MASTERARBEIT

GREEN CLOUD COMPUTING

Handlungsempfehlungen zum Einsatz von Maßnahmen des Green Cloud Computing für österreichische Rechenzentrumsbetreiber

ausgeführt am

FACHHOCHSCHULE DER WIRTSCHAFT

Studiengang
Informationstechnologien und Wirtschaftsinformatik

Von: Harald Beier
Matrikelnummer: 00640165

Signiert von:	Harald Beier
Datum:	13.12.2023 18:41:50

Dieses Dokument ist digital signiert!

Dieses mit einer qualifizierten elektronischen Signatur versehene Dokument hat gemäß Art. 25 Abs. 2 der Verordnung (EU) Nr 910/2014 vom 23. Juli 2014 ("eIDAS-VO") die gleiche Rechtswirkung wie ein handschriftlich unterschriebenes Dokument.

Prüfinformation: Informationen zur Prüfung der elektronischen Signatur finden Sie unter: www.a-trust.at/pdf

Graz, am 13. Dezember 2023 .....

Unterschrift

EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benützt und die benutzten Quellen wörtlich zitiert sowie inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Signiert von:	Harald Beier
Datum:	13.12.2023 18:43:11

Dieses Dokument ist digital signiert!

Dieses mit einer qualifizierten elektronischen Signatur versehene Dokument hat gemäß Art. 25 Abs. 2 der Verordnung (EU) Nr 910/2014 vom 23. Juli 2014 ("eIDAS-VO") die gleiche Rechtswirkung wie ein handschriftlich unterschriebenes Dokument.

Prüfinformation: Informationen zur Prüfung der elektronischen Signatur finden Sie unter: www.a-trust.at/pdf

.....

Unterschrift

KURZFASSUNG

Der IT-Dienstleistungssektor hat einen signifikanten Anstieg der Nutzung von Cloud Computing erlebt und seinen Marktanteil von 14,5% im Jahr 2017 auf 42,5% im Jahr 2022 ausgebaut. Trotz der unbestreitbaren Vorteile hat dieses Wachstum Umweltbedenken aufgeworfen. Der steigende Bedarf an Rechenleistung und die Verbreitung von internetverbundenen Geräten tragen zum ökologischen Fußabdruck des Cloud-Computings bei. Studien variieren und schreiben dem Cloud Computing 0,3% bis 2% der globalen CO2-Emissionen zu, mit zusätzlichen Umweltauswirkungen wie Abfallproduktion, Wasserverbrauch und Landnutzung.

Diese Masterarbeit adressiert den dringenden Bedarf an nachhaltigen Praktiken bei österreichischen Cloud Service Providern. Das Ziel ist es, handlungsorientierte Empfehlungen für die Umsetzung von grünem Cloud Computing auf Grundlage einer gründlichen Überprüfung der wissenschaftlichen Literatur zu formulieren. Unter Verwendung der systematischen Literaturübersichtsmethodik von Brocke et al. und der PRISMA-Methode analysierte diese Studie 106 Arbeiten mit einer Mindestanzahl von 5 Zitaten innerhalb eines bestimmten Zeitrahmens.

Die Literatur betont überwiegend Initiativen zur Energieeffizienz, insbesondere während der Nutzungsphase von Rechenzentren, vernachlässigt jedoch die umfassendere Perspektive des gesamten Lebenszyklus. Diese Studie bestätigt die Hypothese, dass erhebliches Potenzial für die Anpassung umweltfreundlicher Maßnahmen bei Cloud Service Providern besteht. Um diese Lücke zu schließen, wird ein Umsetzungsplan für grünes Cloud Computing vorgeschlagen, der wissenschaftlichen Techniken zur Energieeffizienz auf Software- und Hardwareebene, zur Virtual Machine Consolidation und bioinspirierte Algorithmen umfasst.

Aufbauend auf Erkenntnissen des deutschen Umweltbundesamts-Projekts KPI4CDE und GCC sowie der systematischen Literaturübersicht identifiziert diese Forschung ungenutztes Potenzial für weitere wissenschaftliche Untersuchungen des vollständigen Lebenszyklus von Cloud Service Providern. Diese Studie legt den Grundstein für zukünftige Forschungsinitiativen, die darauf abzielen, die Umweltauswirkungen des Cloud-Computings umfassend zu verstehen und zu mindern.

ABSTRACT

The IT services sector has experienced a substantial surge in cloud computing adoption, growing its market share from 14.5% in 2017 to 42.5% in 2022. Despite its undeniable benefits, this growth has raised environmental concerns. The escalating demand for computational power and the proliferation of internet-connected devices contribute to the ecological footprint of cloud computing. Studies vary, attributing 0.3% to 2% of global CO2 emissions to cloud computing, with additional environmental impacts like waste production, water consumption, and land use.

This master's thesis addresses the imperative for sustainable practices in Austrian cloud service providers. The objective is to formulate actionable recommendations for implementing green cloud computing based on a thorough review of scientific literature. Employing the systematic literature review methodology proposed by Brocke et al. and the PRISMA Method, this study analyzed 106 papers with a minimum of five citations within a specified timeframe.

The literature predominantly emphasizes energy-efficiency initiatives, particularly during the usage phase of data centers, neglecting the broader life-cycle perspective. This study validates the hypothesis that considerable potential exists for adapting environmentally friendly measures among Cloud Service Providers. To address this gap, an implementation plan for green cloud computing is proposed, encompassing scientific techniques for energy efficiency on the software and hardware levels, Virtual Machine Consolidation, and bio-inspired algorithms.

Building upon insights from the German Umweltbundesamt's KPI4CDE and GCC project and the systematic literature review, this research identifies untapped potential for further scientific investigations into the complete life cycle of Cloud Service Providers. This study lays the groundwork for future research initiatives aimed at comprehensively understanding and mitigating the environmental impact of cloud computing.

INHALTSVERZEICHNIS

1 EINLEITUNG 1

1.1 Motivation und Ausgangssituation 1
1.2 Problemstellung 1
1.3 Fragestellung und Zielsetzung 2
1.3.1 Forschungsfrage 2
1.3.2 Hypothesen 3
1.3.3 H1 3
1.3.4 H2 3
1.3.5 H3 3
1.3.6 H4 4
1.3.7 Ziele 4

1.4 Vorgehensweise 4
1.5 Aufbau der Arbeit 5

2 CLOUD COMPUTING 7

2.1 Definition 7
2.1.1 Fundamentale Charakteristika 8
2.1.2 Servicemodelle 10
2.1.3 Deployment- / Bereitstellungsmodell 14

2.2 Bedeutung 16
2.3 Historie 16
2.4 Ausblick möglicher Entwicklungen 17

3 GREEN CLOUD COMPUTING 19

3.1 Taxonomie 19
3.2 Charakteristika 21
3.3 Green Software Foundation 23
3.3.1 Software Carbon Intensity (SCI) und Software Carbon Efficiency Rating (SCER) 23
3.3.2 Plattform Architektur 24
3.3.3 Cloudbasierte Monitoring Maßnahmen 25

3.4 Bewertungsmethodik Green Cloud Computing (GCC) des Umweltbundesamtes 26
3.4.1 Unterschiede & Gemeinsamkeiten zu KPI4DCE 26
3.4.2 Cloud Computing Service Einheiten 27
3.4.3 Allokationsregeln 27

4 GREEN CLOUD DATACENTER 28

4.1 Zertifizierungen und Normen 28
4.1.1 EN 50600 Serie und ISO/IEC 2237 Serie 29
4.1.2 ISO/IEC 30134 Serie 30

4.2 Maßnahmen der Marktführer 32
4.2.1 Amazon 32
4.2.2 Microsoft 33
4.2.3 Google 34
4.2.4 Kritische Betrachtung 35

4.3 KPI4DCE und KPI4DCE 2.0 35
4.3.1 Methode für die Bewertung des abiotischen Ressourcenverbrauchs und weitere Umweltaspekte 36
4.3.2 Umweltaspekte und IT-Leistung 37

4.4 Europäische Kommission und europäische Union 39
4.4.1 Regulation on ecodesign requirements for servers and data storage products EU 2019/424 40
4.4.2 Development of the EU Green Public Procurement (GPP) Criteria for Data Centres, Server Rooms and Cloud Services 40
4.4.3 2023 Best Practice Guidelines for the EU Code of Conduct on Data Centre Energy Efficiency 41
4.4.4 Assessment Framework for Data Centres in the Context of Activity 8.1 in the Taxonomy Climate Delegated Act 44
4.4.5 Förderprogramme der europäischen Union 44

5 METHODIK – SYSTEMATISCHE LITERATURRECHERCHE 46

5.1 Wahl der Literraturrecherche als Methode 46
5.2 Methodik der Literaturrecherche 46
5.3 Die systematische Literraturrecherche 47
5.3.1 Definieren des Anwendungsbereichs 48
5.3.2 Konzeptualisierung des Themas 49

5.3.3 Literatursuche 49
5.3.4 Literaturanalyse 49
5.3.5 Forschungagenda 50

5.4 Durchführung der Literaturrecherche nach vom Brocke et al. 50
5.4.1 Definieren des Anwendungsbereichs 50
5.4.2 Konzeptualisierung des Themas 52
5.4.2.1. Datenbanken 53
5.4.2.2. Einschluss und Ausschlusskriterien 53
5.4.2.3. Suchbegriffe 54
5.4.2.4. Suchstrings 54
5.4.3 Literatursuche 55
5.4.3.1. Identification Phase 55
5.4.3.2. Screening Phase 58
5.4.3.1. Eligibilty Phase 59
5.4.3.2. Inclusion 59
5.4.4 Literaturanalyse 60

6 ERGEBNISSE 63

6.1 Matrixdarstellung der Literaturanalyse 63
6.2 Ergebnisse nach Suchmaschinen 63
6.3 Publikationen nach Jahr der Veröffentlichung und Datenbank / Publisher 64
6.4 Ergebnisse nach Kriterium Green Cloud Charakteristika 65
6.5 Ergebnisse nach Auswirkung auf Bereiche laut KPI4CDE 66
6.6 Ergebnisse nach Lebensphase laut KPI4CDE 67
6.7 Ergebnisse nach Bereich der digitalen Infrastruktur nach SDIA 68
6.8 Ergebnisse nach Revelanz für die Normen (ISO 22237 und ISO 30134) 68
6.9 Ergebnisse nach Verantwortungsbereich nach EU DC CoC 69
6.10 Ergebnisse nach Arealen bzw. Bereichen und Unterbereiche im Assessment Framework nach EU DC CoC 70

7 SCHLUSSFOLGERUNGEN 72

7.1 Aufgabenstellung und Zusammenfassenfassung 72
7.2 Interpretation der Ergebnisse 73
7.3 Hypothesenprüfung 74
7.3.1 H1 75
7.3.2 H2 75

7.3.3 H3 75
7.3.4 H4 76

7.4 Konkrete Handlungsempfehlungen 76
7.5 Beantwortung der Forschungsfrage 79
7.6 Kritische Würdigung....85
7.7 Forschungsmöglichkeiten....86

ANHANG A - SERVICEMODELLE – CLOUD COMPUTING 88

ANHANG B - BEREITSTELLUNGSMODELLE CLOUD 90

ANHANG C - EU DC COC – RECHENZENTRUMSBEREICHE FÜR VERBESSERUNG 91

ANHANG D - SOFTWARE PATTERNS – GREEN SOFTWARE FOUNDATION 95

ANHANG E - BESTPRACTICES MICROSOFT 102

ANHANG F - ANFORDERUNGEN IN DEN ANHÄNGEN DER VERORDNUNG 2019/424....104

ANHANG G - GEMEINSAMKEITEN UND UNTERSCHIEDE ZWISCHEN KPI4CDE UND GCC-KENNZAHLEN 106

ANHANG H - EU DC COC - PRACTICES TO BECOME MINIMUM EXPECTED – 2020 BIS 2023. 107

ANHANG I - ENERGIEEFFIZIENZ TECHNIK – SOFTWARELEVEL 109

ANHANG J - ENERGIEEFFIZIENZ TECHNIK – HARDWARELEVEL....113

ANHANG K - ENERGIEEFFIZIENZ TECHNIK – VM KONSOLIDIERUNG LEVEL....115

ANHANG L - ENERGIEEFFIZIENZ TECHNIK – NATUR INSPIRIERTE ALGORITHMEN 119

ANHANG M - ZUSCHREIBUNG GENUTZTER FLATICON GRAPHIKEN 123

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS....124

ABBILDUNGSVERZEICHNIS 125

TABELLENVERZEICHNIS 127

LITERATURVERZEICHNIS FÜR RECHERCHE 128

LITERATURVERZEICHNIS....136

1 EINLEITUNG

Im Zuge der Einleitung und der folgenden Unterkapitel soll dem Leser / der Leserin die Möglichkeit geboten werden, sich mit verschiedenen Aspekten der Arbeit vertraut zu machen. Es wird die Ausgangssituation sowie die Motivation beschrieben, die zur Umsetzung der Arbeit geführt haben. In Unterkapitel 1.2 wird die aktuelle Problemstellung des Cloud Computing (CC) und speziell des Green Cloud Computing (GCC) als Ausgangslage für diese Arbeit präsentiert. Die Kapitel 1.3 dienen dazu, der Leserschaft dieser Arbeit sowohl die Forschungsfrage, Hypothesen und Zielsetzung näher zu bringen. Die dazu notwendige Vorgehensweise wird in Unterkapitel 1.4 erläutert, und im abschließenden Unterkapitel wird der Aufbau der restlichen Arbeit dargelegt.

1.1 Motivation und Ausgangssituation

Cloud Computing ist der am stärksten wachsende Teil der IT-Services seit den letzten Jahren und hat seit 2017 seinen Anteil von 14,5% auf 42,5% im Jahr 2022 erhöhen können. Die drei großen Anbieter (Microsoft, Amazon, Google) von Cloud Computing Kapazitäten betonen alle anhand selbst erstellter Studien den geringeren CO^2 Ausstoß von Cloud Computing gegenüber von traditionellen on-premise Datenzentren. (Gartner; Statista, 2023)

Dennoch ist aufgrund des sehr starken Wachstums insbesondere im Bereich der IoT-Devices, die auch Daten über das Internet und zumeist über CC-Kapazitäten mit einem starken Anstieg von benötigter Rechenleistung zu rechnen. Petrov geht hierbei von 29 Milliarden IoT-Geräten Ende 2022 aus, die bis Ende 2025 auf 64 Milliarden anwachsen werden. (Vaishnavi & Ananthi, 2020)

Steven Gonzalez Monserrate beschreibt in „The Cloud Is Material: On the Environmental Impacts of Computation and Data Storage" die Auswirkungen des steigenden Bedarfs an Rechenleistung für die Umwelt. (Steven Gonzalez Monserrate, 2022)

1.2 Problemstellung

Aufgrund dieser steigenden benötigten Rechenleistung, sowie der erhöhten Konnektivität der verschiedenen miteinander verbundenen Devices, die über das Internet verbunden sind, erhöht sich auch die Auswirkungen bzw. der ökologische Fußabdruck des Cloud-Computings. CC hat abhängig von den verwendeten Berechnungsmethoden und Studien einen Anteil von 0,3 bis 2 Prozent des globalen CO^2 Ausstoßes. Der ökologische Fußabdruck unter der Berücksichtigung verschiedener zusätzlicher Kriterien wie Abfallprodukte, Wasserverbrauch und Versiegelung wird dementsprechend höher sein. (Westerhof)

1.3 Fragestellung und Zielsetzung

Dieses Kapitel dient dazu, die Forschungsfrage zu erörtern, die im Rahmen dieser Masterarbeit bearbeitet wird. Die Forschungsfrage stellt den Ausgangspunkt für die gesamte Untersuchung im methodischen Teil dar und zielt darauf ab, das gewählte Untersuchungsgebiet genauer zu beleuchten und neue Erkenntnisse zu gewinnen.

