer, Volkmar; Negele, Bernhard (2008): Absorptionskältemaschinen - Anwendungsbeispiel. Hg. v. KI Kälte Luft Klimatechnik (Wissenschaft Kältetechnik/Absorption).

Schlitt, Daniel; Nebel, Wolfgang (2016): Data Center Performance Model for Evaluating Load Dependent Energy Efficiency. 4th International Conference on ICT for Sustainability.

Schlitt, Daniel; Schomaker, Gunnar; Nebel, Wolfgang (2014): Energy-Efficient Data Centers. Third International Workshop E<sup>2</sup>DC. Cambridge: Springer. Online verfügbar unter <https://www.offis.de/offis/publikation/gain-more-from-pue-assessing-data-center-infrastructure-power-adaptability.html>, zuletzt geprüft am 29.07.2019.

Schmitz, Ludger; Ostler, Ulrike (2014): RZ-Standortwahl: Alptraum auf der grünen Wiese. Hg. v. Data Center Insider. Online verfügbar unter <https://www.datacenter-insider.de/index.php/rz-standortwahl-alptraum-auf-der-gruenen-wiese-a-447778/>, zuletzt aktualisiert am 08.09.2020.

Schödwel; Björn; Prof. Dr. Rüdiger Zarnenkov (2018a): Kennzahlen und Indikatoren für die Beurteilung von Ressourceneffizienz von Rechenzentren und Prüfung der praktischen Anwendbarkeit. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-02-23\\_texte\\_19-2018\\_ressourceneffizienz-rechenzentren.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-02-23_texte_19-2018_ressourceneffizienz-rechenzentren.pdf), zuletzt geprüft am 25.07.2019.

Schödwel, Björn; Ere, Koray; Zarnenkov, Rüdiger (2013): Data Center Green Performance Measurement: State of the Art and Open Research Challenges. Hg. v. Proceedings of the Nineteenth Americas Conference on Information Systems. Chicago. Online verfügbar unter <https://pdfs.semanticscholar.org/89f0/9b28b9151fcd898572138af4e1746f347fb9.pdf>, zuletzt geprüft am 26.07.2019.

Schödwel, Björn; Prof. Dr. Rüdiger Zarnenkov; Liu, Ran; Gröger Jens (2018b): Kennzahlen und Indikatoren für die Beurteilung der Ressourceneffizienz von Rechenzentren und Prüfung der praktischen Anwendbarkeit. UBA-FB 002590. Hg. v. UBA.

Schramm, Dr. Dieter (2008): Data Center of the Future. Von der CO<sub>2</sub>-Neutralität zur Energieeffizienz. DELL. Online verfügbar unter [https://www.eco.de/wp-content/uploads/2014/04/080911\\_keynote1\\_schramm\\_dell.pdf](https://www.eco.de/wp-content/uploads/2014/04/080911_keynote1_schramm_dell.pdf), zuletzt geprüft am 22.04.2020.

Schwan, Ben (2009): Milliardeninvestition in Schottland: Größtes Rechenzentrum mit Ökostrom. In: *Die Tageszeitung: taz*. Online verfügbar unter <http://www.taz.de/!5160087/>, zuletzt geprüft am 12.03.2018.

Siegmund-Schultze, Nicola (2013): Legionelleninfektionen in Warstein: Größter Ausbruch in Deutschland. Hg. v. Deutsches Ärzteblatt. Online verfügbar unter <https://www.aerzteblatt.de/archiv/146512/Legionelleninfektionen-in-Warstein-Groesster-Ausbruch-in-Deutschland>, zuletzt geprüft am 01.08.2020.

Smolaks, Max (2019): BA and CBRE settle dispute over 2017 data center outage. Hg. v. Data Center Dynamics. Online verfügbar unter <https://www.datacenterdynamics.com/news/ba-and-cbre-settle-dispute-over-2017-data-center-outage/>, zuletzt geprüft am 01.05.2020.

SPEC (Hg.) (2019): SPECPower\_ssj@2008. Standard Performance Evaluation Corporation. Online verfügbar unter [https://www.spec.org/power\\_ssj2008](https://www.spec.org/power_ssj2008), zuletzt geprüft am 09.09.2020.

SPEC (Hg.) (2020): SERT Suite. Standard Performance Evaluation Corporation. Online verfügbar unter <https://www.spec.org/sert/>, zuletzt geprüft am 01.12.2020.

Sperlich, Tom (2018): Rechenzentrum mit Gleichstrom. In: *heise Online*, 24.11.2018. Online verfügbar unter <https://www.heise.de/newsticker/meldung/Rechenzentrum-mit-Gleichstrom-1605295.html>, zuletzt geprüft am 19.04.2020.426Z.

Stadt Stuttgart (Hg.) (2020): Stuttgarter Verkehrsstatistik. Online verfügbar unter <https://www.stuttgart.de/verkehrsstatistik>, zuletzt geprüft am 01.05.2020.

Stahl, Elisabeth (2006): Power Benchmarking: A New Methodology for Analyzing Performance by Applying Energy Efficiency Metrics. IBM Systems and Technology Group. Online verfügbar unter <ftp://public.dhe.ibm.com/4700/info/sppowerbenchmarking060206.pdf>, zuletzt geprüft am 26.07.2019.

Stanley, John; Brill, Kenneth; Koomey, Jonathan (2007): Four Metrics Define Data Center "Greenness". Enabling users to quantify energy consumption initiatives for environmental sustainability and "bottom line" profitability. Online verfügbar unter <http://www.dcxdc.ru/files%5C4ede4eff-13b0-49d9-b4da-b0406bfc190e.pdf>, zuletzt geprüft am 26.07.2019.

Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (Hg.) (2016): Pressemitteilung. Die Branche IT-Dienstleistungen in Baden-Württemberg. Unter Mitarbeit von Monika Hin. Online verfügbar unter <https://www.statistik-bw.de/Presse/Pressemitteilungen/2016289>, zuletzt geprüft am 01.05.2020.

Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (Hg.) (2018): Pressemitteilung. Atypische Beschäftigung in Baden-Württemberg leicht rückläufig. Unter Mitarbeit von Bernhard Hochstetter. Online verfügbar unter <https://www.statistik-bw.de/Presse/Pressemitteilungen/2018109>, zuletzt geprüft am 01.05.2020.

Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2020a): Grund- und Gewerbesteuerhebesätze der Gemeinden seit 2015. Online verfügbar unter <https://www.statistik-bw.de/FinSteuern/Steuern/Hebesatz-GE.jsp>, zuletzt geprüft am 09.09.2020.

Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (Hg.) (2020b): KFZ und Verkehrsbelastung. Online verfügbar unter <https://www.statistik-bw.de/Verkehr/KFZBelastung/LRt1503.jsp>, zuletzt geprüft am 01.05.2020.

StufeZwei Consulting GmbH (2018): Wie zufrieden sind meine Mitarbeiter? Mitarbeiterzufriedenheit messen und beeinflussen. Indikatoren für die Mitarbeiterzufriedenheit. Online verfügbar unter <https://www.personalcontrolling.de/wie-zufrieden-sind-meine-mitarbeiter-mitarbeiterzufriedenheit-messen-und-beeinflussen/>, zuletzt geprüft am 09-01.2019.

Sullivan, J. L.; Gaines, L. (2012): Status of life cycle inventories for batteries. In: *Energy Conversion and Management* 58, S. 134–148. DOI: 10.1016/j.enconman.2012.01.001.

The Internet Society (Hg.) (1999): Hypertext Transfer Protocol HTTP/1.1. Online verfügbar unter <https://www.w3.org/Protocols/rfc2616/rfc2616.html>, zuletzt geprüft am 09.09.2020.

VDI-Richtlinie 4640, September 2004: Thermische Nutzung des Untergrundes - Direkte Nutzungen. Online verfügbar unter <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-4640-blatt-4-thermische-nutzung-des-untergrundes-direkte-nutzungen>.

Thermofin (2016): Montageanleitung Verdunstungsverflüssiger. Hg. v. thermofin GmbH. Heinsdorfergrund. Online verfügbar unter <https://www.thermofin.de/download.php?download=DE-Montageanleitung-TACE-2016>, zuletzt geprüft am 25.07.2019.

Thorenz, Lynn Kristin (2019): Die IT-Trends bis 2024 von IDC. Hg. v. CIO. Online verfügbar unter <https://www.cio.de/a/die-it-trends-bis-2024-von-idc,3592203>, zuletzt geprüft am 01.05.2020.

TIA (Hg.) (2017): Telecommunications Infrastructure Standards for Data Centers. TIA-942-B. Revision of TIA 942-A. Telecommunications Industry Association.

Torell, W.; Brown, K.; Avelar, V. (2016): The Unexpected Impact of Raising Data Center Temperatures.

TÜV Süd (Hg.) (2020): Rechenzentren nach EN 50600. Online verfügbar unter <https://www.tuvsud.com/de-de/branchen/produzierende-industrie/anlagenbau-betrieb/rechenzentrum-din-en-50600>, zuletzt geprüft am 01.12.2020.

UBA (2001): Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU). Hg. v. Umweltbundesamt. Berlin, zuletzt geprüft am 20.06.2018.

Ulrich Grober (2013): Urtexte. Carlowitz und die Quellen unseres Nachhaltigkeitsbegriffs. Hg. v. Natur und Landschaft. Online verfügbar unter [http://www.beck-shop.de/fachbuch/leseprobe/0028-0615\\_L.pdf](http://www.beck-shop.de/fachbuch/leseprobe/0028-0615_L.pdf), zuletzt geprüft am 26.04.2018.

Umweltbundesamt (Hg.) (2020): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2019. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-der-spezifischen-kohlendioxid-6>, zuletzt geprüft am 01.08.2020.

United States of America (2018): H.R.4943 - CLOUD Act. Online verfügbar unter <https://www.congress.gov/bill/115th-congress/house-bill/4943>, zuletzt geprüft am 01.05.2020.

Urgaonkar, Rahul; Urgaonkar, Bhuvan; Neely, Michael J.; Sivasubramaniam, Anand (2011): Optimal Power Cost Management Using Stored Energy in Data Centers. In: Proceedings of the ACM SIGMETRICS Joint International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems. New York, NY, USA: ACM (SIGMETRICS '11), S. 221–232. Online verfügbar unter <http://doi.acm.org/10.1145/1993744.1993766>, zuletzt geprüft am 18.12.2018.

Vaillant (Hg.) (2020): Was ist die Jahresarbeitszahl (JAZ) einer Wärmepumpe? Online verfügbar unter <https://www.vaillant.de/heizung/heizung-verstehen/tipps-rund-um-ihre-heizung/jahresarbeitszahl/>, zuletzt geprüft am 09.09.2020.

van der Ha, Bianca; Nagtegaal, Bert (2014): Data Centers: Market Archetypes and Case Studies. RenewIT-Projekt (D 7.1). Online verfügbar unter [www.renewit-project.eu](http://www.renewit-project.eu).

van Heddeghem, Ward; Lambert, Sofie; Lannoo, Bart; Colle, Didier; Pickavet, Mario; Demeester, Piet (2014): Trends in worldwide ICT electricity consumption from 2007 to 2012. In: *Computer Communications* 50, S. 64–76. DOI: 10.1016/j.comcom.2014.02.008.

VDE (2015): VDE|FNN Störungsstatistik. Durchschnittliche Dauer von Stromausfällen pro Kunde und Jahr erstmals unter 12 Minuten. Hg. v. Pressemitteilung VDE. Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik (63).

VDE (Hg.) (2018): Mit Normen zukunftssicher planen und betreiben. Rechenzentren. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.vde.com/resource/blob/1689028/5aa313a2b49fd10d2d64ba7800916112/normen-zu-rechenzentren-data.pdf>, zuletzt geprüft am 09.09.2020.

VDI (2019): VDI 2054: Raumlufttechnik - Datenverarbeitung (VDI-Lüftungsregeln), 2019.

vmware (Hg.) (2020): Virtualisierung. Was bedeutet Virtualisierung? Online verfügbar unter <https://www.vmware.com/de/solutions/virtualization.html>, zuletzt geprüft am 09.09.2020.

Vogel Communications Group GmbH & Co. KG (2020): Publikumspreis: Der Deutsche Rechenzentrumspreis 2015 auf DataCenter-Insider.de. Online verfügbar unter <https://www.datacenter-insider.de/specials/deutscher-rechenzentrumspreis/projekte2015/>, zuletzt aktualisiert am 20.04.2020, zuletzt geprüft am 20.04.2020.

WAMAK Wärmepumpen (Hg.) (2020): WAMAK Wärmepumpen. TWW SHR SuperHeatRecovery. Online verfügbar unter <https://www.wamak.eu/de/waermepumpen/69-wasser-wasser>, zuletzt aktualisiert am 27.05.2020, zuletzt geprüft am 27.05.2020.

Wang, Lizhe; Khan, U. (2011): Review of performance metrics for green data centers: a taxonomy study. Online verfügbar unter <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.402.912&rep=rep1&type=pdf>, zuletzt geprüft am 26.07.2019.

Warkentin, Vitalij (2014): Das Green Datacenter. Wenn Rechnen grün wird. Hamburg: Disserta-Verl. Online verfügbar unter <https://books.google.de/books?hl=de&lr=&id=atYxBgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=usv+datacenter&ots=IzBrt2mMGt&sig=6CFHWzYgUFRqaTE1-7iQ4mrnxVs#v=onepage&q=usv%20datacenter&f=false>, zuletzt geprüft am 21.04.2020.

Washburn, Doug; Sidhu, Usman (2010): Helping CIOs Understand "Smart City" Initiatives. Forrester. Online verfügbar unter [https://s3-us-west-2.amazonaws.com/itworldcanada/archive/Themes/Hubs/Brainstorm/forrester\\_help\\_cios\\_smart\\_city.pdf](https://s3-us-west-2.amazonaws.com/itworldcanada/archive/Themes/Hubs/Brainstorm/forrester_help_cios_smart_city.pdf), zuletzt geprüft am 09.09.2020.

Whitehead, Beth; Andrews, Deborah; Shah, Amip (2015): The life cycle assessment of a UK data centre. In: *Int J Life Cycle Assess* 20 (3), S. 332–349. DOI: 10.1007/s11367-014-0838-7.

Wilde, Torsten (2018): Assessing the Energy Efficiency of HighPerformance Computing (HPC) Data Centers. Technische Universität München. Online verfügbar unter <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1399734/file.pdf>, zuletzt geprüft am 29.07.2019.

Wilkens, M.; Terrahe, U. (2012): Orientierungshilfe zur Leistungsdichte und Lastermittlung von Servern, Datenschränken und Rechenzentren.

Williams, Elisa (2020): What is Deployment in Software. Hg. v. wondershare. Online verfügbar unter <https://pdf.wondershare.com/business/what-is-software-deployment.html>, zuletzt geprüft am 09.09.2020.

Wirtschaftsförderung Stadt Karlsruhe (Hg.) (2014): Smart City. Online verfügbar unter <https://www.karlsruhe.de/int/i2/standort/smart.de>, zuletzt geprüft am 01.05.2020.

Wong, Henry (2012): Data Centre Server Efficiency Metic. A Simplified Effective Approach. DELL. Online verfügbar unter [https://docbox.etsi.org/workshop/2012/201206\\_eeworkshop/03\\_MEASUREMENTSandKPIs/INTEL\\_WONG.pdf](https://docbox.etsi.org/workshop/2012/201206_eeworkshop/03_MEASUREMENTSandKPIs/INTEL_WONG.pdf), zuletzt geprüft am 26.07.2019.

WSW Wuppertaler Stadtwerke GmbH: Demand Side Management vs. Demand Response: Happy Power Hour. Der dynamische Stromtarif. Online verfügbar unter <https://www.wsw-online.de/happy-power-hour/wissensbereich/demand-side-management-vs-demand-response/>, zuletzt geprüft am 30.10.2018.

Yuan, Quan; Zhou, Haibo; Li, Jinglin; Liu, Zhihan; Yang, Fangchun; Shen, Xuemin Sherman (2018): Toward Efficient Content Delivery for Automated Driving Services: An Edge Computing Solution. In: *IEEE Network* 32 (1), S. 80–86. DOI: 10.1109/MNET.2018.1700105.

Yuventi, Jumie; Mehdizadeh, Roshan (2013): A Critical Analysis of Power Usage Effectiveness and Its Use as Data Center Energy Sustainability Metrics. Stanford University. Online verfügbar unter <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.363.9829&rep=rep1&type=pdf>, zuletzt geprüft am 26.07.2019.

Zetzsche, Marco (2012): Experimentelle Untersuchungen und regelungstechnische Optimierung einer Ammoniak/Wasser-Absorptionskältemaschine in Kombination mit einem solar angetriebenen Kühlsystem mit Eisspeicher. Unter Mitarbeit von Universität Stuttgart.

ZTE (2016): ZTE and Tencent Construct World's Most Energy-Efficient Mobile Modular Data Center - ZTE Press Release. Online verfügbar unter <https://www.zte.com.cn/global/about/news/2016523ma>, zuletzt aktualisiert am 19.04.2020, zuletzt geprüft am 19.04.2020.

ZVEI (2013): Konfliktrohstoffe. Positionspapier und Hintergrundpapier der Elektroindustrie. ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V. Online verfügbar unter <https://www.dehn.de/sites/default/files/media/files/zvei-konfliktrohstoffe-positionspapier.pdf>, zuletzt geprüft am 01.08.2019.

## Anhang

### A. Anhang A: Auswertung des Fragebogens und externer Daten

Im Laufe des Projekts wurden dokumentiert 37 Rechenzentrumsbetreiber in Baden-Württemberg angesprochen und gebeten die Fragebögen auszufüllen. Dazu kommen noch weitere undokumentierte Versuche der Projektpartner weitere Betreiber für die Ausfüllung der Bögen zu gewinnen. Insgesamt kamen damit ca. 50 Anfragen bei verschiedensten Rechenzentrumsbetreibern zusammen. Durch Recherchen in Publikationen und Internetauftritten konnten weitere Informationen über in Baden-Württemberg ansässige Rechenzentren gesammelt werden.

Im Projekt wurden insgesamt drei Versionen des Fragebogens erstellt. Die erste Version stellte die ausführlichste Variante, was die Anzahl der gestellten Fragen anging, dar. Um die Anzahl der potenziellen Rückmeldungen zu erhöhen, wurde der Fragebogen in der zweiten Version verkürzt. In der dritten, finalen Version wurde der Bogen in drei Fragen Teile nach Kategorie:

- 'IT-Infrastruktur' (IT)
- 'Nicht-IT Infrastruktur und Standort' (Nicht-IT)
- 'Kosten, Zertifizierung und Personal' (Sonstiges)

aufgeteilt. Dies geschah mit dem Hintergedanken, damit zielgerechter das entsprechende Personal innerhalb der Rechenzentren anzusprechen. In diesem Anhang ist die dritte Version des Fragebogens dargestellt. Da die Fragen in der dritten Version Teilmengen der Fragen in der ersten bzw. zweiten Version sind, konnten die entsprechend ausgefüllten Bögen der ersten und zweiten Version den kategorisierten Bögen der dritten Version zugewiesen werden. An dieser Stelle sei angemerkt, dass in der Auswertung der Bögen die Fragen 27 und 28 in der 'Nicht-IT-Infrastruktur' Kategorie als 'Zusatz Frage' deklariert wurden. Dies hat den Hintergrund, dass diese beiden Fragen nur in der ersten Fragebogen Version vorhanden waren und somit nicht im Fragebogen im Anhang erscheinen. Diese Fragen sind jedoch von Relevanz, da sie Teil der Auswertung in Kap. 2 sind.

Die folgende Tabelle gibt Aufschluss über die Rückmeldungen der verteilten Fragebögen. In Klammern steht der Wert, der sich ergibt, wenn noch zwei weitere Rechenzentren aus dem Großraum Frankfurt am Main in die Gesamtanzahl aufgenommen werden würden.

Dokument: Fragebogen „IT“

Allgemeines				
Nr.	Frage	Einheit	Antwort	Notizen
1	Für welche Nutzertypen erbringen sie Dienste?		<input type="checkbox"/> Primär für interne Nutzer <input type="checkbox"/> Primär für externe Nutzer <input type="checkbox"/> Hybrider Betrieb	
2	Wie hoch ist der mittlere Energiebedarf der Rechenzentrums-IT?	kWh, (eine Angabe)	_____ kWh pro Stunde _____ kWh pro Tag _____ kWh pro Jahr	
3	Ist eine redundante Datenanbindung vorhanden?	Ja / Nein	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	
4	Für welchen Anteil des Workloads steht ein Backup-Standort bereit?	% des Workloads	Backup-Standort für _____%	

Rechenzentrum -/ IT-Infrastruktur				
Nr.	Frage	Einheit	Antwort/Notizen	
5	Wie hoch ist das durchschnittliche Alter und die geplante Nutzungsdauer folgender Bestandteile Ihres Rechenzentrums?	In Jahren (Schätzwert)	<input type="checkbox"/> <b>Server:</b> ø-Alter: _____, geplante Nutzungsdauer: _____ <input type="checkbox"/> <b>Storage:</b> ø-Alter: _____, geplante Nutzungsdauer: _____ <input type="checkbox"/> <b>Netzwerkkomponenten:</b> ø-Alter: _____, geplante Nutzungsdauer: _____	
6	Werden die aktuellen Verbrauchswerte (Strom) erfasst?	Ja / Nein	<input type="checkbox"/> Ja, die Daten werden erfasst <input type="checkbox"/> Nein, die Daten werden nicht erfasst	
7	Wurden in den letzten 3-5 Jahren Konsolidierungsmaßnahmen durchgeführt?	Ja / Nein	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	Welche Maßnahmen wurden durchgeführt?

8	Wie schnell ist die aktuelle Anbindung an das WAN?	GBit/s		
9	Welche Latenz haben Sie zu Ihrem Hauptkunden?	ms	<input type="checkbox"/> Wert geschätzt (0ms zulässig): _____ <input type="checkbox"/> Wert gemessen: _____	
10	Welche dieser Dienste nutzen Sie bzw. bieten sie an?		<input type="checkbox"/> Colocation <input type="checkbox"/> IaaS (Infrastructure as a Service) <input type="checkbox"/> HaaS (Hardware as a Service) <input type="checkbox"/> PaaS (Platform as a Service) <input type="checkbox"/> SaaS (Software as a Service) <input type="checkbox"/> keinen	
11	Nutzen Sie eine Software, die Spitzenlasten vermeidet, um Kosteneinsparungen zu erzielen? Welche?	Ja / Nein	<input type="checkbox"/> Ja, folgende: _____ _____ <input type="checkbox"/> Nein	

Nutzung des Rechenzentrums						
Nr.	Frage	Einheit	Antwort/Notizen			
12	Welchen Klassen würden Sie die in Ihrem Rechenzentrum angebotenen Dienste am ehesten zuordnen?		<input type="checkbox"/> HPC <input type="checkbox"/> Sonstige: _____	<input type="checkbox"/> Enterprise-Applications	<input type="checkbox"/> Cloud-Dienste <input type="checkbox"/> Sonstige: _____	<input type="checkbox"/> Sonstige: _____
13	Wie schätzen Sie die Bedeutung der Verfügbarkeit der Dienste dieser Klasse ein?	1-5 (1 = sehr gering)	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5
14	Wie schätzen Sie die Bedeutung der Verlässlichkeit der Dienste dieser Klasse ein?	1-5 (1 = sehr gering)	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5