Außerdem werden die Hypothesen und Nullhypothesen präsentiert. Die Hypothesen formulieren Annahmen, die im Verlauf der Arbeit und der Literaturanalyse nach Brock et al. auf ihre Gültigkeit hin überprüft werden. Das Ziel besteht darin, Aussagen über mögliche Zusammenhänge oder Effekte im untersuchten Bereich zu treffen und somit einen Rahmen für die weitere Analyse zu liefern.

In diesem Kapitel werden zudem die Ziele der Arbeit definiert. Dadurch soll für den Leser / die Leserin klar ersichtlich werden, welche konkreten Ergebnisse und Erkenntnisse mit der Durchführung der Untersuchung angestrebt werden. Diese Ziele dienen als Leitplanken für den Forschungsprozess. Um die Ziele fokussiert abzugrenzen, werden auch die Nicht-Ziele der Arbeit festgelegt. Dadurch sollen der geneigten Leserschaft bereits vorab jene Aspekte dargelegt werden, die nicht im Fokus der Untersuchung liegen.

Summa summarum ist dieses Kapitel die Grundlage für die weitere Vorgehensweise der Arbeit. Das Ziel besteht darin, eine klare Ausgangssituation und einen Rahmen zu etablieren, innerhalb dessen die Untersuchung stattfinden wird.

1.3.1 Forschungsfrage

Anhand der in Kapitel 1.1 und 1.2 dargestellten Ist-Situation wird ersichtlich, dass Cloud Computing und der ökologische Fußabdruck eine immer größere Rolle einnehmen werden. Angesichts der erhöhten Anforderungen an Rechenkapazität, der steigenden Anzahl von Webapplikationen und Geräten im Internet ist es notwendig, eine ressourcenschonende Variante des Cloud Computing anzubieten. In den letzten Jahren haben sich unter dem Sammelbegriff des „Green Cloud Computing" verschiedene Maßnahmen, Methoden und Ideen entwickelt.

Basierend auf dieser Entwicklung und der Problemstellung soll in dieser Masterarbeit folgende Forschungsfrage behandelt werden: „*Welche Handlungsempfehlungen lassen sich aus der wissenschaftlichen Literatur ableiten, um den Einsatz von Maßnahmen des Green Cloud Computing zur Reduzierung des ökologischen Fußabdrucks innerhalb von österreichischen Cloudanbieter zu optimieren?*“

Die Forschungsfrage bildet den Leitstern der gesamten Arbeit. Das Ziel besteht darin, den Anforderungen des Fachhochschulgesetzes gemäß Paragraf 3(2) gerecht zu werden, indem Aufgaben des jeweiligen Berufsfeldes unter Berücksichtigung des Standes der Wissenschaft, sowie der aktuellen und zukünftigen Anforderungen der Praxis gelöst werden.

Das Hauptaugenmerk wird daher auf die Identifikation von praxisrelevanten Empfehlungen für Unternehmen und Organisationen gelegt. Das Ziel besteht darin, den Einsatz von Green Cloud Computing Maßnahmen gezielt zu optimieren und somit den ökologischen Fußabdruck zu reduzieren.

Für die Beantwortung dieser Forschungsfrage ist eine umfassende Analyse des aktuellen Forschungsstands, die Untersuchung von Best Practices und Fallstudien, sowie die Berücksichtigung relevanter ökonomischer, ökologischer und technologischer Aspekte notwendig. Ziel ist die Erstellung von konkrete Handlungsempfehlungen, die Unternehmen dabei unterstützen, nachhaltigere Praktiken im Bereich des Cloud-Computings umzusetzen.

Die Untersuchung dieser Forschungsfrage trägt zur Erweiterung des bestehenden Wissensstands im Bereich des GCC bei und liefert einen praktischen Beitrag, um die Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit von CC-Lösungen zu verbessern.

1.3.2 Hypothesen

Die nachfolgenden Hypothesen dienen der besseren Einordnung und Bearbeitung der Forschungsfrage. Durch Hypothesen und Nullhypothesen können die Suchbegriffe und Suchanfragen für die Literaturanalyse nach Brock et.al besser methodisch aufgebaut werden. Dadurch kann ein zielgerichteteres Optimieren der Suchalgorithmen erfolgen.

1.3.3 H1

H1-0: Im Cloud Computing erfolgt bereits die Energie effizienteste Nutzung der Hardware im Rechenzentrum aufgrund des Kostenfaktors.

H1-1: Ein verstärkter Einsatz energieeffizienter Nutzung der Hardware im Green Cloud Computing führt zu einer signifikanten Reduzierung des ökologischen Fußabdrucks.

1.3.4 H2

H2-0: Cloud-Ressourcen und -Workloads können nicht mehr optimiert werden.

H2-1: Die Optimierung von Cloud-Ressourcen und -Workloads im Green Cloud Computing trägt zu einer Steigerung der Effizienz, Leistung und einer Reduzierung des Energieverbrauchs bei.

1.3.5 H3

H3-0: Im Cloud Computing sind durch bestehende Algorithmen und Prozeduren die Task-Allokationen bereits maximal optimiert.

H3-1: Neue Algorithmen und Prozeduren im Green Cloud Computing können Effizienz- und Leistungsverbesserungen sowie eine optimierte Allokation von Tasks in Rechenzentren ermöglichen, um eine maximale Energieausnutzung zu gewährleisten.

1.3.6 H4

H4-0: Virtualisierungstechnologien besitzen keinen nennenswerten Vorteil mehr.

H4-1: Der verstärkte Einsatz von Virtualisierungstechnologien im Green Cloud Computing verbessert die Ressourcennutzung, Skalierbarkeit und Flexibilität von Cloud-Diensten.

1.3.7 Ziele

Die Masterarbeit hat das Ziel, den aktuellen Forschungsstand von Green Cloud Computing möglichst umfassend für die Beantwortung der Forschungsfrage und er Hypothesen zu erheben und zu analysieren. Als Arbeit an einer österreichischen Fachhochschule sollen dabei Handlungsempfehlungen bzw. ein Katalog erstellt werden, der von Unternehmen bzw. österreichischen Cloud Anbietern genutzt werden kann. Es sollen dabei die unterschiedlichen Maßnahmen im Green Cloud Computing analysiert werden, um bestmöglich die Reduktion des ökologischen Fußabdrucks von Cloud Hosting Anbietern zu reduzieren.

Ziel ist es ein Katalog an Handlungsempfehlungen sowie Anhänge zu erstellen die durch Praxisanwender*innen sowie Unternehmen genutzt werden können

1.4 Vorgehensweise

Im Rahmen der Masterarbeit ist es notwendig ein Vorgehensmodell auszuwählen, das in der Lage ist, die Forschungsfrage zu beantworten und die Hypothesen zu testen. Im Zuge der Wirtschaftsinformatik genutzten Modelle der verhaltensorientieren und gestaltungsorientierten Vorgehensweise ist es festzuhalten, dass als einzig Möglichkeit für die Erstellung eines validen Artefaktes der Zugang zu einem Cloud Service Provider (CSP) gegeben sein muss, sowie die Möglichkeit der Implementierung des Artefaktes, um die notwendige Validierung vorzunehmen.

Dies ist leider im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, daher wurde aufgrund der hohen Anzahl an Forschungsarbeiten zu dieser Thematik die strukturierte Literaturrecherche als an der ehesten zutreffenden Art und Weise identifiziert. Damit lässt sich die Forschungsfrage in einer Breite untersuchen und beantworten, die ein experimenteller Ansatz nicht zulässt.

Anhand von Suchoperationen und Suchbegriffen wird nach Forschungsarbeiten im Zeitraum 2010 bis 2023 gesucht. Entsprechend der gewählten Methodik werden die Forschungsarbeiten nach Einschluss- und Ausschlusskriterien gefiltert. Die Suchoperationen werden durch wildcards, booleans und OR-Operationen erweitert.

Der damit entstehende Korpus an Forschungsarbeiten wird im nächsten Schritt genauer analysiert. Die durchgeführten Studien und Studienergebnisse werden durchleuchtet, ob Sie dazu beitragen können, die Forschungsfrage dieser Masterarbeit zu beantworten.

Dieser Ergebnisse werden visualisiert und zusätzliche Ergebnisse in den Anhängen für den geneigten Leser*in zu Verfügung gestellt.

1.5 Aufbau der Arbeit

Im vorliegenden Kapitel wird der Aufbau der Arbeit beschrieben, um dem Leser einen Überblick über die Struktur und den Inhalt der Arbeit zu geben.

Die Arbeit beginnt mit einer Einleitung, in der die Motivation und die Ausgangssituation für die Untersuchung des Themas Cloud Computing und Green Cloud Computing erläutert werden. Anschließend wird die Problemstellung identifiziert und die Fragestellung, sowie die Zielsetzung der Arbeit formuliert. Die Forschungsfrage konzentriert sich auf die Auswirkungen von GCC auf die Umweltbilanz von CSP.

Das Kapitel setzt sich fort mit der Darstellung der Vorgehensweise, die in dieser Arbeit angewendet wird, um die Forschungsziele zu erreichen. Es werden die verschiedenen methodischen Schritte erläutert, die im Rahmen der systematischen Literaturrecherche durchgeführt wurden, um relevante Quellen und Erkenntnisse zum Thema zu identifizieren.

Im Hauptteil der Arbeit werden zunächst grundlegende Definitionen und Charakteristika des Cloud-Computings dargestellt. Es werden die verschiedenen Servicemodelle und Bereitstellungsmodelle des Cloud-Computings erläutert, um ein Verständnis für die Funktionsweise und die Möglichkeiten von Cloud-Diensten zu schaffen.

Anschließend wird auf den Bereich des Green Cloud-Computings eingegangen. Dabei wird die historische Entwicklung des Green Cloud-Computings betrachtet und die Bedeutung von umweltfreundlichen Praktiken im Cloud Computing diskutiert. Zudem wird auf die Rolle von Green Cloud Datacentern eingegangen und deren Auswirkungen auf den Energie- und Wasserverbrauch, sowie die Abwärme betrachtet.

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit der Methodik der systematischen Literaturrecherche, die für diese Arbeit angewendet wurde. Es wird erläutert, wie die Literaturrecherche nach vom Brocke et al. durchgeführt wurde, um relevante Forschungsarbeiten und Erkenntnisse zum Thema zu identifizieren.

Im darauffolgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Literaturrecherche präsentiert. Es werden die wichtigsten Erkenntnisse und Forschungsergebnisse zu den Themen Cloud Computing und Green Cloud Computing zusammengefasst und analysiert.

Abschließend wird das Kapitel zur Konklusion gewidmet. Hier werden die Aufgabenstellung und die Zusammenfassung der Arbeit präsentiert. Die Interpretation der Ergebnisse erfolgt, und es wird überprüft, ob die aufgestellten Hypothesen bestätigt werden können. Konkrete

Handlungsempfehlungen werden gegeben, und die Forschungsfrage wird abschließend beantwortet. Schließlich wird eine kritische Würdigung der Arbeit vorgenommen.

Das Kapitel zum Aufbau der Arbeit gibt somit einen Überblick über die Struktur und den Inhalt der Arbeit, sodass der Leser die einzelnen Kapitel und deren Beziehung zueinander besser verstehen kann.

2 CLOUD COMPUTING

Cloud Computing stellt ein Subsegment der IT-Services dar. Für die Beantwortung der Forschungsfrage ist es daher notwendig, vorab das traditionelle Cloud Computing für die Verwendung innerhalb dieser Masterarbeit, abzugrenzen und zu definieren. Zusätzlich sollen aktuelle Prognosen zum Wachstum des Cloud Computing betrachtet werden, sowie die ökologischen Auswirkungen. Ein weiterer Aspekt, der in diesem Theoriekapitel genauer analysiert werden soll, ist der in Kapitel 1.2 bereits erwähnte Effizienzgewinn bzw. Reduktion des CO^2 Ausstoßes von traditionellen Cloud Computing zu on-premise Datazentren die nur durch lokalen Organisationen und Firmen betrieben werden.

2.1 Definition

Cloud Computing bezeichnet ein Paradigma der Informationsverarbeitung, bei dem Ressourcen wie Rechenleistung, Speicherplatz und Anwendungen über das Internet bereitgestellt werden. Es ermöglicht den Zugriff auf IT-Dienste und -Ressourcen nach Bedarf und bietet Flexibilität, Skalierbarkeit und Effizienzvorteile gegenüber herkömmlichen lokalen IT-Infrastrukturen.

Cloud Computing basiert auf der Idee, dass Dienste und Ressourcen von zentralen Servern oder Rechenzentren bereitgestellt und über das Internet auf verschiedene Endgeräte und Plattformen zugänglich gemacht werden. Es ermöglicht den Nutzern, auf eine Vielzahl von Diensten zuzugreifen, ohne dass sie die physische Infrastruktur und die zugrunde liegende technische Komplexität selbst verwalten müssen. (Jayachander Surbiryala & Chunming Rong, 2019)

Das National Institute of Standards and Technology (NIST) unterteilt Cloud Computing dabei in drei Bereiche, Deployment bzw. Bereitstellungsmodelle, Servicemodelle und fundamentale Charakteristika. (P. Mell & T. Grance, 2011)

Nachfolgende eine graphische Darstellung dieser drei Bereiche für die Visualisierung und Darstellung.

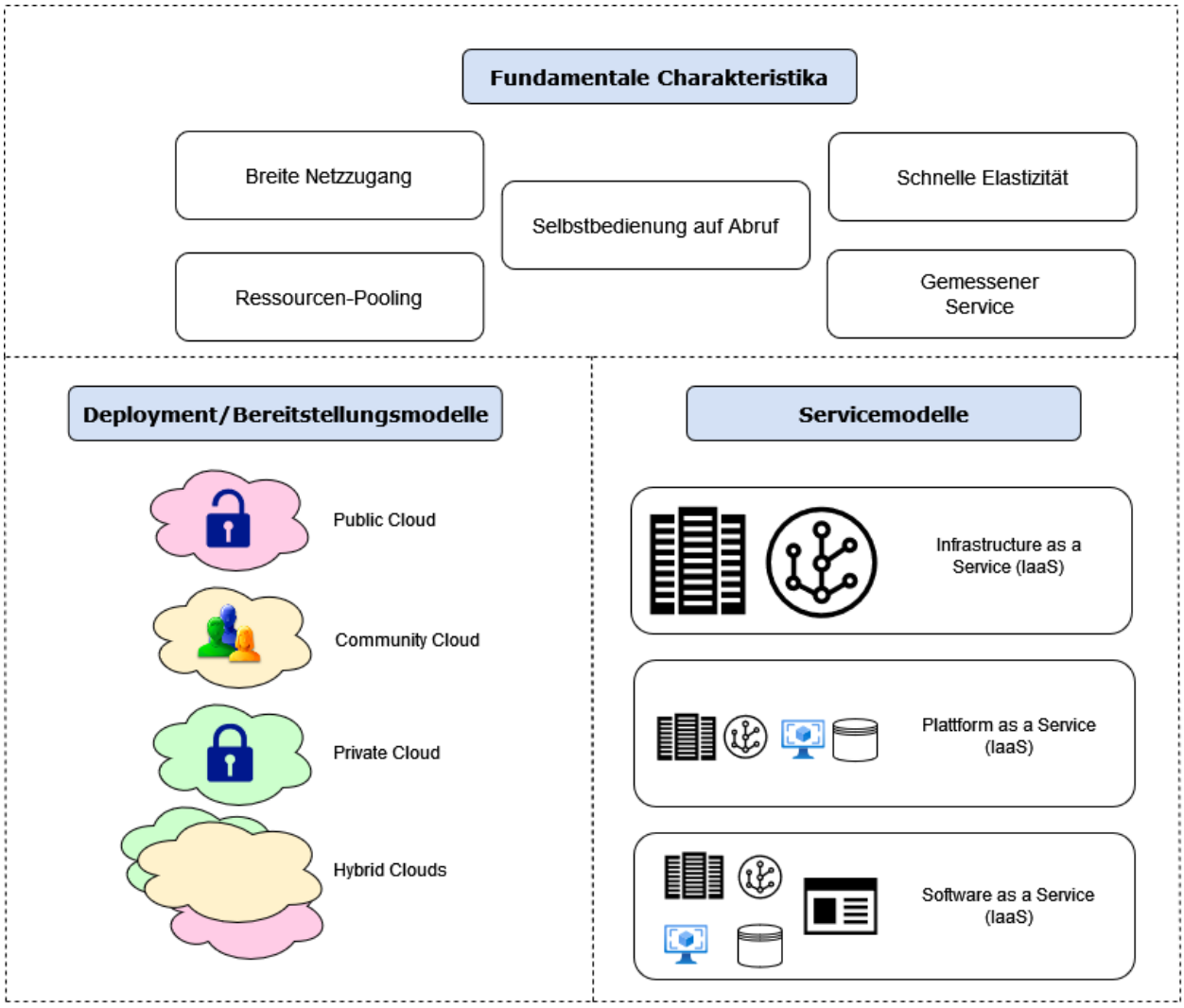


Abbildung 1: Eigene Darstellung Fundamentale Charakteristika des Cloud Computing, Servicemodelle und Bereitstellungsmodelle basierend auf (Jayachander Surbiryala & Chunming Rong, 2019)

2.1.1 Fundamentale Charakteristika

Die fundamentalen Charakteristika des Cloud Computing nach NIST Definition ermöglichen es Unternehmen und Organisationen, IT-Ressourcen und -Dienste bedarfsgerecht und effizient zu nutzen. Nachfolgende eine detailliertere Beschreibung der einzelnen Charakteristika

Unter der **Selbstbedienung auf Abruf** beschreibt die NIST die Möglichkeit, dass ein Verbraucher einseitig und automatisch nach Bedarf Rechenkapazitäten, wie zum Beispiel Serverzeit und Netzwerkspeicher, bereitstellen kann, ohne dass eine menschliche Interaktion mit dem jeweiligen Dienstanbieter erforderlich ist. (Jadeja & Modi, 2012; Jayachander Surbiryala & Chunming Rong, 2019; P. Mell & T. Grance, 2011)

Der **Breite Netzzugang** ermöglicht es, dass die Funktionen über das Netz verfügbar sind. Dadurch können Standardmechanismen genutzt werden, die die Nutzung durch heterogene Thin- oder Thick-Client-Plattformen fördern, wie beispielsweise Mobiltelefone, Tablets, Laptops

und Workstations. (Jayachander Surbiryala & Chunming Rong, 2019; P. Mell & T. Grance, 2011)

Beim **Ressourcen-Pooling** werden die Rechenressourcen des Anbieters in einem Multi-Tenant-Modell gepoolt, um mehrere Kunden zu bedienen. Dabei werden verschiedene physische und virtuelle Ressourcen dynamisch je nach Kundenbedarf zugewiesen und neu zugewiesen. Es besteht eine gewisse Standortunabhängigkeit, da der Kunde im Allgemeinen keine Kontrolle oder Kenntnis über den genauen Standort der bereitgestellten Ressourcen hat, jedoch auf einer höheren Abstraktionsebene, wie beispielsweise Land, Bundesland oder Rechenzentrum, einen Standort angeben kann. Beispiele für Ressourcen sind Speicher, Verarbeitung, Arbeitsspeicher und Netzwerkbandbreite. (Jadeja & Modi, 2012; Jayachander Surbiryala & Chunming Rong, 2019; P. Mell & T. Grance, 2011)

Schnelle Elastizität. Die Fähigkeiten können elastisch bereitgestellt und freigegeben werden, in einigen Fällen automatisch, um schnell und flexibel auf Bedarfsschwankungen zu reagieren. Für den Kunden erscheinen die verfügbaren Kapazitäten zur Bereitstellung oft unbegrenzt und können in beliebiger Menge und zu jeder Zeit in Anspruch genommen werden. (Jadeja & Modi, 2012; Jayachander Surbiryala & Chunming Rong, 2019)

Gemessener Service. Cloud-Systeme steuern und optimieren automatisch die Ressourcennutzung, indem sie eine Messfunktion auf einer für die Art des Dienstes geeigneten Abstraktionsebene nutzen, wie beispielsweise Speicher, Verarbeitung, Bandbreite und aktive Benutzerkonten. Durch diese Messfunktion kann die Ressourcennutzung überwacht, kontrolliert und gemeldet werden. Dadurch entsteht eine Transparenz sowohl für den Anbieter als auch für den Nutzer des Dienstes, indem sowohl die tatsächliche Nutzung als auch die damit verbundenen Kosten und Leistungen klar erfasst werden können. (Jadeja & Modi, 2012; Jayachander Surbiryala & Chunming Rong, 2019; P. Mell & T. Grance, 2011)

2.1.2 Servicemodelle

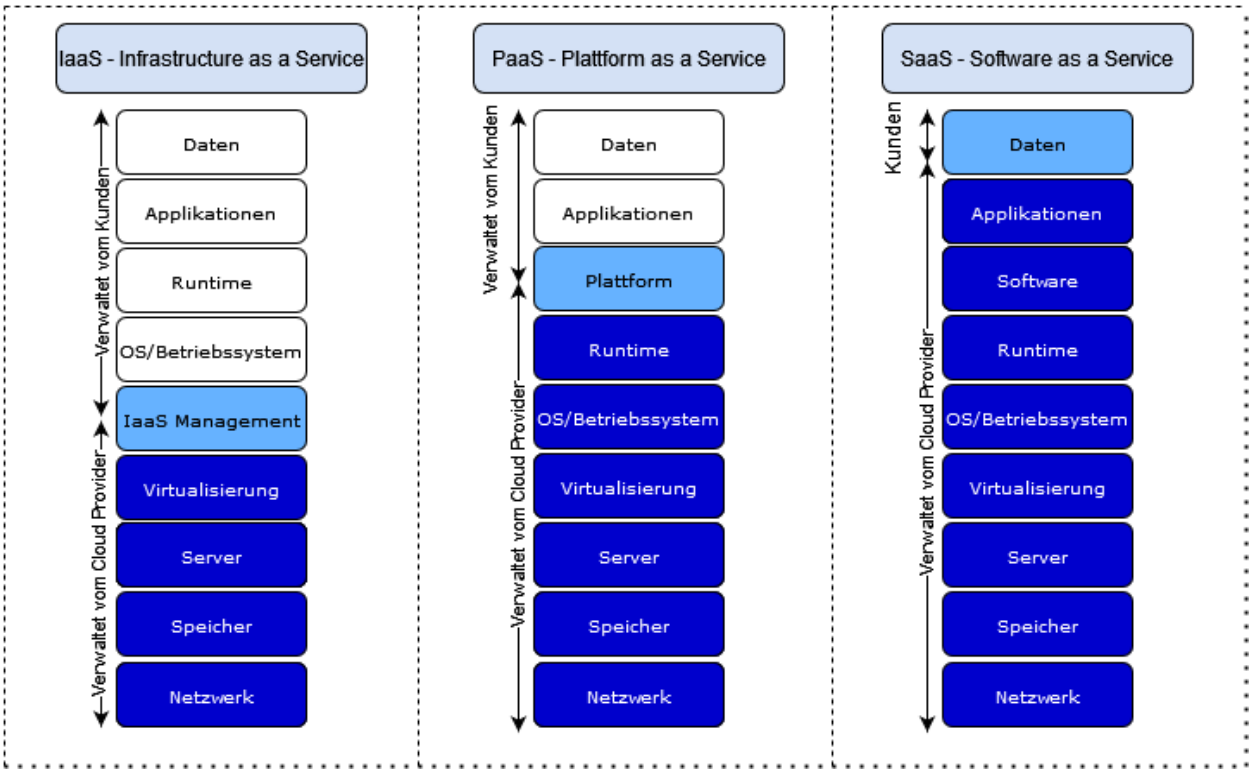


Abbildung 2: Eigene Darstellung der Servicemodelle basierend auf (Jayachander Surbiryala & Chunming Rong, 2019)

Infrastructure-as-a-Service (IaaS) kann in dieser Arbeit als die Nutzung von Servern, Speicher und Virtualisierung definiert werden, um nutzungsähnliche Dienste für Benutzer bereitzustellen (Gibson et al., 2012; Kaur, 2016; Bokhari et al., 2016; Kavis, 2014). Die zugrunde liegende Infrastruktur umfasst die Einrichtung, Kommunikationsnetze, physische Rechenknoten und den Pool von virtualisierten Rechenressourcen, die vom Dienstanbieter verwaltet werden. Durch einen webbasierten Dienst ermöglicht IaaS den Nutzern die Erstellung, Verwaltung und Bereitstellung virtueller Maschinen und Speicher. Zudem besteht die Möglichkeit, die Ressourcennutzung über einen bestimmten Zeitraum zu messen und den Nutzern entsprechend einem vereinbarten Tarif in Rechnung zu stellen. (Hossain, 2013; Michael Kavis, 2014; Sitaram & Manjunath, 2011a)

Ein wesentlicher Vorteil der Nutzung von IaaS besteht darin, dass die Verantwortung für die Verwaltung der physischen und virtualisierten Infrastruktur auf den Dienstanbieter übertragen wird, während die Nutzer die Kontrolle über das Betriebssystem, die Konfiguration und die auf den virtuellen Maschinen installierte Software behalten. Bei der Entscheidung für IaaS-Dienste steht die Wahl zwischen einer selbstverwalteten privaten Cloud vor Ort, einem gehosteten Dienst oder einer Kombination aus beiden Optionen im Fokus. Hierbei spielen verschiedene Faktoren wie Sicherheitsrichtlinien, Governance und der physische Standort der Daten eine entscheidende Rolle. (Hossain, 2013; Michael Armbrust et al., 2009; Sitaram & Manjunath, 2011a)

Die Sicherheit spielt bei der Nutzung von IaaS eine zentrale Rolle, insbesondere aufgrund der Abhängigkeit anderer Cloud-Service-Modelle von der zugrunde liegenden Infrastruktur. In einer gemeinsam genutzten Umgebung besteht das Risiko, dass ein Unternehmen den Arbeitslasten und Daten vieler anderer Unternehmen ausgesetzt ist. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, ist es von großer Bedeutung, Rollen sorgfältig zuzuweisen, detaillierte Protokollierung durchzuführen und das Sicherheitsprinzip der geringsten Privilegien anzuwenden. (Hossain, 2013; J. Gibson et al., 2012; Sitaram & Manjunath, 2011a)

Die Kommunikation und das Netzwerk stellen eine weitere wichtige Komponente bei IaaS dar. Die Verschlüsselung der Daten innerhalb des Gastbetriebssystems spielt eine bedeutende Rolle, um sie vor aktuellen oder zukünftigen Angriffen auf die Virtualisierungsschicht zu schützen. Zudem ist es ratsam, die privilegierten Domänen zu überdenken oder zu ändern, um das Risiko des Backend-Snooping des Hypervisors zu verringern.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass IaaS ein vielseitiger Ansatz ist, der Unternehmen die Möglichkeit bietet, ihre Ressourcen effizienter zu nutzen und gleichzeitig die Kontrolle über ihre Infrastruktur zu behalten. Es ist jedoch von entscheidender Bedeutung, angemessene Sicherheitsmaßnahmen zu implementieren und die Kommunikation im Netzwerk sorgfältig zu gestalten, um potenzielle Risiken zu minimieren und die Vorteile von IaaS optimal zu nutzen. (Hossain, 2013; J. Gibson et al., 2012; Sitaram & Manjunath, 2011a)

Im Rahmen des Theorie- und Definitionsabschnitts dieser Masterarbeit werden wir uns eingehend mit der Plattform-as-a-Service (PaaS) im Kontext des Cloud Computing beschäftigen. PaaS stellt einen bedeutsamen Ansatz für die Anwendungsentwicklung und -bereitstellung in der Cloud dar und verdient eine gründliche theoretische Analyse. (A. Giessmann & K. Stanoevska-Slabeva, 2012; Krintz, 2018; M. U. Bokhari et al., 2016; S. Khurana & Anmol Verma, 2013; Sitaram & Manjunath, 2011b)

PaaS ermöglicht Unternehmen den Zugang zu APIs, Programmiersprachen und Entwicklungs-Middleware, um maßgeschneiderte Anwendungen zu erstellen, ohne eine umfassende Einrichtung und Konfiguration einer eigenen Entwicklungsumgebung durchführen zu müssen. Als Weiterentwicklung des Infrastruktur-as-a-Service (IaaS)-Modells bietet PaaS ähnliche Vorteile wie Hardware-Virtualisierung, dynamische Ressourcenzuweisung und niedrige Investitionskosten. Durch die Nutzung von vorkonfigurierten Entwicklungsumgebungen und gemeinsam genutzter oder virtueller Software kann der zeitaufwändige Prozess der Einrichtung, Verwaltung und Wartung für Entwickler und Systemadministratoren erheblich reduziert werden. Die in der PaaS-Plattform integrierten Tools ermöglichen es Entwicklern, Anwendungen und Dienste zu erstellen, die von den Vorteilen der virtualisierten Hardware, Datenredundanz und hoher Verfügbarkeit profitieren. Nach Abschluss der Entwicklung können die Anwendungen über das Internet bereitgestellt werden. PaaS-Anbieter wie Google App Engine, Microsoft Azure und SalesForce.com stellen eine Vielzahl von Diensten zur Verfügung, um Unternehmen bei der Entwicklung und Bereitstellung ihrer Anwendungen zu unterstützen. Durch die Nutzung von PaaS können Unternehmen flexibel auf geschäftliche Anforderungen reagieren und die

Skalierbarkeit ihrer Anwendungen verbessern, da Ressourcen bedarfsgerecht zugewiesen werden können. (A. Giessmann & K. Stanoevska-Slabeva, 2012; Krintz, 2018; M. U. Bokhari et al., 2016; S. Khurana & Anmol Verma, 2013; Sitaram & Manjunath, 2011b)

Es ist jedoch wichtig, Herausforderungen im Zusammenhang mit der Nutzung von PaaS zu berücksichtigen. Die Kompatibilität zwischen verschiedenen PaaS-Plattformen kann ein Problem darstellen, da es keine einheitliche Liste von Funktionen, Sprachen, APIs, Software oder Datenbanktypen gibt, die von allen Anbietern unterstützt werden. Daher müssen Unternehmen sorgfältig abwägen, welcher Anbieter ihren spezifischen Anforderungen am besten gerecht wird. Ein weiterer Aspekt, der bei der Nutzung von PaaS beachtet werden muss, ist die Sicherheit. Öffentliche Clouds beschränken die Kontrolle über die eigenen Daten und den geografischen Speicherort. PaaS-Plattformen müssen spezielle Dienste hosten, die über erhöhte Berechtigungen verfügen, um effektiv zu funktionieren. Daher ist es von entscheidender Bedeutung, dass Anbieter angemessene Sicherheitsmaßnahmen ergreifen, um unbefugten Zugriff auf Plattformen, Netzwerkverkehr oder Daten anderer Benutzer zu verhindern. Die Wahl zwischen proprietären und Open-Source-PaaS-Plattformen ist ein weiterer wichtiger Faktor. Open-Source-Plattformen bieten ein höheres Maß an Kontrolle und Transparenz in Bezug auf Sicherheitsmaßnahmen, da der Quellcode von Dritten überprüft werden kann. Um mögliche Schwachstellen zu identifizieren und zu beheben, empfiehlt es sich, Sicherheitsaudits und Tests durch Dritte durchzuführen. (A. Giessmann & K. Stanoevska-Slabeva, 2012; Krintz, 2018; M. U. Bokhari et al., 2016; S. Khurana & Anmol Verma, 2013; Sitaram & Manjunath, 2011b)

Abschließend lässt sich sagen, dass PaaS Unternehmen die Möglichkeit bietet, maßgeschneiderte Anwendungen effizient zu entwickeln und bereitzustellen. Jedoch erfordert der erfolgreiche Einsatz von PaaS eine gründliche Abwägung der Herausforderungen und Risiken, sowie die Umsetzung angemessener Sicherheitsvorkehrungen. Im Rahmen der digitalen Transformation und Innovationsentwicklung wird PaaS weiterhin eine zentrale Rolle spielen. Unternehmen sollten die Chancen nutzen und mit vertrauenswürdigen PaaS-Anbietern zusammenarbeiten, um ihre Wettbewerbsfähigkeit und Agilität zu stärken**.** (A. Giessmann & K. Stanoevska-Slabeva, 2012; Krintz, 2018; M. U. Bokhari et al., 2016; S. Khurana & Anmol Verma, 2013; Sitaram & Manjunath, 2011b)