15	Wie schätzen Sie die Skalierbarkeit der Dienste dieser Klasse ein?	1-5 (1 = sehr gering)	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5
16	Gibt es Lastprofile über die Anzahl an Anfragen je Dienst? (Legen Sie diese bitte bei, falls vorhanden.)	Ja / Nein	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
17	Sind Dienste zeitlich verschiebbar?	Ja / Nein	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
18	Sind Dienste räumlich verschiebbar?	Ja / Nein	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
19	Welchen Automatisierungsgrad hat die Lastverteilung?		<input type="checkbox"/> Manuell <input type="checkbox"/> Teilautomatisiert <input type="checkbox"/> Vollautomatisiert			
20	Welchen Automatisierungsgrad hat das Software-Deployment?		<input type="checkbox"/> keinen <input type="checkbox"/> Manuell <input type="checkbox"/> Teilautomatisiert <input type="checkbox"/> Vollautomatisiert	<input type="checkbox"/> keinen <input type="checkbox"/> Manuell <input type="checkbox"/> Teilautomatisiert <input type="checkbox"/> Vollautomatisiert	<input type="checkbox"/> keinen <input type="checkbox"/> Manuell <input type="checkbox"/> Teilautomatisiert <input type="checkbox"/> Vollautomatisiert	<input type="checkbox"/> keinen <input type="checkbox"/> Manuell <input type="checkbox"/> Teilautomatisiert <input type="checkbox"/> Vollautomatisiert

### Kategorisierung

Nr.	Frage	Einheit	Antwort/Notizen
21	Könnten sie ihr Rechenzentrum einer der folgenden Kategorien zuordnen?		<input type="checkbox"/> <b>Kat. A:</b> Serverraum oder sehr kleines industrielles oder Hochschul RZ <input type="checkbox"/> <b>Kat. B:</b> Auf Landesebene-BW betriebenes oder kommunales RZ <input type="checkbox"/> <b>Kat. C:</b> Wissenschaftliches RZ mit heterogenem Dienstangebot (z.B. Cloud, Enterprise-Applications, HPC, ...) <input type="checkbox"/> <b>Kat. D:</b> Wissenschaftliches RZ mit starkem Fokus auf HPC Dienste <input type="checkbox"/> <b>Kat. E:</b> Größeres industrielles RZ <input type="checkbox"/> <b>Andere Kategorie, Begründung:</b> <hr/> <hr/>

### Auswertung: Fragebogen „IT“

Frage-Nr.	Antwort, Häufigkeiten: <i>Bogen( / extern)</i>	Frage-Nr.	Antworten, Häufigkeit: <i>Bogen( / extern)</i>
1	Option 1: 7 Option 2: 1 Option 3: 0	15, Spalte 4	Option 1: 0 Option 2: 1 Option 3: 0 Option 4: 0 Option 5: 0
2	Option 1, Interval [220;3000]: 5 Option 2, Interval [6100;20101]: 2 Option 3, Interval [3000000;30000000]: 1	16, Spalte 1	Option 1: 2 Option 2: 0
3	Option 1: 8 / 8 Option 2: 0	16, Spalte 2	Option 1: 0 Option 2: 6
4	Option 1, Interval [10;100]: 4	16, Spalte 3	Option 1: 1 Option 2: 4
5	Option 1, Unter-Option 1, Interval [1;4]: 7 Option 1, Unter-Option 2, Interval [3;7]: 8 Option 2, Unter-Option 1, Interval [1;5]: 7 Option 2, Unter-Option 2, Interval [3;7]: 8 Option 3, Unter-Option 1, Interval [3;5]: 7 Option 3, Unter-Option 2, Interval [3;8]: 8	16, Spalte 4	Option 1: 0 Option 2: 2
6	Option 1: 2 Option 2: 3	17, Spalte 1	Option 1: 2 Option 2: 0
7	Option 1: 6 Option 2: 2	17, Spalte 2	Option 1: 0 Option 2: 6
8	Option 1, Interval [1;100]: 7 / 4	17, Spalte 3	Option 1: 0

Frage-Nr.	Antwort, Häufigkeiten: <i>Bogen( / extern)</i>	Fragen-Nr.	Antworten, Häufigkeit: <i>Bogen( / externe)</i>
			Option 2: 4
9	Option 1, Interval [1;1]: 1 Option 2, Interval [0;0,35]: 2	17, Spalte 4	Option 1: 0 Option 2: 1
10	Option 1: 1 / 6 Option 2: 2 / 2 Option 3: 1 / 0 Option 4: 1 / 3 Option 5: 0 / 3 Option 6: 5 / 0	18, Spalte 1	Option 1: 0 Option 2: 2
11	Option 1: 0 Option 2: 4	18, Spalte 2	Option 1: 2 Option 2: 3
12	Option 1: 2 / 0 Option 2: 6 / 0 Option 3: 5 / 4 Option 4: 2 / 3	18, Spalte 3	Option 1: 1 Option 2: 3
13, Spalte 1	Option 1: 0 Option 2: 0 Option 3: 0 Option 4: 2 Option 5: 0	18, Spalte 4	Option 1: 1 Option 2: 1
13, Spalte 2	Option 1: 0 Option 2: 0 Option 3: 0 Option 4: 2 Option 5: 4	19, Spalte 1	Option 1: 0 Option 2: 0 Option 3: 1
13, Spalte 3	Option 1: 0 Option 2: 0 Option 3: 1 Option 4: 1 Option 5: 3	19, Spalte 2	Option 1: 0 Option 2: 4 Option 3: 2
13, Spalte 4	Option 1: 0 Option 2: 0 Option 3: 0 Option 4: 1 Option 5: 1	19, Spalte 3	Option 1: 1 Option 2: 3 Option 3: 1
14, Spalte 1	Option 1: 0 Option 2: 0 Option 3: 0 Option 4: 2 Option 5: 0	19, Spalte 4	Option 1: 1 Option 2: 1 Option 3: 0
14, Spalte 2	Option 1: 0 Option 2: 0 Option 3: 0 Option 4: 2 Option 5: 4	20, Spalte 1	Option 1: 0 Option 2: 0 Option 3: 1 Option 4: 1

Frage-Nr.	Antwort, Häufigkeiten: <i>Bogen( / extern)</i>	Fragen-Nr.	Antworten, Häufigkeit: <i>Bogen( / externe)</i>
14, Spalte 3	Option 1: 0 Option 2: 0 Option 3: 1 Option 4: 1 Option 5: 3	20, Spalte 2	Option 1: 2 Option 2: 0 Option 3: 4 Option 4: 0
14, Spalte 4	Option 1: 0 Option 2: 0 Option 3: 0 Option 4: 1 Option 5: 1	20, Spalte 3	Option 1: 2 Option 2: 0 Option 3: 1 Option 4: 2
15, Spalte 1	Option 1: 0 Option 2: 0 Option 3: 0 Option 4: 2 Option 5: 0	20, Spalte 4	Option 1: 0 Option 2: 0 Option 3: 2 Option 4: 0
15, Spalte 2	Option 1: 0 Option 2: 2 Option 3: 1 Option 4: 1 Option 5: 2	21	Option 1: 0 Option 2: 0 Option 3: 0 Option 4: 0 Option 5: 1 Option 6: 0
15, Spalte 3	Option 1: 0 Option 2: 0 Option 3: 1 Option 4: 1 Option 5: 3		

Dokument: Fragebogen „Nicht-IT“

Allgemeines und Standort				
Nr.	Frage	Einheit	Antwort	Notizen
1	Wo steht Ihr Rechenzentrum?	Adresse oder GPS		
2	Bewerten Sie folgende Kriterien für die Standortwahl Ihres Rechenzentrums:	1 - 8 (8 = wichtigstes, jeder Wert einmal wählbar)	<input type="checkbox"/> Stromversorgung (Redundanz und Sicherheit) <input type="checkbox"/> Höhe der Bandbreite <input type="checkbox"/> Latenz der Datenverbindung <input type="checkbox"/> Physische Sicherheit der Umgebung (z.B. Einbruch, Anschläge, Unfälle, Naturkatastrophen) <input type="checkbox"/> Verkehrsanbindung <input type="checkbox"/> Grundstückspreis <input type="checkbox"/> Strompreis <input type="checkbox"/> Verfügbarkeit von erneuerbarem Strom	
3	Welche dieser Indikatoren, falls bekannt, erheben sie?		<input type="checkbox"/> PUE <input type="checkbox"/> DCIE <input type="checkbox"/> DCeP <input type="checkbox"/> ERE <input type="checkbox"/> CUE <input type="checkbox"/> DH-UR <input type="checkbox"/> SPEC <input type="checkbox"/> REF <input type="checkbox"/> WUE <input type="checkbox"/> ITEE <input type="checkbox"/> ITEU <input type="checkbox"/> EER <input type="checkbox"/> COP <input type="checkbox"/> ERF <input type="checkbox"/> CPE <input type="checkbox"/> TCO	<b>Für welche Fragestellungen?</b>
4	Wie hoch ist der aktuelle Jahres-PUE und Ziel-PUE (falls vorhanden) Ihres Rechenzentrums?	(Schätzwert)	Aktueller PUE: _____ Ziel-PUE: _____	

5	Gibt es in direkter Umgebung (ca. 500m) von Ihrem Rechenzentrum einen (theoretischen) Bedarf an Wärme? Wenn ja, erfolgt die Deckung dieses Bedarfs durch Ihr RZ bereits oder ist/war dies in Planung?	Ja / Nein	<input type="checkbox"/> Ja, es existiert ein Bedarf und dieser wird durch das RZ gedeckt, bzw. es ist geplant, diesen zu decken <input type="checkbox"/> Ja, es existiert ein Bedarf. Dieser wird jedoch <b>nicht</b> gedeckt <input type="checkbox"/> Nein, es existiert kein Bedarf/ist nicht bekannt	<b>Wo ist der Bedarf vorhanden?</b> <input type="checkbox"/> Öffentliche Gebäude <input type="checkbox"/> Eigenes Unternehmen <input type="checkbox"/> Private Gebäude <input type="checkbox"/> Sonstige: _____  <b>Beispiele:</b> <input type="checkbox"/> Raumwärme <input type="checkbox"/> Prozesswärme <input type="checkbox"/> Sonstige: _____
---	---	-----------	--	---

Stromversorgung				
Nr.	Frage	Einheit	Antwort/Notizen	
6	Auf welcher Netzebene ist Ihr Rechenzentrum angeschlossen?		<input type="checkbox"/> Hochspannungsebene (60 kV bis 150 kV) <input type="checkbox"/> Mittelspannungsebene (1 kV bis 35 kV) <input type="checkbox"/> Niederspannungsebene (230 V/400 V)	
7	Wie hoch ist die Anschlussleistung Ihres Rechenzentrums (real/maximal)?	kW (Schätzwert)	<input type="checkbox"/> Real: _____ kW <input type="checkbox"/> Maximal: _____ kW	
8	Decken Sie einen Teil Ihres Strombedarfs durch eigene Erzeugung?	Ja / Nein	<input type="checkbox"/> Ja, Anteil: _____ %, welche Technologien: _____ <input type="checkbox"/> Nein	
9	Betreiben Sie eine Netzersatzanlage? Wären Sie bereit diese von einem Dritten steuern zu lassen?	Ja / Nein	<input type="checkbox"/> Ja, externe Steuerung ist denkbar <input type="checkbox"/> Ja, externe Steuerung ist aber <b>nicht</b> denkbar <input type="checkbox"/> Nein	

Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV)			
Nr.	Frage	Einheit	Antwort/Notizen
10	Wieviel Leistung und Energie kann Ihre USV liefern?	kW und kWh (Schätzwerte)	<input type="checkbox"/> ____ kW <input type="checkbox"/> ____ kWh
11	Können Sie sich vorstellen, ihre gesamte USV-Anlage durch einen Dritten steuern zu lassen?	Ja / Nein	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein

Klimatisierung und Energieerzeugungssystem			
Nr.	Frage	Einheit	Antwort/Notizen
12	Ist das Rechenzentrum in einem anderen Gebäude integriert?	Ja / Nein	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
13	Können oder konnten Sie Einfluss auf bauliche Maßnahmen bzgl. Ihres Rechenzentrums nehmen?	Ja / Nein	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein <b>Umfang und Art der Einflussnahme:</b>
14	Haben Sie ein Monitoringsystem implementiert, welches die internen Energieflüsse kontinuierlich erfasst?	Ja / Nein	<input type="checkbox"/> Ja, vollständige Erfassung <input type="checkbox"/> Ja, teilweise Erfassung <input type="checkbox"/> Nein <b>Erfasste Energieflüsse:</b>
15	Ist Ihr Klimatisierungskonzept in Ausbaustufen geplant. Wenn ja, ist die maximale Stufe schon erreicht?		<input type="checkbox"/> Planung erfolgte in Ausbaustufe (max. Ausbaustufe wurde erreicht) <input type="checkbox"/> Planung erfolgte in Ausbaustufe (max. Ausbaustufe wurde noch nicht erreicht) <input type="checkbox"/> Planung erfolgte nicht in Ausbaustufe (max. Ausbaustufe wurde erreicht) <input type="checkbox"/> Planung erfolgte nicht in Ausbaustufe (max. Ausbaustufe wurde noch nicht erreicht)
16	Welche Medien werden in Ihrer Kühlung verwendet?		<input type="checkbox"/> Luft <input type="checkbox"/> Wasser <input type="checkbox"/> Öl <input type="checkbox"/> Sonstige: _____

17	Ist eine Einhausung vorhanden?	Ja / Nein	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
18	Erfolgt in Ihrem Rechenzentrum eine Regelung der Luftfeuchtigkeit?	Ja / Nein	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
19	Wie erfolgt die Kühlung Ihrer Serverräume?		<input type="checkbox"/> Raumkühlung über <input type="checkbox"/> Wand oder Deckenklimateure (Kühlung des kompletten Raumvolumens) <input type="checkbox"/> Kaltluftsteuerung über Doppelboden bei Rackausrichtung warm/kalt <input type="checkbox"/> Kaltluftsteuerung über Doppelboden mit Kaltgangeinhausung <input type="checkbox"/> Reihenkühlgeräte mit Kaltgangeinhausung (Umluftkühlgeräte (Sidecooler) direkt in den Rack-Reihen) <input type="checkbox"/> Rear-Door-Cooling (Die Rücktür der Racks ist ein mit Wasser durchflossenes Register, die warme Luft tritt aus den IT-Komponenten aus und durchströmt direkt das Register und wird abgekühlt -> keine Einhausung notwendig) <input type="checkbox"/> Weitere: _____
20	Ist Ihr Rechenzentrum in ein Nahkältenetz eingebunden?	Ja / Nein	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein

17	Ist eine Einhausung vorhanden?	Ja / Nein	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
18	Erfolgt in Ihrem Rechenzentrum eine Regelung der Luftfeuchtigkeit?	Ja / Nein	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
19	Wie erfolgt die Kühlung Ihrer Serverräume?		<input type="checkbox"/> Raumkühlung über <input type="checkbox"/> Wand oder Deckenklimateure (Kühlung des kompletten Raumvolumens) <input type="checkbox"/> Kaltluftsteuerung über Doppelboden bei Rackausrichtung warm/kalt <input type="checkbox"/> Kaltluftsteuerung über Doppelboden mit Kaltgangeinhausung <input type="checkbox"/> Reihenkühlgeräte mit Kaltgangeinhausung (Umluftkühlgeräte (Sidecooler) direkt in den Rack-Reihen) <input type="checkbox"/> Rear-Door-Cooling (Die Rücktür der Racks ist ein mit Wasser durchflossenes Register, die warme Luft tritt aus den IT-Komponenten aus und durchströmt direkt das Register und wird abgekühlt -> keine Einhausung notwendig) <input type="checkbox"/> Weitere: _____
20	Ist Ihr Rechenzentrum in ein Nahkältenetz eingebunden?	Ja / Nein	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein

21	Welche Varianten werden in Ihrem Rechenzentrum für die Kälteerzeugung eingesetzt?		<input type="checkbox"/> Frei Kühlung als: <input type="checkbox"/> Trocken <input type="checkbox"/> Besprüht <input type="checkbox"/> Adiabatisch <input type="checkbox"/> Hybrid <input type="checkbox"/> offenes System <input type="checkbox"/> geschlossenes System <input type="checkbox"/> natürliche Wärmesenke (Fluss, See etc.) <input type="checkbox"/> Kompressionskälte <input type="checkbox"/> Kompressionskälte in Kombination mit Photovoltaik (PV) <input type="checkbox"/> Adiabate Luft-Luft-Systeme <input type="checkbox"/> Sorptionskältemaschinen (Kälte aus Wärme) in Kombination mit Solarthermie <input type="checkbox"/> Sorptionskältemaschinen (Kälte aus Wärme) in Kombination mit BHKW Solarthermie <input type="checkbox"/> KWKK und Kälte-/Wärmenetze <input type="checkbox"/> Sonderlösungen (z.B. Kyoto Kühlung) <input type="checkbox"/> Sonstige: _____
22	Welches Kältemittel setzen sie in Ihrer Kompressionskälte ein?		<input type="checkbox"/> Verwendung von Kompressionskälte: <input type="checkbox"/> Ammoniak <input type="checkbox"/> CO2 <input type="checkbox"/> Propan <input type="checkbox"/> Sonstige: _____ <input type="checkbox"/> Keine Verwendung von Kompressionskälte
23	Wird in Ihrem Rechenzentrum ein Kältespeicher genutzt? Wenn ja, welcher?	Ja / Nein	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Wasser <input type="checkbox"/> Eisspeicher <input type="checkbox"/> Latentwärmespeicher / Phasenwechselmaterialien (PCM) <input type="checkbox"/> Sonstige: _____ <input type="checkbox"/> Nein
24	Sind Ihnen Potentiale für die Steigerung der Energieeffizienz Ihres Rechenzentrums bekannt?	Ja / Nein	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
25	Nutzen Sie für den Betrieb Ihres Rechenzentrums erneuerbare Energien?	Ja / Nein	<input type="checkbox"/> Ja, Anteil: _____ % <input type="checkbox"/> Nein

### Kategorisierung

Nr.	Frage	Einheit	Antwort/Notizen
26	Könnten sie ihr Rechenzentrum einer der folgenden Kategorien zuordnen?		<input type="checkbox"/> <b>Kat. A:</b> RZ mit realer Anschlussleistung im Bereich $0kW < x < 60kW$ <input type="checkbox"/> <b>Kat. B:</b> RZ mit realer Anschlussleistung im Bereich $60kW \leq x < 600kW$ <input type="checkbox"/> <b>Kat. C:</b> RZ mit realer Anschlussleistung im Bereich $600kW \leq x < 1.5MW$ <input type="checkbox"/> <b>Kat. D:</b> RZ mit realer Anschlussleistung im Bereich $1.5MW \leq x < 4MW$ <input type="checkbox"/> <b>Kat. E:</b> RZ mit realer Anschlussleistung von mindestens $4MW$

### Auswertung: Fragebogen „Nicht-IT“

Frage-Nr.	Antwort, Häufigkeiten: Bogen( / extern)	Frage-Nr.	Antwort, Häufigkeiten: Bogen( / extern)
2, (Mehrfachnennungen aus erstem Teil des Fragebogens möglich)	Option 1, Interval [7;8]: 5 Option 2, Interval [4;8]: 5 Option 3, Interval [4;8]: 5 Option 4, Interval [1;7]: 5 Option 5, Interval [6;8]: 5 Option 6, Interval [1;8]: 5 Option 7, Interval [3;8]: 5 Option 8, Interval [2;8]: 5	15	Option 1: 0 Option 2: 5 Option 3: 4 Option 4: 1
3, links nach rechts	Option 1: 7 / 6 Option 2: 1 Option 3: 0	16	Option 1: 6 Option 2: 6 Option 3: 0

Frage-Nr.	Antwort, Häufigkeiten: <i>Bogen( / extern)</i>	Frage-Nr.	Antwort, Häufigkeiten: <i>Bogen( / extern)</i>
	Option 4: 1 Option 5: 0 Option 6: 0 Option 7: 2 Option 8: 0 Option 9: 2 Option 10: 1 Option 11: 1 Option 12: 3 Option 13: 4 Option 14: 0 Option 15: 3 Option 16: 6		Option 4: 1
4	Option 1, Interval [1,3;2,5]: 4 / 9 Option 2, Interval [1,2;1,3]: 3	17	Option 1: 6 Option 2: 2
5	Option 1: 2 Option 2: 4 Option 3: 3	18	Option 1: 7 Option 2: 1
6	Option 1: 0 Option 2: 7 / 2 Option 3: 1	19	Option 1: 0 / 1 Option 2: 3 / 3 Option 3: 2 / 4 Option 4: 2 Option 5: 2 Option 6: 1
7	Option 1, Interval [23,4000]: 5 / [36,9;21000] 9 Option 2, Interval [26,5600]: 7 / [36,9;21000] 9	20	Option 1: 3 Option 2: 5
8	Option 1, Interval [unbekannt]: 1 Option 2: 7	21	Option 1, Unter-Option 1: 1 / 1 Option 1, Unter-Option 2: 0 / 1 Option 1, Unter-Option 3: 1 / 1 Option 1, Unter-Option 4: 2 / 0

Frage-Nr.	Antwort, Häufigkeiten: <i>Bogen( / extern)</i>	Frage-Nr.	Antwort, Häufigkeiten: <i>Bogen( / extern)</i>
			Option 1, Unter-Option 5: 2 / 0 Option 1, Unter-Option 6: 1 / 6 Option 1, Unter-Option 7: 0 / 0 Option 2: 6 / 5 Option 3: 0 / 0 Option 4: 0 / 0 Option 5: 0 / 0 Option 6: 0 / 1 Option 7: 0 / 1 Option 8: 0 / 0 Option 9: 1
9	Option 1: 1 / 0 Option 2: 2 / 12 Option 3: 4 / 1	22	Option 1, Unter-Option 1: 0 Option 1, Unter-Option 2: 0 Option 1, Unter-Option 3: 0 Option 1, Unter-Option 4: 0 Option 2: 0
10	Option 1, Interval [10;8000]: 8 / 7 Option 2, Interval [10;16000]: 4	23	Option 1, Unter-Option 1: 3 / 1 Option 1, Unter-Option 2: 0 Option 1, Unter-Option 3: 0 Option 1, Unter-Option 4: 0 Option 2: 4
11	Option 1: 2 Option 2: 6	24	Option 1: 5 Option 2: 3
12	Option 1: 6 Option 2: 2	25	Option 1, Interval [2;100]: 5 / 3 Option 2: 2
13	Option 1: 5 Option 2: 3	26	Option 1: 0 Option 2: 0 Option 3: 0 Option 4: 1 Option 5: 0
14	Option 1: 2 Option 2: 0 Option 3: 6	27, Zusatz	Option 1: 4 / 6 Option 2: 2 / 1
		28, Ist Ihre Rechenzentrums	Option 1: 0 / 5 Option 2: 0 / 0

Frage-Nr.	Antwort, Häufigkeiten: <i>Bogen( / extern)</i>	Frage-Nr.	Antwort, Häufigkeiten: <i>Bogen( / extern)</i>
		Verfügbarkeit zertifiziert? Wenn ja, nach welchem Standard?	Option 3: 0 / 1 Option 4: 1 / 5 Option 5: 0 / 0

### Dokument: Fragebogen „Sonstiges“

Allgemeines und Zertifizierung				
Nr.	Frage	Einheit	Antwort	Notizen
1	Welchem Typ von Rechenzentrum würden Sie sich am ehesten zuordnen?		<input type="checkbox"/> Rechenzentrum im Öffentlichen Sektor <input type="checkbox"/> Wissenschaftliches/Hochschulrechenzentrum <input type="checkbox"/> Industrielles Rechenzentrum Branche: _____	
2	Betrachten Sie Ihre IT/RZ als Teil Ihres Kerngeschäftes?	Ja / Nein	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	
3	Ist Ihr Rechenzentrum zertifiziert? Wenn ja, nach welchem Standard?	Ja / Nein	<input type="checkbox"/> Ja für Energieeffizienz nach: _____ <input type="checkbox"/> Ja für Sicherheit nach: _____ <input type="checkbox"/> Nein	
4	Betreiben Sie Energiemanagement in Ihrem Rechenzentrum? Wenn ja, wurde dieses zertifiziert? (Bsp.: ISO 50001, EMAS)		<input type="checkbox"/> Ja, Zertifizierung nach: _____ <input type="checkbox"/> Ja, ohne Zertifizierung <input type="checkbox"/> Nein	