Software as a Service (SaaS) ist ein weiteres Servicemodell im Cloud Computing. Nutzer erhalten Zugriff auf in der Cloud gehostete Software und Dienste, ohne diese auf ihren Geräten installieren zu müssen. Die Nutzung erfolgt über eine Thin-Client-Software wie einen Webbrowser, was Hardware-Anforderungen reduziert und eine zentrale Kontrolle und Wartung ermöglicht. SaaS bietet für Unternehmen gewisse Vorteile, darunter Kosteneinsparungen und Budgetierung. Untersuchungen zeigen niedrige Anfangsinvestitionskosten für Software, Hardware und Personal. Unternehmen können laut einer Studie von Microsoft (Michael & Rolf, 2010) und Hurwtiz & Associates (Aggarwal & Laurie McCabe, 2009) im Vergleich zu lokal installierten Lösungen Einsparungen erzielen. Zusätzlich bietet SaaS Sicherheitsvorteile für Unternehmen, insbesondere beim Umgang mit sensiblen Daten. Zentrale Datenspeicherung reduziert das Risiko von Datenverlust und ermöglicht effiziente Reaktionen auf Vorfälle. Weitere Sicherheitsvorteile umfassen gemeinsame Kosten für Sicherheitstests, sichere Protokollierung und ein effizientes System. Trotz der Vorteile gibt es auch Herausforderungen, wie

abnehmende Kosteneinsparungen mit zunehmender Mitarbeiterzahl und Sicherheitsbedenken. Unternehmen sollten bei der Auswahl eines SaaS-Anbieters Fragen zur Datenbankzugriffskontrolle, Datenverschlüsselung, getrennten Kundendaten, Sicherheitskontrollen, Service Level Agreements und Audit-Protokollen stellen, um Sicherheitsrisiken zu mindern. (M. U. Bokhari et al., 2016; A. S. Rumale & D. N. Chaudhari, 2017; S. Khurana & Anmol Verma, 2013; Wohl, 2010)

Faktoren	SaaS	PaaS	IaaS
Charakteristika	Standortunabhängigen Zugriff auf Anwendungen über das Internet, ohne dass Nutzer sich um die Softwareverwaltung kümmern müssen, da sie über das Web bereitgestellt wird.	integrierte Entwicklungsumgebung in der Cloud, ermöglicht die Entwicklung, Bereitstellung und Wartung von Anwendungen und nutzt die Cloud-Infrastruktur für eine effiziente Plattformnutzung	möglicht die flexible, skalierbare und virtualisierte Bereitstellung von Hardware und Speicher in der Cloud, erlaubt die gemeinsame Nutzung von Ressourcen, unterstützt verschiedene Betriebssysteme und Plattformen
Kontrolllevel des Kunden	Nutzung(-Konfiguration)	Begrenzte Verwaltung	Volle Verwaltung
Kunden Aktivitäten	Konfiguration der Benutzer und der Software	Testen, Entwickeln, Verwalten und Bereitstellen Cloud-basierte Lösungen	Konfigurieren und Einrichten der Infrastruktur, Installation
Cloud Provider Aktivitäten	Verwalten, pflegen und implementieren sowie Überwachung der Nutzung von Cloud-Diensten	Vorkonfiguration der Plattform und Bereitstellung der zugrunde liegenden Infrastruktur.	Verwalten und Bereitstellen des Speichers, physische Verarbeitung, Hosting und Vernetzung sowie die erforderliche Überwachung
Typische Services	Email, CRM, website testing, Virtual desktop, Wiki, Blog, Automation	Test von Diensten und Anwendungen, Entwicklung, Integration und Bereitstellung	Virtuelle Maschine, Betriebssystem, Netzwerk, Speicher, CPU, Speicher, Sicherungsdienst

Tabelle 1: Eigene Zusammenfassung basierend auf (M. U. Bokhari et al., 2016)

Genauere Darstellung und Informationen können im Anhang A gefunden werden.

2.1.3 Deployment- / Bereitstellungsmodell

In der **öffentlichen Cloud** wird vom Dienstanbieter Ressourcen über das Internet öffentlichen Nutzern zur Verfügung gestellt. Sie gehört einer Organisation, die Cloud-Dienste verkauft. Nutzer können je nach Bedarf auf die Ressourcen zugreifen und diese skalieren. Ein großer Vorteil der öffentlichen Cloud besteht darin, dass sie kostengünstigen Zugang zu Ressourcen bietet. Kleine und mittlere Unternehmen sowie Organisationen können auf die Dienste von Anbietern der öffentlichen Cloud zugreifen, ohne Ressourcen im Voraus bereitstellen zu müssen. Beispiele für Anbieter von öffentlichen Cloud-Diensten sind Google, Amazon, Microsoft (Windows Azure) und Apple (iCloud). (Armbrust et al., 2010; Hoogendoorn, 2021; Lehwess, 2021)

Bei der **privaten Cloud** handelt es sich um ein Modell, bei dem Cloud-Dienste für eine private Organisation bereitgestellt werden. Die private Cloud kann entweder von der Organisation selbst oder von einem Drittanbieter verwaltet werden, entweder in den eigenen Räumlichkeiten oder an einem externen Ort. Private Clouds bieten den Vorteil der Sicherheit, da alle Daten auf dedizierten Servern der Organisation gespeichert sind. Obwohl die Organisation die anfänglichen Kosten für den Aufbau der Infrastruktur trägt, bietet die Sicherheit einen bedeutenden Vorteil. (Beach, 2014; Karandeep Kaur, 2016; Olowu et al., 2019)

Die **Community Cloud** ist ein Modell, bei dem Cloud-Dienste von mehreren Organisationen gemeinsam genutzt werden, um spezifische Anforderungen einer bestimmten Gemeinschaft zu erfüllen. Die Verwaltung der Gemeinschaftswolke kann entweder von den Organisationen selbst oder von einem Drittanbieter erfolgen, entweder vor Ort oder außerhalb des Unternehmens. Diese Art von Cloud bietet ebenfalls eine sichere Infrastruktur für die teilnehmenden Organisationen, ähnlich wie die private Cloud. (Karandeep Kaur, 2016)

Die **hybride Cloud** ist ein Modell, das aus einer Kombination von zwei oder mehr Clouds besteht (privat, öffentlich, gemeinschaftlich). Diese Clouds sind separate Entitäten, die durch Standards oder Technologien miteinander verbunden sind und die Portabilität von Daten und Anwendungen ermöglichen. Hybride Wolken bieten die kombinierten Vorteile von öffentlichen und privaten Clouds. Die Skalierbarkeit ist nicht mehr auf private Ressourcen beschränkt, sondern kann bei Bedarf auf öffentliche Cloud-Ressourcen erweitert werden. Zudem kann das Problem der Datensicherheit in einer hybriden Wolke leicht bewältigt werden, indem sensible und vertrauliche Daten auf privaten Servern gespeichert werden. (Karandeep Kaur, 2016)

Für die Betrachtung der verschiedenen Cloud Bereitsstellungsmodelle gibt es mehrere mögliche Faktoren: (Karandeep Kaur, 2016)

- **Skalierbarkeit** ist ein wichtiger Aspekt im Cloud Computing und ermöglicht die flexible Anpassung der Ressourcen nach Bedarf.
- Die **Sicherheit** spielt eine große Rolle, da die Datenverwahrung und -sicherheit in der Cloud eine Herausforderung darstellen können.
- **Zuverlässigkeit** ist ein Faktor, der bei der Nutzung von Cloud-Diensten berücksichtigt werden sollte, um sicherzustellen, dass die Dienste kontinuierlich verfügbar sind.

- Die **Kosten der Nutzung** von Cloud-Diensten variieren je nach Modell und können von niedrigen Betriebskosten bis zu höheren Einrichtungskosten reichen.
- Die **Integration von Daten und Anwendungen** in der Cloud ist ein wichtiger Aspekt, um einen reibungslosen Informationsaustausch zu gewährleisten.
- Das **Systemmanagement** in der Cloud erfordert spezielle Tools und Fähigkeiten, um die Infrastruktur effektiv zu verwalten.
- Die **Portabilität von Cloud-Diensten** betrifft die Übertragung von Daten und Anwendungen zwischen verschiedenen Cloud-Umgebungen.
- Die **Tools und Fähigkeiten** im Zusammenhang mit Cloud Computing sind von großer Bedeutung, um die Cloud-Infrastruktur effektiv nutzen zu können.
- Die **Datenverarbeitung** in der Cloud erfordert eine sichere Handhabung sensibler Informationen und die Einhaltung gesetzlicher Bestimmungen.
- Der **Workload** bezieht sich auf die Verteilung der Arbeitslast zwischen verschiedenen Cloud-Ressourcen, um eine optimale Leistung zu gewährleisten.

Eine taxative, aber nicht erschöpfende Darstellung möglicher Faktoren werden in folgender Tabelle basierend auf (Karandeep Kaur, 2016) präsentiert.

Nr	Charakteristik	Public Cloud	Private Cloud	Hybrid-Cloud
1	Skalierbarkeit	Sehr hoch	Limitiert	Sehr hoch
2	Sicherheit	Niedrig	Hoch	Mittel
3	Perfomanz	Niedrig bis mittel	Sehr gut	Gut
4	Zuverlässigkeit	Mittel	Hoch	Mittel bis hoch
5	Kosten der Nutzung	Zahlung Nutzung	Initiale Setup	Zahlung Nutzung
6	Integration	Einfach	Einfach	Schwierig
7	Systemmanagement	Einfacher	Einfacher	Schwer
8	Portabilität	Einfach	Einfach	Schwierig
9	Tools und Fähigkeiten	Einfach	Moderat	Schwierig
10	Datensicherheitslösungen	Provider	Privaten Server	Dual
11	Privacy	Moderate Chancen	geringere Chancen	Auditierung
12	Speicherung Daten	Public Cloud	Private Cloud	Private Daten
13	Arbeitslast/Workload	Normale Arbeitslast	Operationsspezifisch	Dynamisch

14	Kapitalaufwand	Niedrig	Hoch	Reduziert
15	Organisatorische Agilität	Moderat	Moderat	Erhöht
16	Netzwerk Anforderungen	Internet	Interne Netzwerk	Wechsel

Tabelle 2: Eigene Darstellung Vergleich zwischen Public, Private und Hybrider Cloud basierend auf (Karandeep Kaur, 2016)

Genauere Darstellung und Informationen können im Anhang B gefunden werden.

2.2 Bedeutung

Cloud Computing hat innerhalb der letzten 12 Jahre niemals weniger als 10% jährliches Umsatzwachstum gehabt. Nach schwachen Jahren 2017 wurde aufgrund der COVID-Pandemie wiederum ein starker Zuwachs verzeichnet um die neuen Arbeitsweisen wie Homeoffice, Remote Work, Online-Meetings und Filesharing über die Cloud abzudecken. (Gartner)

Cloud Computing hat laut den Analysen von Statista.com ein Wachstum im Gesamtanteil des Umsatzes von IT-Services von 12,5 auf beinahe 40 Prozent bekommen. Die 3 großen Anbieter von Cloudservicen Amazon, Google und Microsoft haben in dem letzten Jahre stetig Ihre Kapazitäten ausgebaut. Auch für die größte europäischen Softwarefirma SAP ist der Ausbau des Cloudgeschäftes eine Priorität. (Statista, 2023)

2.3 Historie

Cloud Computing hat seinen Ursprung in älteren Technologien wie Utility Computing und Grid Computing, die bereits in den 1960er Jahren existierten. Utility Computing bezeichnete die gemeinsame Nutzung von Rechenressourcen, um Kosten zu senken und den Zugriff auf Server, Speichersysteme und Anwendungen zu ermöglichen. Dieses Konzept wurde bereits in den 1960er Jahren diskutiert. Grid Computing ermöglichte die Aufteilung komplexer Rechenaufgaben auf mehrere Computer, um das Endergebnis effizient zu erzielen. Diese Technologie wurde ebenfalls in den 1960er Jahren entwickelt und weiter vorangetrieben. Das Konzept des Cloud Computing ähnelt sowohl dem Utility Computing als auch dem Grid Computing, hat sich jedoch in den letzten Jahren weiterentwickelt und seine Ziele erreicht. (Jayachander Surbiryala & Chunming Rong, 2019)

Insbesondere ab den späten 1990er Jahren begannen Unternehmen wie Salesforce, Cloud Computing durch die Bereitstellung von SaaS für Kunden zu etablieren. Weitere Modelle wie PaaS und IaaS wurden in den 2000er Jahren eingeführt, um Entwicklern und Unternehmen eine umfassende Cloud-Plattform anzubieten. Universitäten weltweit begannen in den 2000er Jahren in Zusammenarbeit mit Unternehmen wie Google und IBM Cloud-Computing-Programme zu fördern, um Kosten zu reduzieren und Ressourcen effizienter zu nutzen. (Jayachander Surbiryala & Chunming Rong, 2019)

Das Projekt OpenStack wurde 2010 ins Leben gerufen, um eine offene Cloud-Infrastruktur zu schaffen, an dem viele Unternehmen beteiligt sind. (OpenStack, 2023)

Die Cloud Security Alliance (CSA) entwickelte Standards und Richtlinien, um Cloud-Diensteanbietern ab 2011 bei der Gewährleistung von Sicherheit und Interoperabilität zu helfen. (*Home | cloudsecurityalliance*, 2023)

Die Geschichte des Cloud Computing zeigt seine Entwicklung von traditionellen Technologien hin zu einer vielseitigen und leistungsfähigen Lösung für Unternehmen und Benutzer im Laufe der letzten Jahrzehnte.

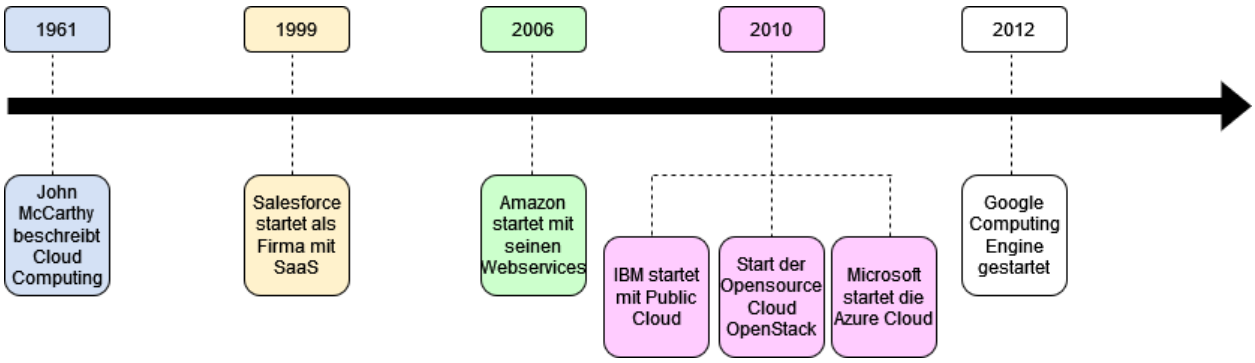


Abbildung 3: Eigene Darstellung Zeitstrahl Historie Cloud Computing basierend auf (Jayachander Surbiryala & Chunming Rong, 2019)

2.4 Ausblick möglicher Entwicklungen

Cloud Computing und das Internet der Dinge (IoT) weisen viele gemeinsame Merkmale auf und können vorteilhaft integriert werden. Cloud Computing hat die Art und Weise verändert, wie Technologien zugänglich, verwaltet und bereitgestellt werden. Das IoT hingegen ermöglicht eine dynamische und globale vernetzte Infrastruktur für Objekte, die sich selbstkonfigurierend verwalten. Die Integration des IoT in die Cloud bietet zahlreiche Vorteile. Die Cloud ermöglicht effektive Kommunikation und Datenfreigabe zwischen Anwendungen und Objekten. Sie bietet eine kostengünstige Lösung für die Speicherung und Verarbeitung der großen Datenmengen, die vom IoT generiert werden. Zudem erweitert sie die Verarbeitungsfähigkeiten des IoT durch unbegrenzte virtuelle Ressourcen. (H. F. Atlam et al., 2017)

Die Integration des Cloud-basierten IoT löst viele Probleme des IoT, wie Heterogenität der Geräte, Skalierbarkeit, Interoperabilität, Sicherheit und Effizienz. Sie bietet neue Fähigkeiten wie Benutzerfreundlichkeit und Zugänglichkeit bei geringen Bereitstellungskosten. Die Vorteile der Integration des IoT in die Cloud sind vielfältig. Sie ermöglicht neue Anwendungen und Dienste, eine effiziente Steuerung von Objekten, die Nutzung von Sensordaten und das Management großer Informationsquellen. Die Cloud bietet eine skalierbare und kostengünstige Lösung für das IoT, und das IoT erweitert die Möglichkeiten der Cloud in neuen realen Szenarien. (H. F. Atlam et al., 2017)

Insgesamt wird die Integration des IoT in die Cloud als Zukunft des Internets und der nächsten Generation von Technologien betrachtet. Die Cloud bietet die notwendige Infrastruktur und Funktionalität, um die Herausforderungen des IoT zu bewältigen und innovative Anwendungen und Dienste zu ermöglichen. Durch diese Integration entstehen neue Möglichkeiten für intelligente Objekte, Datenverarbeitung und umfassende Vernetzung. (H. F. Atlam et al., 2017)

3 GREEN CLOUD COMPUTING

Für den Begriff des Green Cloud Computing gibt es unterschiedliche Definitionen, aber noch keine die sich umfassen in der Wirtschaft bzw. der Wissenschaft durchgesetzt hat. Eine passende Beschreibung erfolgt in „***An Analysis Report on Green Cloud Computing Current Trends and Future Research Challenges“*** demnach handelt sich dabei um die Implementierung von Cloud-Computing-Diensten und -Infrastrukturen unter Berücksichtigung von Umweltaspekten und Nachhaltigkeit. (Patil & Patil, 2019)

Im Werk „***Green Cloud Computing: A Literature Survey***“ wird festgestellt, dass es das Ziel ist, den Energieverbrauch zu reduzieren, erneuerbare Energiequellen zu nutzen, den CO2-Ausstoß zu minimieren und den gesamten ökologischen Fußabdruck von Cloud-Diensten zu verringern. Durch Maßnahmen wie Virtualisierung, dynamische Ressourcenallokation, verbesserte Kühltechniken und effiziente Datenverarbeitungstechnologien trägt Green Cloud Computing dazu bei, die Umweltauswirkungen der IT-Industrie zu minimieren und nachhaltige Geschäftspraktiken zu fördern. (Radu, 2017)

3.1 Taxonomie

Die Sustainable Digital Infrastructure Alliance als europäische Plattform unterschiedlicher Interessensgruppen für eine nachhaltige digitale Wirtschaft stellt als Abstraktionsmodell für die Nachvollziehbarkeit eine eigene Taxonomie zu Verfügung für die Lieferkette von Software bzw. digitalen Dienstleistungen. (Max Schulze, 2023b)

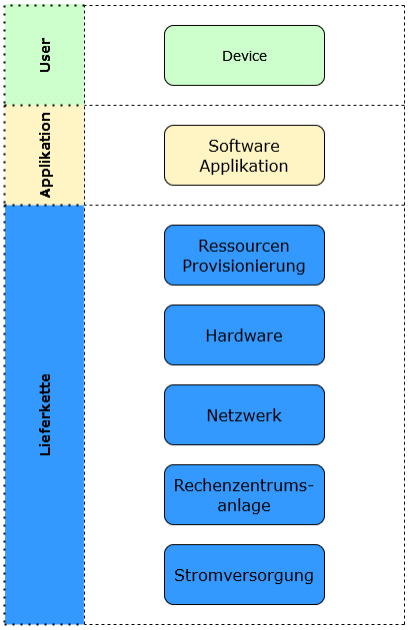


Abbildung 4: Eigene Darstellung der Lieferkette digitale Wirtschaft basierend auf (Max Schulze, 2023b)

Eine mögliche Sichtweise, die auch die Ansicht mit einbezieht und die etwaigen positiven Effekte der Adaption von Cloud Computing und Migration bieten die Studien von AWS, Microsoft und Google. (Daniel Bizo; Microsoft Corporation, 2018)

Im Rahmen von **Green Cloud Computing: A Literature Survey** wird dafür eine einfache Darstellung angeboten um die Auswirkungen zu visualisieren.

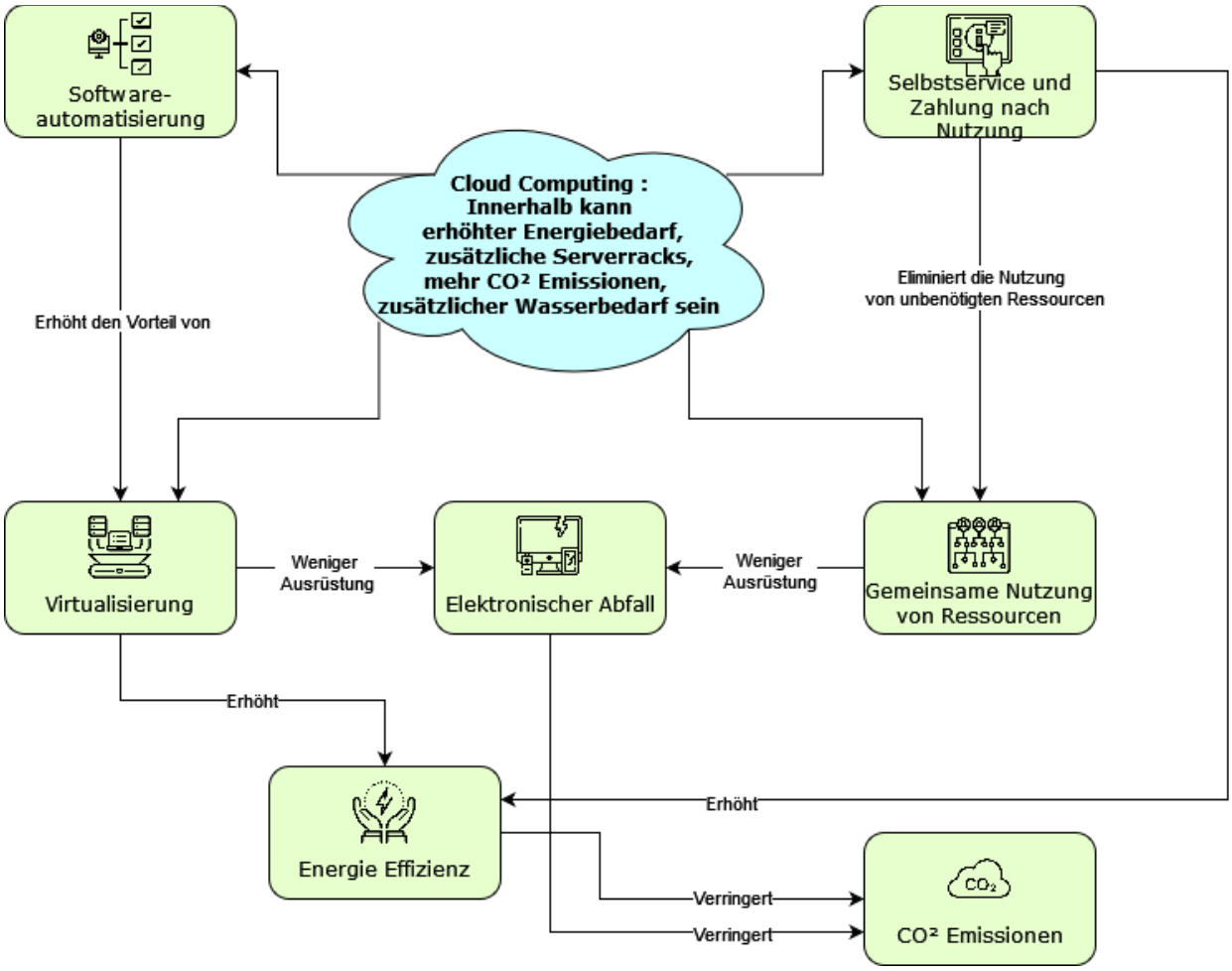


Abbildung 5: Eigene Darstellung Einfluss von Cloud Computing auf die Umwelt basierend auf (Radu, 2017)

In Abbildung 5 sind dabei primär die Vorteile aufgrund von Automatisierung von Aufgabenallokationen, Virtualisierung von Rechenkapazität, sowie die Möglichkeit die benötigten Applikationen bzw. Ressourcen selbst zu dimensionieren. Durch die gemeinsame Nutzung der Ressourcen von Rechenzentren gibt es geringere Phasen mit Leerzeiten und damit eine optimale Nutzung der vorhandenen Kapazitäten. (Aarthee, 2017; G. K. Sriram, 2022; Radu, 2017)

Für den Rahmen dieser Arbeit und die Verwendung als Kategorie für den methodischen Teil innerhalb der systematischen Literaturrecherche werden die vom SDIA dargestellten Kategorien übernommen, um eine Einteilung der wissenschaftlichen Literatur zu ermöglichen.

3.2 Charakteristika

Aufgrund des Fehlens einer von Cloud Computing und Rechenzentren losgelösten Definition von Green Cloud Computing müssen die Parameter die bereits in Kapitel 1 und 2 Parameter weiterhin verwendet werden. Für eine darüber heraus gehende Klassifikation von spezifischen Charakteristika wird im Rahmen dieser Masterarbeit das Modell aus ***An Analysis Report on Green Cloud Computing Current Trends and Future Research Challenges*** und ***GREEN CLOUD COMPUTING: AN APPROACH TOWARDS SUSTAINABILITY*** übernommen. Dabei werden für Green Cloud Computing die Parameter Energie Effizienz, Virtualisierung, Multitenancy, Konsolidierung sowie ökologische Verträglichkeit als essenziell definiert. (G. K. Sriram, 2022; Patil & Patil, 2019)

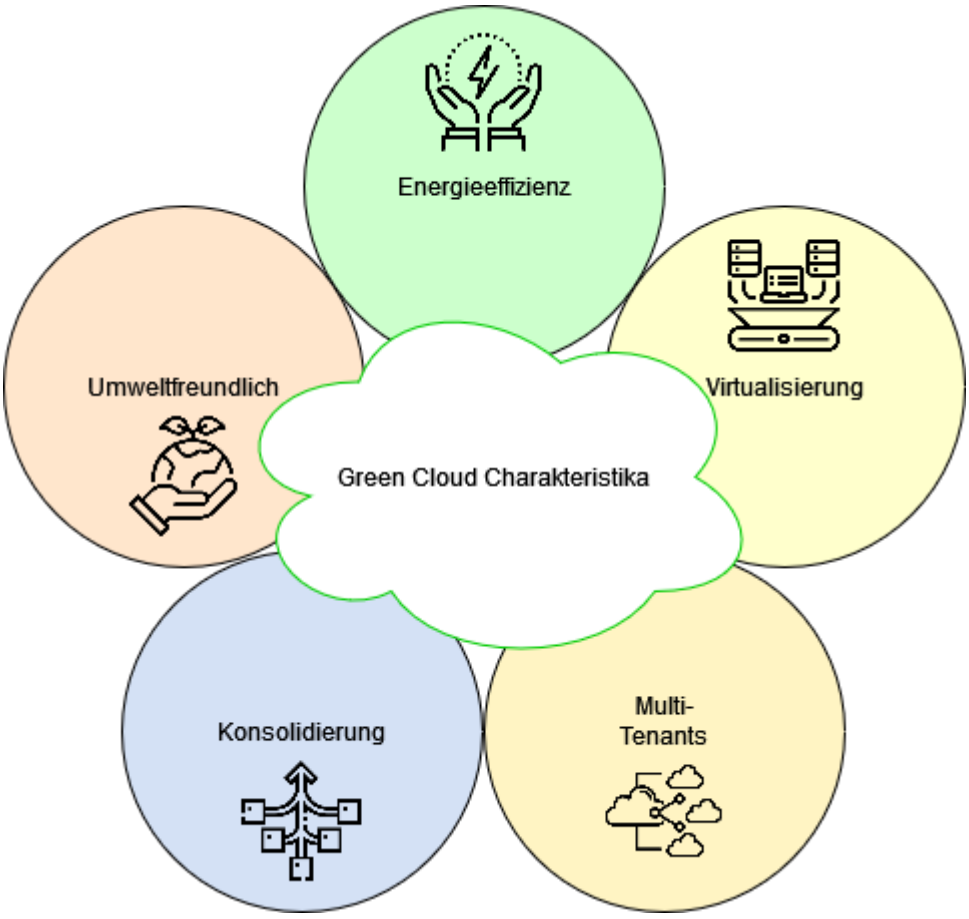


Abbildung 6: Eigene Darstellung Green Cloud Charakteristika basierend auf (Patil & Patil, 2019)

Die in Abbildung 6 dargestellten Charakteristika werden dabei wie folgt beschrieben:

- **Energieeffizienz**: Im grünen Cloud-Computing steht Energieeffizienz im Mittelpunkt, wobei Techniken des Energiemanagements auf verschiedenen Ebenen der Cloud-Objekte angewendet werden, um den Stromverbrauch zu minimieren. Forschungen konzentrieren sich auf dynamische Energiemanagementsysteme, die Cloud-Ressourcen basierend auf Bedarf aktivieren, überschüssige Energie erkennen und korrigieren, sowie Entscheidungsalgorithmen und Komponentenoptimierung für einen effizienten

Ressourcenenergieverbrauch entwickeln. (G. K. Sriram, 2022; Lee & Zomaya, 2012; Nedbal, 2012; Patil & Patil, 2019)