Kostenstruktur				
Nr.	Frage	Einheit	Antwort/Notizen	
5	In welchem Bereich befinden sich ihre Stromkosten?	Cent/kWh	<input type="checkbox"/> 0 Cent/kWh < x < 10 Cent/kWh <input type="checkbox"/> 10 Cent/kWh ≤ x < 20 Cent/kWh <input type="checkbox"/> 20 Cent/kWh ≤ x	
6	Nutzen Sie einen variablen Stromtarif?	Ja / Nein	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	<b>Ausgestaltung?</b>

Personalstruktur				
Nr.	Frage	Einheit	Antwort	Notizen
7	Wird in Ihrem Unternehmen die Mitarbeiterzufriedenheit in regelmäßigen Zeitabständen erhoben?	Ja / Nein	<input type="checkbox"/> Ja, Zeitraum (Monaten): _____ <input type="checkbox"/> Nein	
8	Gibt es die Möglichkeit in Ihrem Rechenzentrum eine Ausbildung zu absolvieren? Wenn ja, bilden Sie derzeit Personen aus?	Ja / Nein	<input type="checkbox"/> Ja, momentan werden Personen ausgebildet <input type="checkbox"/> Ja, momentan werden jedoch <b>keine</b> Personen ausgebildet <input type="checkbox"/> Nein	<b>Anmerkungen:</b>
9	Gibt es einen Weiterbildungsplan für das laufende oder kommende Jahr für alle Mitarbeiter?	Ja / Nein	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	
10	Haben Sie ein System eingeführt um Verbesserungsvorschläge aus der Belegschaft systematisch zu sammeln und auszuwerten?	Ja / Nein	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	
11	Welcher Anteil ihres Personals ist festangestellt in ihrem Rechenzentrum?	(Schätzwert)	<input type="checkbox"/> Anteil: _____ %	
12	Unterstützt Ihr Unternehmen soziale Projekte in Deutschland? (Bsp.: Spenden, Fundraising, Unterstützen der Mitarbeiter an sozialen Projekten teilzunehmen)	Ja / Nein	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	<b>Welche?</b>
13	Hat Ihr Unternehmen ethische Grundsätze schriftlich verankert und an Ihre Mitarbeiter kommuniziert?	Ja / Nein	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	

## Auswertung: Fragebogen „Sonstiges“

Frage-Nr.	Antwort, Häufigkeiten: <i>Bogen( / extern)</i>	Frage-Nr.	Antwort, Häufigkeiten: <i>Bogen( / extern)</i>
1	Option 1: 2 Option 2: 6 Option 3: 1	8	Option 1: 3 Option 2: 1 Option 3: 2
2	Option 1: 7 Option 2: 2	9	Option 1: 3 Option 2: 3
3	Option 1 (Name): EN 16247 (1) / <i>DIN EN 50600 (1); ISO 14001 (1); Premiumzertifikat TÜV (1)</i> Option 2 (Name): <i>unbekannt (1); BSI (1); ISO 27001 (1); Basis IT-Grundschutz (1) / ISO 27001 (4); ISO 27018 (1); ISO 9001 (1); ISO 20000 (1)</i> Option 3: 6 / 0	10	Option 1: 1 Option 2: 5
4	Option 1 (Name): ISO 50001 (1); <i>GreenIT 2015 (1) / ISO 14001 (1)</i> Option 2: 7 / 1 Option 3: 2	11	Option 1, Interval [20,100]: 7
5	Option 1: 2 Option 2: 4 Option 3: 0	12	Option 1: 1 / 2 Option 2: 4
6	Option 1: 1 Option 2: 5	13	Option 1: 5 Option 2: 1
7	Option 1, Interval [48;48]: 2 Option 2: 4		

## B. Anhang B: Lastabhängige Leistungsaufnahme verschiedener Servermodelle

Model	Leistungsaufnahme in W (20% Last)	Leistungsaufnahme in W (40% Last)	Leistungsaufnahme in W (80% Last)
SYS-1029U-TR4	133	242	316
Server 1123US-TR4	173	236	266
PowerEdge T630	108	172	217
PowerEdge R730	105	166	205
PowerEdge R740	147	255	344
PowerEdge R7425	154	214	253
PowerEdge R840	286	511	710
PowerEdge R640	151	261	357
PowerEdge R940	292	502	694
UCS C220 M3	98,5	153	204
ThinkSystem SR650	139	217	273

ThinkSystem SD530	597	929	1179
ThinkSystem SD530	583	911	1150
ThinkSystem SN850	2102	3302	4141
ProLiant DL360 Gen9	101	162	218
ProLiant DL560 Gen9	218	340	433
ProLiant ML350 Gen10	149	258	347
ProLiant DL560 Gen10	277	510	716
ProLiant DL385 Gen10	148	199	246
ProLiant DL360 Gen10	82,2	138	178
<b>Mittelwert</b>	302,185	483,9	622,35

### C. Anhang C: Verzeichnis der Leistungsindikatoren / Kennzahlen

Kennzahl/Indikator	Bezeichnung/(Beschreibung)	Quelle
80 PLUS	/ (Wirkungsgradrating für Netzteile)	(Mathew et al. 2009)
AC-AC Effizienz	/ (Effizienz einer USV Anlage)	(Hanstein 2016)
AE	Airflow Efficiency /	(Capozzoli et al. 2014)
AEU	Air Economizer Utilization/(Anteil Freikühlung pro Jahr)	(Paul Mathew, Srirupa Ganguly, Steve Greenberg and Dale Sartor 2010)
APC <sub>Ren</sub>	Adaptability Power Curve	(DC4cities 2016)
BAL	Balance / (Gleichgewicht zwischen Kältemaschinen Delta T und Rack Delta T)	(Capozzoli et al. 2014)
BP	Bypass Ratio / (Anteil an ungenutztem Luftstrom)	(Capozzoli et al. 2014)
CADE	Corporate Average Data center Efficiency /	(Kaplan et al. 2008)
CCF	Cooling Capacity Factor	(Brill und Strong 2013)
CEE	Coefficient of Energy Efficiency	(Aebischer und Frischknecht 2003)
CEF	Carbon Emission Factor	(Belady 2010)
CER	Colling Efficiency Ratio	(ASHRAE 2008)
CI	Capture Index / (Anteil Luftstrom des Racks zum Gesamtstrom)	(Capozzoli et al. 2014)
CLF	Cooling Load Factor	(Belady 2007b)
COP	Coefficient of Performance	(Hanstein 2016)
Cosφ	Wirkfaktor	(Hanstein 2016)
CPE	Compute Power Efficiency	(Ray 2010)
CPPE	Critical Power Path Efficiency	(Schödwell et al. 2013)
CPR	Cooling Performance Ratio	(Green Data Net 2015)
CSE	Cooling System Efficiency	(Mathew et al. 2009)
CUE	Carbon Usage Effectiveness	(Belady 2010)
DCA	Data Center Adaptability	(DC4cities 2016)
DCcE	Data Center Compute Efficiency	(Azevedo et al. 2011)
DC-EEP	Data Center Energy Efficiency and Productivity	(Brill 2007)
DCeP	Data Center Energy Productivity	(Ray 2010)
DCIE	Data Center Infrastructure Efficiency	(Belady 2007b)
DCnE	Data Center Network Efficiency	(Blackburn 2010)
DC <sub>P</sub>	Data Center Performance	(ETSI 2014)
DCPpW	Data Center Performance per Watt	(Pflueger 2008)
DCsE	Data Center storage Efficiency	(Blackburn 2012)
DH-UE	Deployed Hardware Utilization Efficiency	(Stanley et al. 2007)

Kennzahl/Indikator	Bezeichnung/(Beschreibung)	Quelle
DH-UR	Deployed Hardware Utilization Ratio	(Stanley et al. 2007)
DPPE	Data Center Performance per Energy	(GITPC 2012b)
DWPE	Data Center Workload Power Efficiency	(Wilde 2018)
eCE	Energy Conversion Efficiency	(Schödwell et al. 2013)
EDE	Electronic Disposal Efficiency	(Brown 2013)
eDE	Energy Distribution Efficiency	(Schödwell et al. 2013)
EEP	Equipment Energy Productivity	(Brill 2007)
EER	Energy Efficiency Ratio	(Hanstein 2016)
EPR	Electricity Production Rate	(Schödwell et al. 2013)
ERE	Energy Reuse Effectiveness	(Petterson 2010)
ERF	Energy Reuse Factor	(Petterson 2010)
eSE	Energy Storage Efficiency	(Schödwell et al. 2013)
EUE	Energy Usage Effectiveness	(Yuventi und Mehdizadeh 2013)
FE	Facility Efficiency	(Kaplan et al. 2008)
FU	Facility Utilization	(Kaplan et al. 2008)
FVER	Fixed to Variable Energy Ratio	(Levy und Raviv 2017)
GEC	Green Energy Coefficient	(GITPC 2012b)
H-EOM	IT Hardware Energy Overhead Multiplier	(Levy und Raviv 2017)
HUE	Hardware Utilization Efficiency	(ITWissen 2016)
HVAC-SE	HVAC System Effectiveness	(Guyer 2019)
IPA	Infrastructure Power Adaptability	(Schlitt et al. 2014)
ITAE	IT Asset Efficiency	(Kaplan et al. 2008)
ITEE	IT Equipment Efficiency	(GITPC 2012b)
ITEEsv	IT Equipment Efficiency (Server)	(GITPC 2012b)
ITeP	IT Energy Productivity	(Schödwell et al. 2013)
ITEUsv	IT Equipment Utilization (Server)	(GITPC 2012b)
IT-PEW	IT Productivity per embedded Watt	(Hintemann 2008)
EDE	IT Recycling Metric	(Brown 2013)
ITUE	IT-Power Usage Effectiveness	(GITPC 2012b)
KPI <sub>REN</sub>	Key Performance Indicator of Renewable Energy	(ETSI 2014)
KPI <sub>REU</sub>	Key Performance Indicator of Energy Reuse	(ETSI 2014)
KPI <sub>TE</sub>	Key Performance Indicator of Task Efficiency	(ETSI 2014)
LDEE	Load Dependent Energy Efficiency	(Schlitt und Nebel 2016)
LPD	Lighting Power Density	(Mathew et al. 2009)
MRR	Material Recycling Ratio	(Schödwell et al. 2013)

Kennzahl/Indikator	Bezeichnung/(Beschreibung)	Quelle
Network-U	Network Utilization	(Belady und Patterson Michael 2008)
NP	Negative Pressure Ratio	(Capozzoli et al. 2014)
OGE	Onsite Generation Efficiency	(GITPC 2011)
OLF	Other Load Factor	(Schödwell et al. 2013)
PLF	Power Load Factor	(Belady und Malone 2007)
PPW	Performance per Watt	(Stahl 2006)
pPUE	Partial Power Usage Effectiveness	(Hanstein 2016)
PUE	Power Usage Effectiveness	(Belady 2007b)
R	Recirculation Ratio	(Capozzoli et al. 2014)
RCI (Hight)	Rack Cooling Index	(Wang und Khan 2011)
RCI (Low)	Rack Cooling Index	(Wang und Khan 2011)
REF	Renewable Energy Factor	(Johnson 2017)
RHD	Relative Humidity Difference	(Wang und Khan 2011)
RHI	Return Heat Index	(Herrlin 2008)
RI	Recirculation Index	(Capozzoli et al. 2014)
RTI	Return Temperature Index	(Capozzoli et al. 2014)
ScE	Server Compute Efficiency	(Cole 2011)
SEPM	Server energy performance metric	(Beitelman und Fabris 2014)
Server-U	Server Utilization	(Belady und Patterson Michael 2008)
SGL	Standby Generator Losses	(Greenberg und Tschudi 2006)
SHI	Supply Heat Index	(Herrlin 2008)
Storage-U	Storage Utilization	(Belady und Patterson Michael 2008)
SUE	Server Utilization Effectiveness	(Wong 2012)
SWaP	Space, Watt and Performance	(Greenhill 2012)
TO-E	Cooling Tower Efficiency	(Greenberg und Tschudi 2006)
UPS-F	UPS Load Factor	(Mathew et al. 2009)
UPS-SE	UPS System Efficiency	(Mathew et al. 2009)
WEU	Water Economizer Utilization	(Mathew et al. 2009)
WP-E	Water Pump Efficiency	(Mathew et al. 2009)
WUE	Water Usage Effectiveness	(Patterson Michael 2011)
CLD	Compute Load Density	(Mathew et al. 2009)
CSS	Cooling System Sizing Factor	(Mathew et al. 2009)
DSE	Digital Service Efficiency	(Ebay Inc. 2013)