- **Virtualisierung**: Virtualisierung hat das Ziel, mehrere virtuelle Computer auf einem einzigen physischen Gerät auszuführen. Diese Technologie, die bereits in älteren Großrechnern existierte, ermöglicht die parallele Ausführung verschiedener Aufgaben durch hypervisorbasierte virtuelle Maschinen (VMs). Cloud-Systeme, bestehend aus hochwertigen Komponenten wie RAM, Prozessoren und Festplatten, verwenden diese Virtualisierung, um sequenzielle Verarbeitungsbeschränkungen zu überwinden. Forschungen im Bereich der Cloud-Virtualisierung zeigen, dass die Auswahl des richtigen Hypervisors und die optimale Anzahl gestarteter virtueller Maschinen basierend auf der Arbeitslast entscheidend ist. Diese Virtualisierungstechniken fördern nicht nur eine effiziente Ressourcennutzung, sondern tragen auch zur Reduzierung des Energieverbrauchs und zur Umsetzung umweltfreundlicher Cloud-Infrastrukturen bei. Besonders relevant sind dabei Trends wie das dynamische Ausbalancieren von Arbeitslasten, der Ressourcenaustausch zwischen VMs, das sichere Design von VMs und energieeffiziente Virtualisierungstechniken. (G. K. Sriram, 2022; Muthusamy et al., 2021; Patil & Patil, 2019; Wang et al., 2014; Xiaoying Wang et al., 2017)
- **Multi-Tenants:** Multitenancy ist die Fähigkeit einer Cloud-Instanz, mehreren Mietern derselben Kategorie Dienste anzubieten. Damit werden zusätzliche Investitionen in separate Instanzen vermieden und Ressourcen effizient genutzt. Dieses Konzept, das Anwendungsressourcen auf der SaaS-Ebene und Hardware, sowie Software auf der PaaS-Ebene zwischen verschiedenen Kunden teilt, ist aufgrund von Datenschutz- und Sicherheitsbedenken kontrovers. Aktuelle Forschungsfokussierung liegt auf der sicheren Entwicklung von Multitenancy, Optimierungen in diesem Kontext und Datenschutz beim Zugriff auf Multitenancy-Clouds im Rahmen des Grünen Cloud-Computing. (G. K. Sriram, 2022; Patil & Patil, 2019; M. Xu & Buyya, 2020)
- **Konsolidierung** Konsolidierung ist der Prozess, verschiedene datenverarbeitende Anwendungen von verschiedenen Rechenzentren auf einem einzigen Server mit Virtualisierungstechnologie bereitzustellen. Dieser Prozess zielt darauf ab, Lastenausgleich auf Prozessebene, effizientere Nutzung virtueller Systeme und die Reduzierung des Energieverbrauchs zu ermöglichen. Forschungsarbeiten von Beloglazov und Buyya betonen die Bedeutung dieser Konsolidierung, erläutern Methoden zur dynamischen Konsolidierung von virtuellen Maschinen und schlagen schwellenwertbasierte Ansätze, sowie die dynamische Bestimmung von Schwellenwerten vor. Aktuelle Entwicklungen konzentrieren sich auf Themen wie dynamische Konsolidierung, schwellenwertbasierte Konsolidierung und die Optimierung des Konsolidierungsprozesses im Rahmen des Grünen Cloud-Computings. (Beloglazov & Buyya, 2012; F. Farahnakian et al., 2015; Farahnakian et al., 2015; Tsai & Liao, 2012)
- **Umweltfreundlich**: Im Bereich des Grünen Cloud-Computing steht die Energieeffizienz im Mittelpunkt, um die Umweltauswirkungen der IT-Branche zu minimieren. Green Computing bietet eine umweltfreundliche Lösung, die den Balanceakt zwischen

wirtschaftlichem Wachstum und Umweltschutz bewältigt. Speziell im Kontext von Green Cloud Computing wird darauf geachtet, umweltbelastende Aktivitäten zu minimieren und ökologische Elemente nicht zu stören. Ein Fokus liegt auf der Energieeffizienz, da Energieeinsparungen den Bedarf an umweltschädlicher Energieerzeugung reduzieren. Studien, wie die von Greenpeace, zeigen den CO2-Fußabdruck der Cloud-Technologie und prognostizieren zukünftige Auswirkungen, während Experten wie Nitin Singh Chauhan und Ashutosh Saxena betonen, dass energieeffiziente Softwareentwicklung und Richtlinien für umweltfreundliche Clouds entscheidend sind. Dies reflektiert die aktuellen Trends im Bereich des umweltfreundlichen Green Cloud Computing.

Abschliessend aus den Kapitel 3.1 und 3.2 haben sich damit für die systematische Literaturanalyse damit folgende Kategorien ergeben:

- **Green Cloud Charakteristika**: Energieeffizient, Virtualisierung, Multitenancy, Konsolidierung und umweltfreundlich
- **Digitale Infrastruktur:** Stromversorgung, Rechenzentrumsanalage, Netzwerk, Hardware, Ressourcenprovisionierung, Softwareapplikation

3.3 Green Software Foundation

Zusätzlich zu den in Kapitel 3.2 beschriebenen Charakteristika, gibt es bei der Betrachtung der vom SDIA vorgeschlagenen Lieferkette der digitalen Infrastruktur noch die Elemente der Ressourcenprovisionierung sowie der Softwareapplikationen. Eine Initiative die bereits 54 Mitgliedsorganisationen besitzt unter anderem Microsoft, Accenture, Intel, Avande, Siemens und Github ist die Green Software Foundation. (Green Software Foundation Series et al., 2023b)

3.3.1 Software Carbon Intensity (SCI) und Software Carbon Efficiency Rating (SCER)

Beim SCI handelt es sich ein bereits von Microsoft und anderen Firmen adaptierten Berechnungseinheit, die auch bei Microsoft bereits in dessen Onlinedokumentation aufgenommen wurde. Die SCI-Berechnung erfolgt folgendermaßen:

$$SCI = (E \times I) + M \; pro \; R$$

(E) - Energieverbrauch (Kilowattstunden) für verschiedene Komponenten der Software-Grenze über einen bestimmten Zeitraum. Beispiele:

CPU/GPUs bei unterschiedlicher prozentualer Auslastung

Datenspeicherung

Speicherzuweisung

Über ein Netzwerk übertragene Daten

(I) - Emissionsfaktoren. Dabei kann es sich zunächst um regionale Jahresdurchschnittswerte handeln, idealerweise sollten diese jedoch marginal sein und eine höhere Granularität aufweisen als diese.

(M) - Daten zu verkörperten Emissionen für Server, mobile Geräte und Laptops

(R) - Funktionale Einheit definiert, wie eine Anwendung skalierbar ist. Wenn eine Applikation beispielsweise durch APIs skaliert wird, wäre API die funktionale Einheit dieser Applikation.

Auf der dazugehörigen Website https://sci-guide.greensoftware.foundation/ finden sich Beispiele und detaillierte Beschreibungen für die einzelnen Parameter und zu deren Berechnung. Das SCER befindet sich aktuell noch in der Entwicklung. (Green Software Foundation Series et al., 2023a; *Software Carbon Efficiency Rating · Green-Software-Foundation/scer Wiki · GitHub*, 2023)

Aufgrund des Fokus der Masterarbeit wird der SCI nicht weiterverwendet. Der SCI stellt aber insbesondere mit Blick auf den in Abbildung 4 dargestellten Lieferkette der digitalen Infrastruktur eine wichtige Möglichkeit zu Verbesserung dar.

Der SCI kann auch für die weitere Handlungsempfehlungen, bzw. zusätzliche Masterarbeiten herangezogen werden. Insbesondere für die Implementierung im Rahmen von Zertifizierungen von Rechenzentren und MSP bietet sich damit ein mögliches Werkzeug, für transparente Kundenkommunikation.

Die Green Software Foundation stellt verschiedenste Materialien zur umweltfreundlichen Softwareentwicklung sowie einen eigenen Kurs zu Verfügung. Diese werden aufgrund der Forschungsfrage dieser Masterarbeit nicht weiter behandelt. (Linux Foundation - Training, 2023; *Welcome | Learn Green Software*, 2023)

3.3.2 Plattform Architektur

Sowohl Microsoft als auch die Green Software Foundation bieten verschiedene Software-Patterns bzw. Guidelines für optimale Ressourcennutzung. Die Green Software Foundation unterscheidet dabei in AI, Cloud und Web spezifische Pattern. Microsoft bietet in seiner Plattform spezifische Umsetzungsideen und Varianten an, die für Azure vorgesehen sind. Aufgrund der Kooperation und durch die Mitgliedschaft innerhalb der Green Software Foundation, werden für den Rahmen dieser Masterarbeit die spezifischen Praktiken von Microsoft nicht explizit außer in *Anhang F* angeführt.

Aufgrund der Bedeutung für Green Cloud Computing wird die Kategorie *Cloud* und die dazugehörigen Software- Pattern als Tabelle in der Masterarbeit als Kategorien für die Handlungsempfehlungen übernommen.

Kategorie	Software-Pattern
Cloud	Statische Daten zwischenspeichern
	Wählen Sie die Region, die den Nutzern am nächsten ist.
	Übertragene Daten komprimieren
	Ungenutzte Speicherressourcen löschen
	Beenden von TLS am Grenzübergang
	Implementierung eines stateless Designs
	Passen Sie Ihre SLA-Ziele an die Geschäftsanforderungen an
	Anpassen der Nutzungsanforderungen von virtuellen Maschinen (VMs)
	Minimierung der eingerichteten Cloud Umgebungen
	Optimierung der Speichernutzung
	Optimierung der durchschnittlichen CPU-Auslastung
	Optimierung der Auswirkungen auf Kundengeräten und -ausrüstung
	Optimieren der CPU-Spitzenauslastung
	Nicht dringende Verarbeitungsanfragen in eine Warteschlange stellen (Queue)
	Übertragene Daten reduzieren
	Ungenutzte Assets entfernen
	Verkleinern von Kubernetes-Anwendungen bei Nichtgebrauch
	Skalierung von Kubernetes-Workloads aufgrund von Bedarfsmetriken
	Nach Schwachstellen suchen
	Richtlinien zur Speicheraufbewahrung festlegen
	Datenverkehr mit niedrigerer Priorität auslagern
	Zeitversetzte Kubernetes-Cron-Jobs
	Schutzschaltermuster verwenden
	Verwendung von cloudbasierten Netzwerksicherheitstools und -kontrollen
	Serverlose Cloud-Dienste nutzen

Tabelle 3: Eigene Darstellung basierend auf (Joint Development Foundation Projects, LLC, Green Software Foundation Series, 2023)

Der Tabelle 3 kann entnommen werden, dass ein Großteil der Maßnahmen sich mit den Charakteristika von Green Cloud deckt und insbesondere im Rahmen der Virtualisierung und Nutzung der VMs, Speicherressourcen und der Netzwerknutzung fokussiert.

3.3.3 Cloudbasierte Monitoring Maßnahmen

Für die Handlungsempfehlungen ist es notwendig einen kurzen Überblick über vorhandene etwaige Monitoringtools und Maßnahmen innerhalb der Cloud zu erstellen. Die Greensoftware Foundation bietet dafür eine umfassende Collection innerhalb eines Githubrepositories zu

Verfügung unter: https://github.com/Green-Software-Foundation/awesome-green-software (GitHub, 2023)

Es werden dort verschiedene Kategorien wie Cloud, OS, Web und Softwareentwicklung zu Verfügung gestellt um verschiedene Monitoringmaßnahmen umzusetzen. Weitere Beispiele für Monitoringmaßnahmen wäre beispielsweise greenpixie. Insbesondere die SDIA bietet mit dem Digital Enviroment Footprint, verschiedenste Materialien online an und evaluiert diese auch regelmäßig bzw. bezieht sich auf neueste wissenschaftliche Literatur. (Greenpixie, 2023; Sustainable Digital Infrastructure Alliance e.V)

Für den Rahmen dieser Masterarbeit muss aber das Monitoring aufgrund der Bandbreite, die in verschiedenen Bereichen vorhanden ist, ausgeklammert werden.

3.4 Bewertungsmethodik Green Cloud Computing (GCC) des Umweltbundesamtes

Das Projekt **Green Cloud Computing (GCC)**, des Umweltbundesamtes hatte die Zielsetzung die Effizienzkennzahlen (KPI4DCE – Key Performance Indicators for Data Centre Efficiency) weiterzuentwickeln und darauf aufbauend eine neue Methodik zu entwickeln. Es werden dieselben vier Parameter des KPI4DCE übernommen. (Jens Gröger et al., 2021)

Im Abschlussbericht wird die Zielsetzung und Differenzierung folgendermaßen beschrieben (Jens Gröger et al., 2021, S. 42):

> *Bei KPI4DCE handelt es sich um Effizienzkennzahlen, da der Nutzen des Rechenzentrums auf den Aufwand bezogen wird.*
>
> *Bei der GCC-Methodik werden dagegen Aufwandskennzahlen gebildet.*

3.4.1 Unterschiede & Gemeinsamkeiten zu KPI4DCE

Die Methoden KPI4DCE und GCC erfassen beide den Umweltaufwand der Herstellung von IT-Komponenten im Rechenzentrum, indem sie Daten zu Anzahl und technischen Parametern der Informationstechnik (Server, Storage und Netzwerk) sowie zu Energie- und Stoffströmen in der Nutzungsphase des Rechenzentrums erheben. Der Umweltaufwand wird als Abiotischer Rohstoffverbrauch (ADP), Treibhausgaspotenzial (GWP), Kumulierter Energieaufwand (CED) und Wasserverbrauch berechnet: (Jens Gröger et al., 2021, S. 35–42)

- **KPI4DCE**: Berechnet Umweltaufwand basierend auf Rechenzentrumsinfrastruktur (Server, Speicher, Netzwerk).
- **GCC**: Ordnet bereitgestellte Dienste (z.B., Videostreaming) den genutzten Rechenzentrumsressourcen zu, beschreibt den Umweltaufwand pro erbrachter Serviceeinheit.

3.4.2 Cloud Computing Service Einheiten

Im Rahmen des Green Cloud Computing Projektes wurde als Bezugsgrößen sogenannte „Serviceeinheit" gewählt. Diese sollen abhängig vom Service-Modell, eine verständliche Größe bieten für die Messung von Cloud-Services: (Jens Gröger et al., 2021, S. 45–46)

- **IaaS**: Anzahl von Servern, Speicherkapazität, Netzwerkbandbreite, Rechenoperationen oder Fläche im Rechenzentrum.
- **PaaS**: Anzahl von Kundenkonten, Dateneinheiten, Nutzungsdauer oder spezifische Service-Anforderungen.
- **SaaS**: Anzahl von Softwarelizenzen, Speicherplatz, Netzwerkzugriffe oder Nutzungsdauer.

Für IaaS können oft die KPI4DCE-Kennzahlen verwendet werden. Bei PaaS und SaaS hängt die Wahl der Serviceeinheit von den spezifischen Dienstleistungen und Geschäftsmodellen ab. Aufgrund der Fokussierung dieser Masterarbeit auf Handlungsempfehlungen für Rechenzentrumsbetreiber können damit primär weiterhin mit den KPI4DCE Kennzahlen gearbeitet werden. (Jens Gröger et al., 2021, S. 45–46)

3.4.3 Allokationsregeln

Jens Gröger et al. beschreiben im Green Cloud Computing Abschlussbericht, die Notwendigkeit eine Zuordnung respektive Allokation des Ressourcenverbrauch einzelner Dienstleistungen von Rechenzentren. Die Autoren beziehen sich dabei auf die DIN EN ISO 14044:2021-02 bei der Erstellung und Parameter der Allokationsregeln. (; Jens Gröger et al., 2021)

Sie präsentieren dabei drei Varianten zur Allokation mit Beispielen:

- Allokation der Umweltwirkungen auf Cloud Services anhand der Nutzung des Teilbereichs des Rechenzentrums
- Allokation der Umweltwirkungen auf Cloud Services
- Allokation über virtuelle Ressourcen

Danach beschreiben die Autoren noch kurz „Container as a Service“ und „Function as a Service“. (Jens Gröger et al., 2021, S. 48–52) Das Ergebnis ist in Tabelle 4 aufgelistet:

GCC-Bezeichnung	Einheit	Benennung zur Kommunikation der Kennzahl
GCC-Service nADP	kg Sb eq./su	Rohstoffverbrauch pro Serviceeinheit
GCC-Service nGWP	kg CO2 eq./su	CO^2-Fußabdruck pro Serviceeinheit
GCC-Service nCED	MJ/su	Energieverbrauch pro Serviceeinheit
GCC-Service nWater	m^3/su	Wasserverbrauch pro Serviceeinheit

Tabelle 4: Eigene Darstellung Green Cloud Computing Kennzahlen für unterschiedliche Umweltwirkungen basierend auf (Jens Gröger et al., 2021, S. 53)

4 GREEN CLOUD DATACENTER

Die Thematik der nachhaltigen Entwicklung der digitalen Wirtschaft sowie der dafür notwendigen Rechenzentren bzw. Datacenter wird aktuell im deutschsprachigen Raum durch das deutsche Umweltbundesamt im Rahmen von KPI4CDE 2.0 untersucht. (Umweltbundesamt, 2023). Hierbei handelt es sich um das Folgeprojekt von KPI4CDE (Key-Performance-Indikatoren für Rechenzentrumseffizienz), das vom deutschen Umweltbundesamt gemeinsam mit einem Konsortium unter der Leitung des Business Engineering Institute St. Gallen eine Berechnungsmethode zu Ermittlung der Energie- und Ressourceneffizienz eines Rechenzentrums entwickelt hat. Für den Rahmen dieser Masterarbeit wird aufgrund der Aktualität, der Breite der verwendeten Forschungsmethoden, sowie des Ansatzes den gesamten Lebenszyklus der zum Einsatz kommenden IT und der technischen Versorgungsstruktur mit einzubeziehen, die Parameter des Abschlussberichtes verwendet und nur durch neuere Literatur nach 2018 ergänzt. Eine weitere aktuelle Initiative für eine nachhaltige digitale Infrastruktur die verschiedensten Bereiche bearbeitet. ist die „*Sustainable Digital Infrastructure Alliance*“. (Max Schulze, 2023a)

Im Rahmen dieses Kapitels werden die vorhandenen Zertifizierungen für Rechenzentren in Österreich und Deutschland mit Spezialisierung auf Nachhaltigkeit vorgestellt. Vorhandene Initiativen der Marktführenden Cloudanbieter, sowie die Parameter für die KPI4CDE präsentiert. Diese Parameter, sowie die Einteilungen der „*Sustainable Digital Infrastructure Alliance*“,, stellen die Grundlage für die erfolgende Kategorisierung im Theorieteil dar.