## D. Anhang D: Nicht berücksichtigte Aspekte der Indikatoren

### F-Gase in Kälteanlagen

Kompressionskälteanlagen benötigen ein Kältemittel als Arbeitsmedium. Mögliche Kältemittel sind z.B. Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), Fluorkohlenwasserstoffe (FKW), teilehalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW) oder natürliche Kältemittel wie z.B. Ammoniak, Propan, Kohlenstoffdioxid oder Wasser. Mit der Ausnahme von Wasser und Ammoniak haben alle Kältemittel einen negativen Einfluss auf das Klima welcher als Global Warming Potential (GWP) bezeichnet wird und/oder einen negativen Einfluss auf die Ozonschicht, was als Ozon Depletion Potential (ODP) bezeichnet wird. Ammoniak ist jedoch gegenüber Wasser giftig, brennbar und korrosiv gegenüber Kupferwerkstoffen und stellt somit eine Gefahr für Mensch und Maschine dar (Jürgen Maaß 2003). Mit der EU Verordnung Nr. 517/2014 wurde die Verordnung Nr. 842/2006 abgelöst welche ab 2014 als „F-Gas-Verordnung“ die Emissionen von fluorierten Treibhausgasen bis zum Jahr 2030 stufenweise reduzieren soll. Betreibern von Kälteanlagen ist es verboten gewisse Kältemittel einzusetzen und durch die künstliche Marktverknappung wird ein Anreiz geschaffen Kältemittel mit möglichst geringem GWP einzusetzen.

Kälteanlagen die Wasser (R718) als Kältemittel einsetzen sind somit von der F-Gas Verordnung ausgenommen und werden nicht durch die künstliche Preiserhöhung anderer Kältemittel beeinflusst. Dies kann zu einem zunehmend ökonomischen Vorteil werden sollten die Preissteigerungen der letzten Jahre anhalten. Ökologisch gesehen ist der wichtigste Kennwert einer Kälteanlage der TEWI (Total Equivalent Warming Impact). Dieser gibt den äquivalenten Klimaeinfluss einer Anlage über seine Lebenszeit an. Hierbei wird auch die indirekte Freisetzung von Treibhausgasen durch den Strom während dem Betrieb der Kälteanlage berücksichtigt. Bei aktuellen Kälteanlagen hat das Kältemittel einen Anteil von unter 1 % am TEWI (Brauer 2001). Der Großteil des TEWI wird durch indirekte CO<sub>2</sub>-Belastung aus dem Strommix in der Produktivphase erzeugt. Die Reduzierung des Energieverbrauchs (also der Effizienz) der Kälteanlage ist somit der Kältemittelwahl überzuordnen. Folglich wird die Art des eingesetzten Kältemittels nicht als Vergleichsindikator für Rechenzentren genutzt. Es ist zu erwähnen das für die Zertifizierung mit dem Blauen Engel der Einsatz von halogen- und chlorfreie Kältemittel als Kriterium vorausgesetzt wird (DE-UZ 161 2019).

Allgemein lässt sich sagen, dass Rechenzentrumsbetreiber Technologien in Erwägung ziehen sollten, welche einen reduzierten Anteil an Kältemittel mit hohem (GWP) aufweisen. Die Berücksichtigung der Effizienz führt aber dazu, dass dies nicht pauschalisiert werden kann und immer einer Abwägung zwischen Technologieoptionen nötig macht.

### Chemikalieneinsatz

Wird für die Kühlung des Rechenzentrums eine Rückkühlung auf Basis eines offenen Nasskühlturms eingesetzt so ist für den reibungsfreien Betrieb der Einsatz von Biozid und Salzen nötig.

Um Kalkablagerungen zu verhindern wird das Kühlwasser konstant entkalkt. Dieser Vorgang wird über Ionenaustauscher umgesetzt welcher durch Zugabe von Regeneriersalz periodisch erneuert wird. Ein offener Kühlturm verbraucht hierfür etwa 1 kg Regeneriersalz pro MWh Kälteleistung (eigene Berechnungen). Am Beispiel des Höchstleistungsrechners der Universität Stuttgart ergibt sich ein Regeneriersalzverbrauch von rund 17.000 kg. Ökonomisch ist der Salzverbrauch vernachlässigbar gegenüber den Betriebskosten, die hauptsächlich durch Stromkosten definiert werden. Ökologisch lässt sich der Einfluss des Salzverbrauchs ebenfalls als vernachlässigbar einstufen. In der Wassergefährdungsklasse der Verwaltungsvorschrift wird Regeneriersalz als „schwach wassergefährdend“ eingeordnet sollte es in die Umgebung ausgeleitet werden (Referat 67 1999). Das Abwasser von Kühltürmen wird nicht in die Umgebung ausgeleitet, sondern dem öffentlichen Abwassersystem zugeführt. Es gibt keine Berichte über Umweltschäden durch salzhaltiges Abwasser welches direkt dem Abwassersystem zugeführt wird.

Trotz geringem ökologischen und ökonomischen Einfluss von Regeneriersalz wird Rechenzentrumsbetreibern empfohlen den Salzverbrauch Ihrer Rückkühlsysteme zu minimieren. Diese Größe ist jedoch nicht ausschlaggebend für die Ökologische Nachhaltigkeit und wird folglich nicht als Kriterium im Indikatorenset verwendet.

Neben Regeneriersalzen wird in offenen Nasskühlsystemen Biozid eingesetzt. Aufgrund der biologisch idealen Temperatur von 30°C bis 37°C im Kühlturm und dem permanenten Eintrag von Spurenelementen aus der Luft kann es in Kühltürmen zu starkem Mikrobiologischem Wachstum kommen. Neben der Gefahr eines Legionellenbefalls (siehe Kapitel 0) erzeugt der biologische Befall (Fouling) eine Minderung des Wirkungsgrades der Kühlanlage sowie Schäden an Anlagenkomponenten. Um dem biologischen Wachstum entgegenzuwirken werden Biozide eingesetzt (oxidierende/nicht oxidierende). Biozidstoffe sind hier dazu bestimmt Schadorganismen zu töten und können deshalb auch ungewollte Wirkungen in der Umwelt entfalten, sollten diese freigesetzt werden. Biozide im Bereich der Kühltechnik fallen laut EU Verordnung Nr. 528/2012 in die Hauptgruppe 2 / Produktart 11. Derzeit sind fünf<sup>23</sup> Wirkstoffe in der Produktart 11 (Flüssigkeiten in Verfahrenssystemen) zugelassen. In einer Studie des Umweltbundesamtes wurde besonders die potenzielle Gefahr aufgeführt sollten Leckagen einen direkten Eintrag von nicht oxidierendem Biozid in Oberflächengewässer auftreten (UBA 2001). Durch Bauvorschriften und verpflichtende regelmäßige Kontrollen an Anlagenkomponenten wird der Biozideintrag in die Umgebung in Deutschland bereits weitestgehend verhindert. Der Biozideinsatz wird folglich als vernachlässigbar angesehen und ist kein Kriterium der ökologischen Nachhaltigkeit.

Betreiber von Nasskühlanlagen sollten dennoch den Verbrauch von Biozid soweit es die technischen Möglichkeiten erlauben minimieren und Maßnahmen ergreifen den Umwelteinfluss minimal zu halten, sollte eine Leckage auftreten.

### Indirekter Wasserverbrauch

Die Stromerzeugung im deutsche Strommix erzeugt neben einem CO<sub>2</sub>-Ausstoß einen nicht unerheblichen Verbrauch an Wasser. Spitzenreiter ist hier die Kernenergie welche im Schnitt 3,2 Liter Wasser pro kWh Strom verbraucht (Gleick 1994). Im Mittel verursacht jede kWh aus dem Strommix in Deutschland einen Wasserverbrauch von 1,67 Litern<sup>24</sup>. Da der Stromverbrauch eines Rechenzentrums den größten Teil der Betriebskosten ausmacht ergibt sich hieraus ein ebenso großer indirekter Wasserverbrauch.

Da der Wasserverbrauch pro kWh nicht durch den Rechenzentrumsbetreiber direkt beeinflusst werden kann bleibt ein bilanzieller Ausgleich als Maßnahme über den Stromeinkauf. Als wasserintensive Stromerzeuger gelten Kernenergie, Kohle, Öl und Gas (3,2 l/kWh; 2,6 l/kWh; 2,6 l/kWh; 2,6 l/kWh). Als Geringwasserverbraucher gelten Windkraft, Photovoltaik und Wasserkraft (0 l/kWh; 0,1 l/kWh; 0 l/kWh) (Gleick 1994). Ein wassersparsamer Energieeinkauf ist somit deckungsgleich mit dem Einkauf von erneuerbarer Energie, welcher in Kapitel 3.4.2.2 genauer untersucht wird.

Durch die direkte Kopplung an den Einkauf von erneuerbarer Energie wird der indirekte Wasserverbrauch nicht als eigenständiges Kriterium für ökologische Nachhaltigkeit betrachtet, sondern über das Einbinden von Erneuerbarer Energie berücksichtigt (siehe Kapitel 3.4.2.2).

### Flächenverbrauch

Für das Unterbringen von Servern, Netzwerktechnik und Speichereinheiten werden Räumlichkeiten und Flächen benötigt. Zusätzlich erzeugen die anderen essenziellen Infrastrukturen wie USV, NEA und Klimatechnik einen weiteren Flächenverbrauch. Seit den Anfängen der Rechenzentrumsindustrie wurde der Flächenverbrauch eines Rechenzentrums als Vergleichsgröße herangezogen da dies einer der essenziellen Vergleichsgrößen ist um Immobilien zu vergleichen. Für Rechenzentren ist dies jedoch nicht repräsentativ. Deshalb wurden ab der Jahrtausendwende verstärkt Kriterien wie, Anzahl von Racks, maximale elektrische Last der Gebäudeversorgung oder maximal unterstützte IT Last für einen Vergleich herangezogen (siehe Kapitel 3.4). Ökonomisch betrachtet trägt der Flächenverbrauch einen Rechenzentrums einen geringen Prozentsatz der Baukosten eines Rechenzentrums (Bunger 2012).

---

<sup>23</sup> Liste verfügbar unter: <https://www.reach-clp-biozid-helpdesk.de/de/Biozide/Wirkstoffe/Genehmigte-Wirkstoffe/Genehmigte-Wirkstoffe.html>

<sup>24</sup> Basierend auf dem Strommix 2017 und (Gleick 1994)

Auch ökologisch kann der Einfluss der Flächenversiegelung durch Rechenzentren vernachlässigt werden, da diese im Vergleich zu anderen Gewerbe- und Industriegebäuden keinen signifikanten Flächenverbrauch darstellen. Maßnahmen die die Flächenversiegelung kompensieren wie z.B. Dachbegrünung sollten dennoch durch Rechenzentrumsbetreiber überprüft und wenn möglich umgesetzt werden. Der Flächenverbrauch von Rechenzentren wird aber nicht als essenzielles Kriterium der ökologischen Nachhaltigkeit bewertet.

### Rohstoffverbrauch des Gebäudes

Der Bau jeder Immobilie bindet Rohstoffe in der Bausubstanz. Die Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) sieht hier einen Nachhaltigkeitskatalog mit bis zu 40 Kriterien vor, welcher die Nachhaltigkeit für Gebäude bewertet und anschließend in vier verschiedenen Güteklassen ausdrückt (Platin bis Bronze). Wichtig sind hier vor allem nachhaltige Baumaterialien wie recyclebarer Beton aber vor allem auch energetische Aspekte wie Wärmedämmung und klimaschonende Heizsysteme. Für Rechenzentren ist hier der Aspekt der nachhaltigen Baumaterialien am relevantesten, die anderen sind aufgrund der speziellen Bedingung eines Rechenzentrums zweitrangig.

Rechenzentrumsbetreiber sollten folglich auf eine nachhaltige Bausubstanz achten. Eine von Whitehead et al. veröffentlichten LC-Analyse ergab jedoch einen geringen Einfluss des Gebäudes auf die Nachhaltigkeitsbilanz, verglichen mit anderen Quellen wie M&E und IT-Geräten (Whitehead et al. 2015). Rechenzentrumsbetreiber sollten sich hier an die DGNB Richtlinien halten, der Rohstoffverbrauch des Gebäudes lässt sich jedoch nicht als Kriterium für einen Vergleich von Rechenzentren heranziehen.

### Rohstoffe in der Gebäudetechnik

Als Gebäudetechnik werden alle Systeme aufgefasst die nicht zum Rohbau gehören und nicht zum aktiven IT-Betrieb (Server, Storage, Netzwerk) gehören. Dies sind Systeme wie Kompressionskälteanlagen, Rückkühler, Verrohrung, Messeinrichtungen, Wärmetauscher, USV-Systeme, Netzersatzanlagen, Beleuchtung, Löschanlagen oder Transformatoren. Neben den Verbrauchsmengen für Stahl, Kupfer, Aluminium und Plastik aus denen die Geräte primär bestehen kommen noch zusätzlich Schwefelsäure (in den Batterien) und Blei (ebenfalls in den Batterien) vor. Seltene Erden in Steuerungselementen und Überwachungssystemen werden hier vernachlässigt. Kältemittel in den Kühlsystemen werden separat behandelt (siehe Kapitel 0).

Eine Bleibatterie aus dem RZ-Umfeld mit einer Kapazität von 70 Ah enthält ca. 24,84 kg Blei/Bleioxid und weitere 6,9 kg Schwefelsäure (Battery-direct GmbH 2017). Für das Referenzrechenzentrum mit einer USV Kapazität von 50 kWh und einer Leistung von 600 kW werden zur Absicherung von 5 Minuten 60 Bleiakumulatoren benötigt. Dies bindet 1.490 kg Blei/Bleioxid und 414 kg Schwefelsäure. Insgesamt beträgt das Gewicht der USV Batterie in diesem Beispiel 2.070 kg (inkl. Gehäuse). Nach einer Studie von Sullivan und Gaines aus dem Jahr 2012 werden für die Herstellung von 1 kg Batterie 2,67 kWh Energie benötigt (Sullivan und Gaines 2012). Der Energieaufwand zur Produktion liegt hier also bei 5,53 MWh was ungefähr 2 Tagen IT-Betrieb im Referenzrechenzentrum entspricht. Aus energetischer Sicht haben die Batterien der USV also einen untergeordneten Einfluss.

Die umweltschonende Entsorgung der Batterien und Ihrer Komponenten ist hier der wichtigste Beitrag zu einem ökologisch nachhaltigen Betrieb. Da die Wartung der USV Anlagen in der Regel an einen Dienstleister outgesourced ist, ist es für den RZ-Betreiber hier von großer Bedeutung zu garantieren das der Dienstleister sich an die gesetzlichen Vorschriften zur Entsorgung von Akkumulatoren hält. Da es in Deutschland keine Berichte zu Verstößen in der Akkumulatorenentsorgung von RZ-Dienstleistern gibt wird davon ausgegangen das hier die gesetzlichen Vorgaben eingehalten werden und der Umwelteinfluss durch das Entsorgen von Batterien bereits auf ein Minimum reduziert wird. Ein weiterer Punkt ist die Dimensionierung der USV Batterie. Im Sinne der Nachhaltigkeit sollte die USV-Kapazität so groß wie nötig aber so gering wie möglich sein um eine Ressourcenverschwendung zu vermeiden. Aufgrund unterschiedlicher Anforderungen für die Verfügbarkeit von Rechenzentren kann hier jedoch keine klare Empfehlung zur Größe der USV gemacht werden. Die geläufigste Dimensionierung liegt bei 5-15 Minuten Vollastleistung.

## Rohstoffe in der IT-Hardware

Die im Rechenzentrum eingesetzte IT-Hardware besteht aus Servern, Speichereinheiten und Netzwerktechnik. Diese Komponenten binden allgemeine Rohstoffe wie Kupfer, Glas, Stahl, Kunststoff, Aluminium und Gusseisen. Neben diesen allgemein verfügbaren Rohstoffen werden jedoch auch seltene Erden und Metalle gebunden. Diese sind in Tabelle 44 aufgeführt.

Tabelle 44: Seltene Erden IT-Hardware nach ILCD Handbuch

Cerium	Europium	Lanthanum	Neodymium
Samarium	Scandium	Dysprosium	Praseodymium
Holmium	Thulium	Ytterbium	Prometheum
Terbium	Erbium	Gadolinum	Lutetium

In der Zusammensetzung unterscheiden sich die IT Komponenten nicht stark, da die grundlegenden Funktionen der Bauteile auf der gleichen Technik basieren (z.B. CPU auf Siliziumbasis, LWL auf Glasbasis). Wird beispielsweise eine gewisse Transistorzahl in einem Prozessor benötigt unterscheidet sich die eingesetzte Menge an Silizium nicht merklich zwischen den Herstellern da diese (mit kleinen Unterschieden) die gleiche Transistorenbreite in der Produktion einsetzen. Die Menge der verbrauchten Rohstoffe lässt sich also primär nicht über die Komponentenwahl beeinflussen.

Aufgrund der hohen Turn-over-Rate von IT Komponenten lässt sich der Ressourcenverbrauch jedoch durch die Dauer der Nutzung beeinflussen. Die Lebensdauer von Servern schwankt zwischen 3-10 Jahren wobei das Durchschnittsalter bei 3,2 Jahren liegt (Fuchs et al. 2017). Je länger ein Server genutzt wird umso geringer der anteilige Ressourcenverbrauch. Die Lebensdauer eines Servers sollte jedoch nicht strikt maximiert werden, da jede Rechnergeneration einen geringen Stromverbrauch bei gleicher Leistung aufweist. Dies basiert auf der Entdeckung durch Jonathan Koomey welcher feststellte, dass unter aktuellen Entwicklungen die gleiche Rechenleistung nach 2,6 Jahren nur noch halb so viel Energie verbraucht (Koomey und Naffiziger 2016). Da ein direkter quantitativer Vergleich zwischen Ressourcenverbrauch und Energieverbrauch aufgrund ungleicher Einheiten und ohne auf Gewichtungsfaktoren zurückzugreifen nicht möglich ist, kann hier festgestellt werden das der ökologisch optimale Punkt ein Abwägen beider Bereiche darstellt.

Ein rohstoffbezogener Unterschied in der IT Hardware ist die Konfliktfreiheit. Diese zählt zu den sozialen Kriterien und wird in Kapitel 3.4.3.2 behandelt.

## Direkter Wasserverbrauch

In Kapitel 0 wurde bereits der indirekte Wasserverbrauch thematisiert. Setzt ein Rechenzentrum zur Rückkühlung auf ein adiabates System so kommt zusätzlich der direkte Wasserverbrauch der Kühlanlage hinzu. Der Verbrauch aus dem Brauchwasserverbrauch des Personals und anderer Wasserverbraucher werden hier vernachlässigt.

Der Wasserverbrauch eines Nasskühlers hängt von verschiedenen Faktoren wie der Bauart des Kühlers, der Umgebungstemperatur, der gewünschten Rücklauftemperatur und des nötigen Temperaturdeltas ab und kann folglich variieren. Als Näherungswert wird das Temperaturprofil von Süddeutschland (Stuttgart) und eine Rücklauftemperatur von 18 °C bei einem Delta von 7 Kelvin angenommen. Unter diesen Randbedingungen verbraucht ein offener Kühlturm im Jahresmittel 980 Liter pro MWh erzeugter Kälteleistung<sup>25</sup>. Dieser Verbrauch entspricht einem Mehrverbrauch an Wasser von 60 % pro kWh, verglichen mit dem indirekten Wasserverbrauch in Deutschland. Der Verbrauch liegt somit bei 2,6 Litern pro kWh.

Anlagenbetreiber haben hier die Möglichkeit direkten Einfluss auf den Wasserverbrauch der Kühltechnik zu nehmen. Verbrauchsoptimierte Kühlsysteme wie Hybridkühler welche Trockenkühler

<sup>25</sup> Angelehnt an reale Verbrauchsdaten der Kühltürme des HLRS, Stuttgart

und Nasskühler kombinieren sind aus energetischer Sicht konventionellen offenen Kühltürmen vorzuziehen. Der Flächenverbrauch Hybrider Systeme ist jedoch mit einer Aufstellfläche von drei bis fünf Mal der Fläche eines offenen Kühlturmes deutlich höher und verbraucht Flächen die alternativ mit PV oder Solarthermie bestückt werden können. Der Invest eines Hybriden Systems liegt mit 250-400 % im Vergleich zum offenen Kühlturm ebenfalls deutlich höher<sup>26</sup>. Eine detaillierte Wirtschaftlichkeitsanalyse in der Planungsphase ist unverzichtbar. Hier ist neben den Investkosten auf die Betriebskosten über die Lebenszeit und die Umwelteinflüsse durch den Wasserverbrauch zu achten.

In einem Beitrag im Bayerischen Rundfunk zum Thema Wasserverfügbarkeit wird darauf verwiesen, dass es hinsichtlich der Wasserversorgung in Deutschland keine Engpässe gibt (Dallmus 2018). Da die Wasserversorgung aus den 70er Jahren für den jetzigen Bedarf überdimensioniert ist, sehen Experten sogar Vorteile für das Leitungssystem sollte der Verbrauch leicht ansteigen. Dies gilt jedoch ausdrücklich nur für das Versorgungssystem in Deutschland und darf nicht auf andere Länder übertragen werden da hier häufig ein Wassermangel aufgrund geringer Verfügbarkeit in Kombination mit hohem Pro-Kopf-Verbrauch vorliegt.

Der direkte Wasserverbrauch wird somit nicht als Hauptkriterium für einen ökologisch nachhaltigen Betrieb eingestuft da sich das Bewertungssystem auf Deutschland bezieht. Dennoch sollten Rechenzentrumsbetreiber den Wasserverbrauch Ihrer Kühlanlagen minimieren um dem Sparsamkeitsgebot einer nachhaltigen Betriebsführung Rechnung zu tragen.

### Löschmittel

Löschmittelanlagen sind ein essenzieller Teil der Sicherheitstechnik im Rechenzentrum. Diese, häufig auf Wasser, Edelgas (meist Argon), CO<sub>2</sub> oder Stickstoff basierenden Löschsysteeme weisen keine messbaren Leckagen auf und kommen im regulärem Betrieb sehr selten zum Einsatz. Kommt es dennoch zu einer Flutung des Raumes mit Löschmitteln werden im Fall einer CO<sub>2</sub>-Löschung bei einer RZ-Fläche von 1000 m<sup>2</sup> ca. 4.000 kg CO<sub>2</sub> freigesetzt. Ein durchschnittliches RZ mit dieser Fläche erzeugt eine äquivalente Menge an Kohlendioxid bereits nach 4,5 Stunden regulärem Betrieb<sup>27</sup>.

Tabelle 45: CO<sub>2</sub>-Blastung einer Komplettlöschung

Rechenzentrumsfläche	1.000 m <sup>2</sup>
Raumhöhe (lichte Höhe + Doppelboden)	4 m
CO <sub>2</sub> -Bedarf pro m <sup>3</sup>	1 kg
<b>CO<sub>2</sub>-Bedarf pro Komplettlöschung</b>	<b>4.000 kg</b>

Auf den Lebenszyklus eines Rechenzentrums betrachtet kann somit der Umwelteinfluss von Löschanlagen vernachlässigt werden.