4.1 Zertifizierungen und Normen

In der Bundesrepublik gibt es seit 2022 die Zertifizierung Blauer Engel DE-UZ 228 in dem die bisherigen Umweltzeichen „Energieeffizienter Rechenzentrumsbetrieb" (DE-UZ-161) und „Klimaschonende Co-Location-Rechenzentren“ (DE-UZ 214) zusammengeführt werden. (Blauer Engel, 2023) Entsprechend den Vergabekriterien werden dabei jene Betreiber ausgezeichnet, (Blauer Engel, 2023, S. 5–6):

- *deren technische Gebäudeausrüstung (TGA) besonders energieeffizient und ressourcenschonend betrieben wird,*
- *deren Betreiber eine langfristige Strategie zur Erhöhung der Energie- und Ressourceneffizienz für das Rechenzentrum erarbeiten und erfolgreich umsetzen*
- *die ihre Kunden in die Lage versetzen, Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz umzusetzen*

- *und die durch garantierte Mindeststandards und transparente Berichterstattung die Voraussetzung für IT-Betreiber schaffen, Informationstechnik energieeffizient zu betreiben.*

Das österreichische Äquivalent zum Blauen Engel ist das österreichische Umweltzeichen „Klimaschonende Colocation-Rechenzentren“ - Richtlinie UZ 80. (Österreichisches Umweltzeichen, 2021)

Beide Zertifizierungen bedienen sich eines Anforderungskatalog an die Antragssteller. Der Blaue Engel differenziert dabei aber bereits genauer zwischen Rechenzentrumsbetreiber und Rechenzentrumsdienstleister. Beide Zertifizierungen fokussieren Ihren Anforderungskatalog auf Gebäudetechnik, Energieeffizienz, Monitoringmaßnahmen für Energie, Klima und Wassernutzung, Inventarisierung und Effizienz der verwendeten IT-Systeme, deren Auslastung, sowie den Kühlsystemen. Beide Zertifizierungen sehen zudem Maßnahmen bzw. Beratungsangebote für Energieeffizienz vor. (Blauer Engel - Das Umweltzeichen, Erstausgabe 2023; Österreichisches Umweltzeichen, 2021).

4.1.1 EN 50600 Serie und ISO/IEC 2237 Serie

Die EN50600 wurde bereits 2012 entwickelt und erweitert die ISO/IEC 2237 hat große Teile davon übernommen und steht seit 2021/2022 zu Verfügung. Beide Normen haben eine hohe Überschneidungsmenge und dienen dazu eine Zertifizierung von Rechenzentren zu ermöglichen. Die EN geht zudem auch bereits auf Kennzahlen zu erneuerbarer Energie, Leistung und eingesetzten Energie ein.

Die ISO/IEC 22237 Serie soll aber gemeinsam mit der ISO/IEC 30134 Serie eingesetzt werden, die spezifischer auf diese Themen eingeht und diese auch mit den Fokus der Nachhaltigkeit analysiert und in eigenen Teilen der Serie bearbeitet. Nachfolgend eine tabellarische Aufstellung der Überschneidungen der beiden Normen:

ISO/IEC Teil	EN 50600 Teil
ISO/IEC 22237-1: Allgemeine Konzepte (International Organization for Standardization, Oktober.2021a)	EN 50600-1: Allgemeine Aspekte für die Konstruktion und Spezifikation
ISO/IEC TS 22237-2: Gebäudekonstruktion (International Organization for Standardization, Mai.2015)	EN 50600-2-1: Gebäudekonstruktion
ISO/IEC 22237-3: Stromversorgung (International Organization for Standardization, Oktober.2021b)	EN 50600-2-2: Stromversorgung
ISO/IEC 22237-4: Regelung der Umgebungsbedingungen (International Organization for	EN 50600-2-3: Regelung der Umgebungsbedingungen

Standardization, Oktober.2021c)	
ISO/IEC TS 22237-5: Infrastruktur der Telekommunikationsverkabelung (International Organization for Standardization, Mai.2018a)	EN 50600-2-4: Infrastruktur der Telekommunikationsverkabelung
ISO/IEC TS 22237-6: Sicherungssysteme (International Organization for Standardization, Mai.2018b)	EN 50600-2-5: Sicherungssysteme
ISO/IEC TS 22237-7: Informationen für das Management und den Betrieb (International Organization for Standardization, Mai.2018c)	EN 50600-3-1: Informationen für das Management und den Betrieb

Tabelle 5: Eigene Gegenüberstellung ISO 22237 und EN50600 Norm

Die ISO/IEC 22237 Serie soll dabei aber gemeinsam mit der ISO/IEC 30134 Serie eingesetzt werden.

4.1.2 ISO/IEC 30134 Serie

Die ISO/IEC 30134 Serie soll für Rechenzentren einen internationalen Standard von Kennzahlen ermöglichen. Diese Kennzahlen haben den spezifischen Fokus der Optimierung der laufenden Operationen und nicht des Designs des Rechenzentrums. Daher sollte die ISO/IEC 30134 Serie in Kombination mit der ISO/IEC 22237 Serie die sich auf den Design Aspekt spezialisiert gemeinsam zum Einsatz kommen. Folgende Teile bzw. Kennzahlen werden in der ISO /IEC 30134 Serie definiert:

- **ISO/IEC 30134-1:2016 Überblick und allgemeine Anforderungen**: Definiert für die folgenden Teile der Serie die Struktur, Definitionen, Terminologie und Randbedingungen sowie gemeinsame Anforderungen und Ziele an die nachfolgenden Kennzahlen (International Organization for Standardization, März.2016a)
- **ISO/IEC 30134-2:2016 Stromverbrauchseffektivität (PUE):** In diesem Teil der Serie wird Stromverbrauchseffektivität (PUE) eines Rechenzentrums definiert sowie die damit einhergehenden Berechnungsmethoden und Maßnahmen. (International Organization for Standardization, März.2016b)
- **ISO/IEC 30134-3:2016 Faktor für erneuerbare Energien (REF)**: beschreibt die Methode zur Definition, Berechnung und Darstellung des erneuerbaren Energieanteils eines Rechenzentrums sowie Informationen zur korrekten Auslegung dieses Anteils. (International Organization for Standardization, 2016)

- **ISO/IEC 30134-4:2017 Energieeffektivität von IT-Ausrüstung für Server (ITEEsv):** legt den Energieeffizienz-Performance-Indikator (KPI) für Informationstechnologie-Equipment für Server (ITEEsv) fest, um die energieeffizienten Eigenschaften von Servern in einem Rechenzentrum zu quantifizieren und damit die Gesamteffizienz der Server in Rechenzentrum zu verbessern. (International Organization for Standardization, Oktober.2017)
- **ISO/IEC 30134-5:2017 IT-Ausrüstungsnutzungsgrad für Server (ITEUsv):** spezifiziert die IT-Equipment-Nutzung für Server (ITEUsv) als wichtigen Leistungskennwert (KPI), um die Auslastung von Servern in einem Rechenzentrum zu quantifizieren, und dient als Kennzahl zur Verbesserung der Gesamteffizienz von Servern in einem bestimmten Rechenzentrum. (International Organization for Standardization, 2017a)
- **ISO/IEC 30134-6:2021 Energie-Wiederverwendungs-Faktor (ERF):** Dieser Teil der Serie legt den Energie-Wiederverwendungsfaktor (ERF) als Leistungskennzahl fest, um die Wiederverwendung der im Rechenzentrum verbrauchten Energie zu quantifizieren, wobei der ERF als Verhältnis der wiederverwendeten Energie zur Gesamtenergie, die im Rechenzentrum verbraucht wird, definiert wird; dabei spiegelt der ERF die Effizienz des Wiederverwendungsprozesses wider, der nicht Teil des Rechenzentrums ist (International Organization for Standardization, 2021)
- **ISO/IEC 30134-7:2023 Kühleffizienz-Verhältnis (CER)**: Dieses Dokument spezifiziert das Kühlungseffizienzverhältnis (CER) als Leistungskennzahl (KPI) zur Quantifizierung des effizienten Einsatzes von Energie zur Temperaturregelung in Räumen innerhalb eines Rechenzentrums (DC). Es definiert das CER eines Rechenzentrums, beschreibt die Beziehung dieses KPI zu Infrastruktur, IT-Ausrüstung und IT-Betrieb des Rechenzentrums, legt Messung, Berechnung und Berichterstattung des Parameters fest und bietet Informationen zur korrekten Interpretation des CER. Die Anhänge beschreiben die Korrelation des CER mit anderen KPIs, geben Beispiele für die Verwendung des CER, führen Parameter ein, die das CER beeinflussen, und beschreiben Anforderungen und Empfehlungen für Derivate von KPIs, die mit dem CER verbunden sind. Das Dokument ist nicht anwendbar auf Kühlungssysteme, die nicht elektrisch betrieben werden (z. B. wärmegetriebene Absorptionskältemaschinen). (International Organization for Standardization, März.2023)
- **ISO/IEC 30134-8:2022 Effektivität der Kohlenstoffnutzung (CUE):** Dieses Teil der Serie spezifiziert den Kohlenstoffnutzungseffektivitätsfaktor (CUE) als Leistungskennzahl (KPI) zur Quantifizierung der CO2-Emissionen eines Rechenzentrums während der Nutzungsdauer des Rechenzentrumslebenszyklus. CUE ist eine einfache Methode zur Berichterstattung über die CO2-Intensität des Rechenzentrumsbetriebs und ermöglicht die Darstellung des Beitrags des Rechenzentrums zum Klimawandel (verstärkter Treibhauseffekt). Dieser Teilstandard definiert den CUE eines Rechenzentrums, führt Messkategorien für CUE ein, beschreibt die Beziehung dieses KPI zur Infrastruktur, IT-Ausrüstung und IT-Betrieb des Rechenzentrums, legt Messung, Berechnung und Berichterstattung des Parameters fest

und bietet Informationen zur korrekten Interpretation des CUE. (International Organization for Standardization, März.2022a)

- **ISO/IEC 30134-9:2022 Wasserverbrauchseffizienz (WUE):** Dieses Dokument spezifiziert den Wassernutzungseffektivitätsfaktor (WUE) als Leistungskennzahl (KPI) zur Quantifizierung des Wasserverbrauchs eines Rechenzentrums während der Nutzungsdauer des Rechenzentrumslebenszyklus. WUE ist eine einfache Methode zur Berichterstattung über die Wasserintensität des Rechenzentrum-Betriebs und ermöglicht die Darstellung der Ressourceneffektivität des Rechenzentrums. Das Dokument definiert den WUE eines Rechenzentrums, führt Messkategorien für WUE ein, beschreibt die Beziehung dieses KPI zur Infrastruktur, IT-Ausrüstung und IT-Betrieb des Rechenzentrums, legt Messung, Berechnung und Berichterstattung des Parameters fest und bietet Informationen zur korrekten Interpretation des WUE. (International Organization for Standardization, März.2022b)

Aufgrund der Aktualität sowohl der ISO/IEC 30134 sowie der ISO/IEC 22237 Serie werden diese beiden für die Kategorisierung der Ergebnisse der Literaturrecherche herangezogen.

4.2 Maßnahmen der Marktführer

Globale Unternehmen im Bereich digitaler Produkte und Dienstleistungen betonen den primären Umwelteinfluss durch Energieverbrauch und empfehlen den Einsatz von grüner Energie als Hauptmaßnahme. (Google Sustainability, 2023; Microsoft News Centre Europe, 2023; *Official Google Blog: Powering a Google search*, 2023) Unternehmen wie Amazon, Meta und Microsoft gehören zu den Vorreitern beim Abschluss von Verträgen für erneuerbare Energien. (BloombergNEF, 2022)

Im Rahmen der europäischen Forschung des CEDaCI- sowie des deutschen KPI4CDE-Projekts wird die Gesamtauswirkungen der digitalen Infrastruktur betrachtet. Dabei sind nicht nur der direkte Energieverbrauch, sondern auch der CO2-Fußabdruck und der Ressourcenverbrauch, die mit dem Bau von Rechenzentren und der Herstellung der verwendeten Hardware verbunden sind, wenn das Gesamtbild der Umweltauswirkungen betrachtet wird. (CEDaCI, 2023; Umweltbundesamt, 2023) Im weiteren Zuge dieses Kapitels sollen die Maßnahmen von Amazon AWS als Marktführer, Microsoft und Google Cloud, betrachtet werden da diese 3 Anbieter knapp 2/3 des Gesamtmarkts der Cloudanbieter für IaaS und PaaS bedienen. (Haranas, 2023; Richter, 2023)

Im Rahmen dieser Masterarbeit erfolgt keine kritische Evaluation der von dem Marktführer publizierten Maßnahmen und des Umsetzungsgrades der einzelnen Maßnahmen.

4.2.1 Amazon

Amazon stellt einen spezifischen Bereich für seinen Cloudservice online zu Verfügung, in dem sowohl der prozentuelle Einsatz der erneuerbaren Energiequellen pro Region aufgelistet wird,

sowie die Bedeutung der Reduktion des CO^2 Ausstoßes durch die Migration in die AWS-Cloud. Hierfür verwendet Amazon als Argumentationshilfe eine beauftragte Studie ***The Carbon Reduction Opportunity of Moving to AWS*** durch 451 Research durchgeführt (Daniel Bizo). Amazon stellt zudem verschiedene Unterseiten mit darüber hinausgehenden Informationen wie Water Stewardship und Renewable Energy zu Verfügung. (Amazon - Sustainability, 2023b, 2023c)

Auf der primären Seite „The Cloud“ erwähnt Amazon spezifisch die Maßnahmen, die getroffen werden, um die indirekten Emissionen zu reduzieren, die beim Bau von AWS-Rechenzentren und der Herstellung der benötigten Hardware entstehen. Als Maßnahmen listet dabei Amazon die Verwendung von CO^2 reduzierten Beton und Stahl, die Zusammenarbeit mit den Lieferanten für die Hardware für AWS-Rechenzentren, sowie die Verwendung nachhaltiger Brennstoffe für die Notfallgeneratoren. (Amazon - Sustainability, 2023a)

Amazon stellt zudem einen jährlichen Sustainability Report zu Verfügung. In diesem Bericht wird spezifisch auf den Service AWS eingegangen und in unterschiedlichen Kapiteln behandelt. (Amazon)

4.2.2 Microsoft

Auch Microsoft stellt einen Sustainability Report zu Verfügung sowie eine eigene Website für die Maßnahmen, die im Rahmen der Rechenzentren getroffen werden. (Microsoft) Wie der Marktbegleiter Amazon wurde durch Microsoft eine Studie „The carbon benefits of cloud computing“ durchgeführt, dass eine Migration in die Microsoft Cloud zu Reduktion des CO^2 Austoßes führt. (Microsoft Corporation, 2018)

Microsoft im Gegensatz zu Amazon führt nicht explizit Maßnahmen für die Reduktion der indirekten Emissionen an, sondern bezieht sich bei seinen Reduktionsmaßnahmen direkt auf das Greenhouse Gas Protocol und den darin enthaltenen Reportingstandard für Unternehmen. Es übernimmt daraus die Scopes 1-3 für die Bewertung des Ausstoßes von Treibhausgases diese für Cloud Anbieter adaptiert würden entsprechend folgendermaßen nach Microsoft aussehen (Walsh; World Business Council for Sustainable Development & World Resources Institute, 2004):

Scope 1: Dies umfasst direkte Emissionen, die aus den Hauptgeschäftsprozessen resultieren, wie z.B. die stationäre Verbrennung von Brennstoffen zur Notstromerzeugung in Cloud-Rechenzentren.