### Aerosolbildung

Wird für die Rückkühlung einer Anlage ein adiabate Kühlung eingesetzt so besteht unter bestimmten Bedingungen die Gefahr einer Aerosolbildung. Aerosole sind feste und flüssige Partikel in der Luft. Über diese Partikel können Keime und Erreger in der Luft über weite Strecken transportiert werden. Bekanntestes Problem einer Übertragung ist die Verbreitung von „Legionella pneumophila“ (Legionellen) über die Luft. Werden diese Bakterien über die Lunge aufgenommen so kann es zu einer Pneumonie, also einer Entzündung der Lunge kommen welche bereits zu Todesfällen in Deutschland geführt hat (Siegmond-Schultze 2013).

Adiabate Kühlsysteme sind hier besonders gefährdet da die Bakterien der Gattung Legionella pneumophila bei Temperaturen von 20 bis 45°C am besten überleben und sich vermehren können. Um dem Wachstum von Organismen entgegenzuwirken kann über eine Stoßdosierung Biozid in das

<sup>26</sup> Experteninterview mit Jaeggi auf der InfraKon am 21.02.2018 in Karlsruhe

<sup>27</sup> RZ mit 1000m<sup>2</sup>; 430 Racks; 4 kW/Rack und 0,474 gCO<sub>2</sub>/kWh

System eingebracht werden. Im Schnitt werden 50-70 Gramm Biozid pro m<sup>3</sup> Kühlwasser eingesetzt (Thermofin 2016).

Um eine Übertragung auf den Menschen weiter zu verhindern sind Anlagenbetreiber seit dem 23. März 2017 mit der 42. BImSch-Verordnung dazu verpflichtet Verdunstungskühlanlagen, Kühltürme und Nassabscheider noch stärker zu überwachen und regelmäßig zu beproben. Dies bedeutet für Anlagenbetreiber einen organisatorischen und finanziellen Mehraufwand was trockene Rückkühlsysteme interessanter macht.

Derzeit besteht eine Möglichkeit ein Nass-Kühlsystem zu nutzen und nicht durch die 42. BImSchV gezwungen zu sein das System anzumelden und zu beproben. Hierfür muss ein Kühlsystem eingesetzt werden welches die Beauftragung von Wasser drucklos und vor dem Kontakt der Luft mit dem Wärmetauscher durchführt. Die Umgebungsluft wird folglich vor dem Kontakt mit den wärmetauschenden Elementen durch die Verdunstungskälte auf einer Membran abgekühlt und es kommt erst danach zu einem Kontakt mit dem Wärmetauscher welcher als „trocken“ eingestuft wird. Eine so ausgelegte Anlage fällt nach derzeitiger Definition nicht unter die BImSchV. Ob diese Auslegungslücke zeitnah durch den Gesetzgeber geschlossen wird, konnte von keinem der befragten Branchenexperten beantwortet werden.

Ein Nass-Kühlsystem ermöglicht eine längere freie Kühlung und hat somit energetische Vorteile gegenüber einem Trockenkühler. Dieser Vorteil sollte jedoch nur genutzt werden, wenn durch aktive Maßnahmen und regelmäßige Kontrollen die Gefahr einer Legionellenbildung ausgeschlossen wird. Ist dies gegeben geht von einem Nasskühler keine nennenswerte Gefahr für den Menschen oder seine Umgebung aus und ist aus energetischer Betrachtung eine der nachhaltigsten Kühltechniken.

#### Direkter Ausstoß von Treibhausgasen und Luftschadstoffen

Rechenzentren stoßen auf die Laufzeit von einem Jahr gesehen nur minimale Mengen an Abgasen direkt aus. Dies ist der Fall, wenn die NEA (Netzersatzanlage) aufgrund einer Störung im Netz oder zu Testzwecken betrieben wird. Im Regelfall wird die Netzersatzanlage zu Testzwecken zwischen einmal pro Monat und einmal pro Quartal für ca. eine Stunde betrieben. Die CO<sub>2</sub>-Belastung schwankt bei typischen Anlagen (3-4000 kVA) zwischen 258-357 g/kWh abhängig von der prozentualen Last, dem elektrischen Wirkungsgrad des Generators und der Anlagengröße (MagnaGen GmbH 2018). Folglich entstehen bei einem 1000 m<sup>2</sup> Rechenzentrum mit 430 Racks à 4 kW direkte Verbrauchswerte von 443 kg Kohlendioxid pro Monat. Berücksichtigt man die statistische Ausfallzeit von 55 Minuten pro Stromausfall in Deutschland mit einer durchschnittlichen Häufigkeit von 2,4 Ausfällen alle 10 Jahre erhöht sich der durchschnittliche Kohlendioxidausstoß unter der Annahme das die USV 15 Minuten überbrücken kann um weitere 7 kg (VDE 2015). Auf den Jahresausstoß und das Klimapotenzial betrachtet tragen Netzersatzanlagen folglich in einem vernachlässigbaren Maße zur CO<sub>2</sub>-Bilanz bei.

Ein weit größerer Einfluss entsteht durch den indirekten Ausstoß von Abgasen (CO<sub>2</sub>-Anteil im Strommix) welcher berücksichtigt werden muss (siehe Kapitel 3.4.2.2).

Neben der CO<sub>2</sub>-Bilanz haben NEA jedoch andere Umweltaspekte die es zu berücksichtigen gilt. Aufgrund der punktuellen Abgabe der Abgase und der verzögerten Filterwirkung der Abgassysteme bei einem „Kaltstart“ kommt es zu lokaler Freisetzung von NO<sub>x</sub>, CO, HC und Feinstaub. Um hier die Schädigung von Mensch und Umgebung zu minimieren sollten Anlagenbetreiber die lokal zulässigen Immissionswerte über die zuständige Umweltbehörde vor der Planungsphase erfragen und durch eine ausreichende Höhe der Abgasleitung ein punktuell Einwirken verhindern.

Sollte sich das Rechenzentrum in direkter Nähe zu anderen Gebäuden befinden ist zusätzlich und explizit auf die ebenfalls lokal unterschiedlichen Grenzwerte für Schallimmissionswerte zu achten. Als Hauptkriterium für die ökologische Nachhaltigkeit wird der direkte Ausstoß von Treibhausgasen, Luftschadstoffen und die Schallimmission jedoch nicht herangezogen.

#### Anstellungsverhältnisse der Dienstleister

Neben dem Personal des Rechenzentrumsbetreibers, welches meist aus IT und Verwaltungspersonal besteht werden andere Bereiche im Rechenzentrumsbetrieb von externen Dienstleistern übernommen. Diese Leistungen reichen von Reinigungsdiensten über Sicherheitsdienstleistungen bis

zur technischen Wartung von Versorgungslagen. Die Anstellung eines Mitarbeiters lässt sich in Normalarbeitsverhältnis und atypisches Arbeitsverhältnis einteilen. Als Normalarbeitsverhältnis wird eine unbefristete Vollzeitbeschäftigung bezeichnet. Folglich sind alle Anstellungsverhältnisse die nicht diesem Typ entsprechen als atypisch einzustufen. Hierzu zählen Teilzeitbeschäftigung sowie befristete Anstellung. Eine Studie aus dem Jahr 2016 stellte im Rahmen einer Europaweiten Untersuchung fest, dass befristet Angestellte „einen schlechteren Gesundheitszustand aufweisen als regulär Beschäftigte“ (Böhnke und Renneberg 2016). Da jedoch das Erfassen des Anstellungsverhältnisses von Dienstleistern nicht ohne unverhältnismäßigen Aufwand überprüfbar ist, wird Anstellungsverhältnis nicht als Indikator der sozialen Nachhaltigkeit bei Dienstleistern herangezogen.

## E. Anhang E: Liste der Gemeinden mit der höchsten Gesamtbewertung

Tabelle 46: Liste der Gemeinden mit der höchsten Gesamtbewertung

Platz	Gemeindename	Rating	Platz	Gemeindename	Rating
1.	Wangen	81,04	58.	Dotternhausen	65,14
2.	Forst	78,19	59.	Aichwald	65,11
3.	Bempflingen	77,75	60.	Leinfelden-Echterdingen	65,09
4.	Heddesheim	77,57	61.	Mietingen	64,90
5.	Donzdorf	77,01	62.	Nellingen	64,89
6.	Murr	76,94	63.	Backnang	64,87
7.	Titisee-Neustadt	74,31	64.	Neidenstein	64,75
8.	Baden-Baden	73,47	65.	Neulußheim	64,70
9.	Salach	72,73	66.	Wendlingen am Neckar	64,67
10.	Pleidelsheim	71,81	67.	Kirchheim am Neckar	64,66
11.	Neckartenzlingen	71,40	68.	Walheim	64,66
12.	Untermarchtal	71,28	69.	Birenbach	64,54
13.	Freiberg am Neckar	71,15	70.	Laupheim	64,50
14.	Langenargen	71,09	71.	Allmersbach im Tal	64,47
15.	Achstetten	71,03	72.	Bad Boll	64,44
16.	Kornwestheim	70,66	73.	Oberdisingen	64,36
17.	Dormettingen	70,04	74.	Flein	64,31
18.	Plochingen	69,89	75.	Deizisau	64,29
19.	Kirchheim unter Teck	69,50	76.	Dautmergen	64,14
20.	Mönchweiler	69,25	77.	Ulm	64,09
21.	Mannheim	69,19	78.	Grafenberg	64,07
22.	Rastatt	68,79	79.	Engstingen	64,01
23.	Reichenbach an der Fils	68,78	80.	Bischweier	63,91
24.	Allmendingen	68,67	81.	Besigheim	63,84
25.	Mühlhausen im Täle	68,53	82.	Ludwigsburg	63,59
26.	Altbach	68,23	83.	Langenau	63,57
27.	Gärtringen	68,09	84.	Ingersheim	63,39
28.	St. Leon-Rot	67,99	85.	Wolpertswende	63,29
29.	Affalterbach	67,98	86.	Hemsbach	63,27
30.	Weisenbach	67,90	87.	Kressbronn am Bodensee	63,24
31.	Oppenweiler	67,85	88.	Immenstaad am Bodensee	63,16
32.	Hessigheim	67,72	89.	Rechberghausen	63,13
33.	Unlingen	67,65	90.	Bondorf	63,12
34.	Oberboihingen	67,42	91.	Muggensturm	63,12
35.	Talheim	67,28	92.	Wiesenbach	62,97
36.	Eberbach	67,15	93.	Gerlingen	62,96
37.	Waiblingen	67,09	94.	Eislingen/Fils	62,93
38.	Pfintztal	66,97	95.	Bodelshausen	62,91
39.	Baindt	66,95	96.	Zwingenberg	62,90
40.	Karlsdorf-Neuthard	66,81	97.	Sindelfingen	62,89
41.	Ilvesheim	66,73	98.	Binzen	62,87
42.	Großbottwar	66,65	99.	Gäufelden	62,85
43.	Unterensingen	66,64	100.	Herrenberg	62,83
44.	Bad Friedrichshall	66,53	101.	Mosbach	62,80
45.	Kornal-Münchingen	66,31	102.	Neckarzimmern	62,77
46.	Schluchsee	66,25	103.	Lauf	62,63
47.	Holzmaden	66,23	104.	Abstatt	62,59
48.	Weil der Stadt	66,05	105.	Kirchberg an der Iller	62,58
49.	Korb	65,77	106.	Ochsenhausen	62,55
50.	Böhmenkirch	65,58	107.	Ehningen	62,45
51.	Altdorf	65,55	108.	Kanzach	62,40
52.	Karlsbad	65,54	109.	Laudenbach	62,25
53.	Stutensee	65,53	110.	Heidenheim an der Brenz	62,23
54.	Schwaikheim	65,48	111.	Kolbingen	62,05
55.	Wannweil	65,29	112.	Hagnau am Bodensee	61,99
56.	Nehren	65,23	113.	Eppelheim	61,99
57.	Kohlberg	65,21	114.	Stuttgart	61,95