Scope 2: Hierbei handelt es sich um indirekte Emissionen aus der Energieerzeugung, beispielsweise Abgase aus einem Elektrizitätskraftwerk, die für die Geschäftsaktivitäten entstehen.

Scope 3: Diese Kategorie umfasst indirekte Emissionen aus allen anderen Geschäftsprozessen, einschließlich der vorgelagerten Gewinnung von Rohstoffen, der Produktion und der Lieferung von Cloud-basierter IT-Infrastruktur wie Servern von Zulieferern für den Einsatz in den Cloud-Rechenzentren. Hierzu gehören auch Emissionen, die bei

Kreislaufwirtschaftspartnern während des Recyclingprozesses und der Entsorgung von IT-Hardware für die Wiederverwendung entstehen.

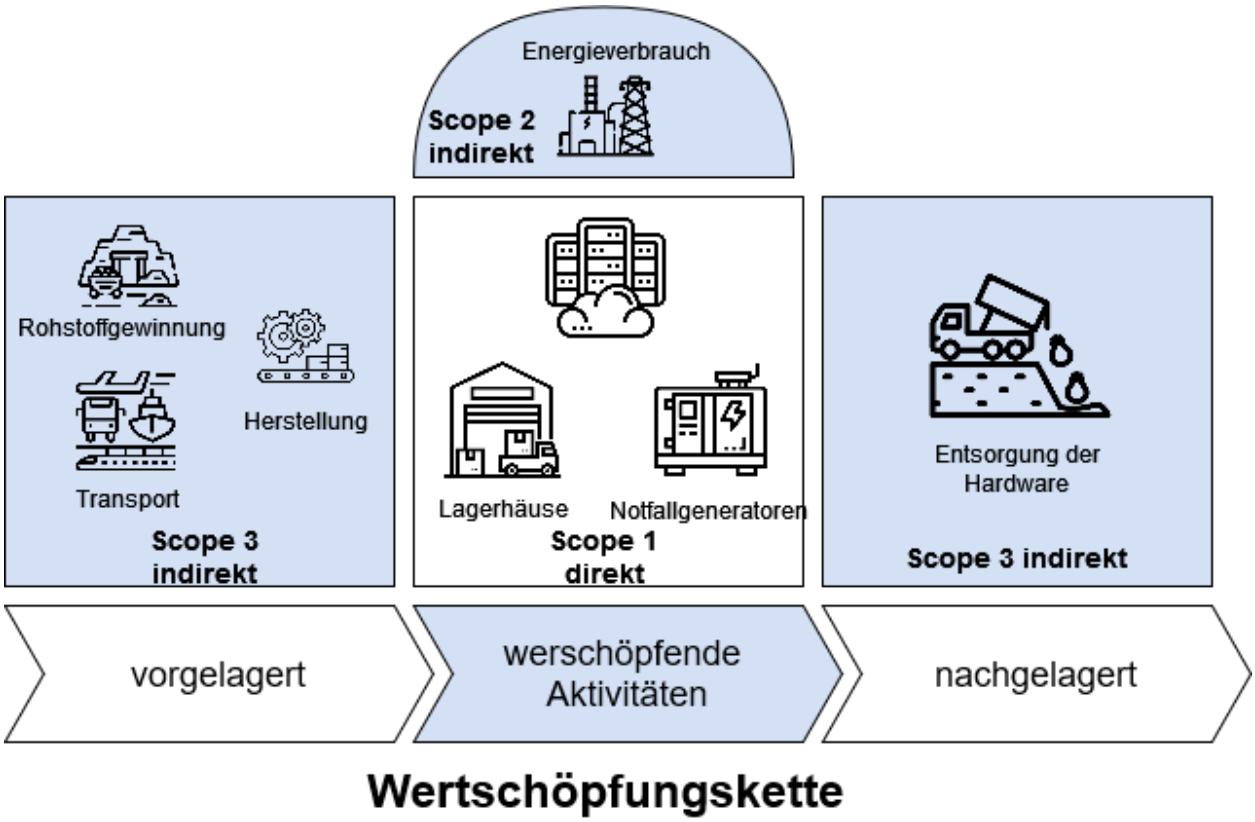


Abbildung 7: Eigene Darstellung mit Icons von Flaticon.com der Scopes entlang der Wertschöpfungskette basierend auf (Walsh, S. 12)

Insbesondere für die Maßnahmen im Scope 3 erstellt Microsoft auch eine eigene Publikation, in dem sowohl die Maßnahmen von Microsoft beschrieben werden sowie Möglichkeiten für die Reduktion des Scope 3 von den Firmenkunden der Microsoft Azure Cloud. (Walsh)

Microsoft bietet darüber hinaus innerhalb seines Dokumentationsbereiches seinen Cloudkunden verschiedenste Unterlage für die Implementierung von Nachhaltigen Umsetzungsmaßnahmen und für die Messung und Reduktion der einzelnen Scopes. Ein weiterer Benefit, den Microsoft seinen Kunden zu Verfügung stellt sind der Microsoft Sustainability Manager, ein Beispiel Modell für die Bewertung der CO2-Effizienz einer Anwendung sowie im Rahmen des Microsoft Azure Well-Architected Framework einen gesamten Bereich der gemeinsam mit der Green Software Foundation geplant wurde für die Optimierung von Azure-Workloads. Dort werden den Kunden verschiedenen Untersektionen zum Thema ***Dokumentation zu Nachhaltigkeitsworkloads*** Kunden zu Verfügung gestellt (Andrea et al., 2023; Paola Annis & Jennifer Wagman, 2023; Tobias Zimmergren, 2023)

4.2.3 Google

Google bietet eine im ähnlichen Format wie Microsoft und Amazon eigene Website an, die fokussiert ist auf Nachhaltigkeit. Es gibt dabei 4 Subsektionen (Sustainability, 2023):

- *Empowering Individuals:* Dieser Bereich legt das Augenmerk auf die Endnutzer der verschiedenen Google Produkte und in wie weit diese für die persönliche Reduktion des ökologischen Fußabdrucks genutzt werden können. Dieser Bereich wird aufgrund des Fokus „Green Cloud Computing“ im Rahmen dieser Masterarbeit nicht weiter behandelt.
- *Working Together:* Hier bietet Google primär Analysetools für Firmen an um den CO^2 Ausstoß zu analysieren, Optimierung von Solarenergie, Vorhersagen von Waldbränden und Flutkatastrophen. Auch dieser Bereich wird bis auf die Ausnahme der Google Cloud Ready – Sustainability Initiative für die Masterarbeit nicht genauer analysiert. (Google Cloud Blog, 2023)
- *Operating sustainably:* Entsprechend der Marktbegleiter bekennt sich auch Google zu einer Net-Zero Emissionspolitik, macht beim Wasser Stewardshipprogramm mit und übernimmt Ansätze betreffend der Kreislaufwirtschaft.
- *Reports:* Hier finden sich unterschiedliche Reports und Case Studies die Google zu Verfügung stellt. Insbesondere der jährliche Environmental Report 2022 sind dabei für die Betrachtungen innerhalb dieser Masterarbeit relevant.

4.2.4 Kritische Betrachtung

Ausgehend von der Analyse der von den Firmen zu Verfügung gestellten Materialen, beauftragten Studien sowie Tools, Best Practices sowie verschiedenen Methoden, ist erkennbar, dass die drei Marktführer alle ähnlichen Maßnahmen und Praktiken umgesetzt haben, bzw. auf Ihrer Agenda haben. Diese sind beeinflusst durch die unterschiedlichen zusätzlichen Geschäftsfelder bzw. wertschöpfenden Aktivitäten. Microsoft legt zusätzlichen Wert auf Softwareentwicklung und den SCI. Google betont verstärkt die Möglichkeiten von Datascience und Reporting und Amazon hat aufgrund der eignen Erfahrung mit Logistikoptimierungen auch diesen Bereich verstärkt im Fokus.

Für den Rahmen der Masterarbeit und den nachfolgenden Methodikteil werden die Maßnahmen der drei Marktführer die in den aktuellen Reports sowie Webseiten definiert werden nicht als Bewertungskriterium herangezogen.

4.3 KPI4DCE und KPI4DCE 2.0

Das deutsche Umweltbundesamt hat, mit dem im Jahr 2018 erschienen Endbericht zum KPI4DCE Projekt, auch ein Mess- und Bewertungsmodell und Tool für Rechenzentren zu Verfügung gestellt. Das Nachfolgeprojekt KPI4DCE 2.0 das Best Practices zu Verfügung stellen soll, ist zum Zeitpunkt dieser Masterarbeit noch nicht fertiggestellt. Die definierten Parameter und Messgrößen des KPI4DCE Projektes sollen als weiterer Faktor für die Einordnung der Ergebnisse der Literaturanalyse nach Brooke et.al genutzt werden. Der KPI4DCE Abschlussbericht stellt dazu folgendes fest (Björn Schödwell et al., 2017, S. 22) :

In Rechenzentren gibt es viele Möglichkeiten, die ökologische Bilanz zu verbessern. Der erste Schritt ist, den aktuellen Zustand zu erfassen und zu bewerten. Einige Kennzahlen und Indikatoren gibt es bereits, teilweise sind sie in der Praxis schon etabliert. Die bisherigen Ansätze berücksichtigen aber nur die Nutzungsphase. Die Herstellung und Entsorgung der IT und der Gebäudetechnik werden nicht erfasst. Viele der Kennzahlen sind zudem nicht Outputorientiert, d. h. sie nehmen keinen Bezug auf die geleistete Arbeit des Rechenzentrums. Ihre Aussagekraft ist daher beschränkt. Auch sind die Messmethoden und Datengrundlagen oft noch unausgereift.

Im Rahmen dieser Masterarbeit wird aufgrund der nachvollziehbaren Auswahlkriterien für die Erstellung und Entwicklung der Kennzahlen, auf diese im Rahmen der Literaturanalyse zurückgegriffen. Die verschiedenen Bewertungsmechanismen für den Verbrauch abiotischer Ressourcen sowie umfassenden Betrachtung von Umweltaspekten, werden für die Einordung der Maßnahmen genutzt. (Björn Schödwell et al., 2017)

4.3.1 Methode für die Bewertung des abiotischen Ressourcenverbrauchs und weitere Umweltaspekte

Im Rahmen der KPI4DCE Studie werden die verschiedenen Methoden für die Bewertung des abiotischen Ressourcenverbrauchs miteinander verglichen und die Vor- und Nachteile miteinander verglichen. Nach der Analyse wird im Rahmen des KPI4DCE Abschlussberichtes die Ökobilanz nach ILCD-Handbuch für die Bewertung ausgewählt. (Björn Schödwell et al., 2017, S. 75–84)

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt keine Bewertung der in der Literaturrecherche identifizierten Maßnahmen nach deren Wirksamkeit für den Ressourcenverbrauch, da für eine korrekte Bewertung wiederum ein Testrechenzentrum notwendig wäre, sowie die Möglichkeit eine vertikale Zeitstudie durchzuführen, um Änderungen im abiotischen Ressourcenverbrauch zu evaluieren. Für den Rahmen der Mastarbeit werden aber die im KPI4DCE definierten Systemgrenzen für die Bewertung der Maßnahmen übernommen. (Björn Schödwell et al., 2017, S. 113–116)

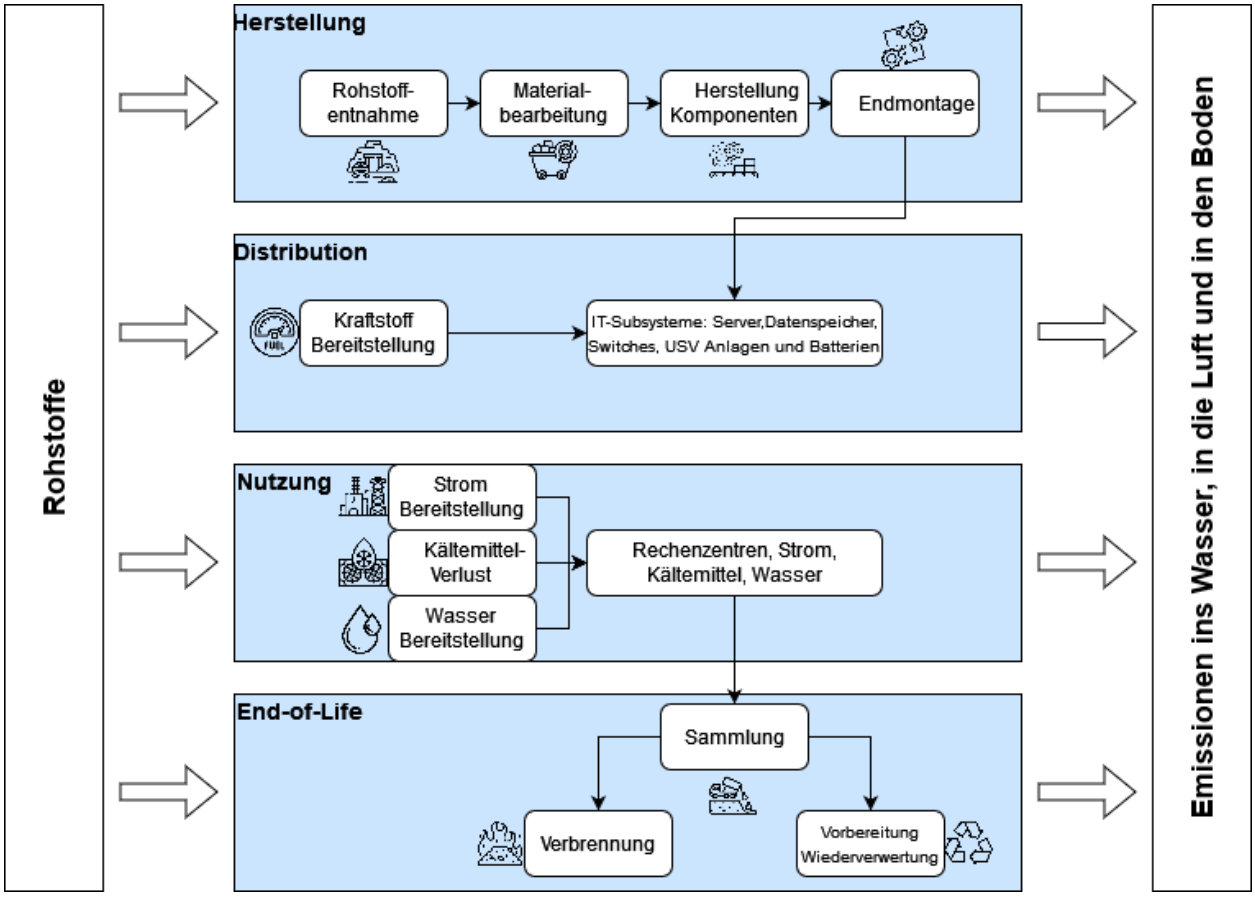


Abbildung 8: Eigene Darstellung mit Icons von Flaticon.com der Systemabgrenzung basierend auf (Björn Schödwell et al., 2017, S. 113)

Diese Systemgrenzen, werden auch für die Methodik und die Anwendung der Suchstring im Rahmen der systematischen Literaturanalyse berücksichtigt und sollen bei der danach entstehenden Handlungsempfehlungen als zusätzliche Kategorie ein leichteres Filtern ermöglichen.

4.3.2 Umweltaspekte und IT-Leistung

Im Rahmen der KPI4DCE werden folgende 4 Umweltaspekte definiert. Abiotischer Rohstoffverbrauch, Kumulierter Energieaufwand, Treibhausgaspotenzial sowie Wasserverbrauch. (Björn Schödwell et al., 2017, S. 116–117) Diese werden durch das Forschungsteam in Bezug zur IT-Leistung des Rechenzentrums gesetzt. Hierbei definiert das KPI4DCE Forschungsteam die folgenden Bereiche Nutzen der Server über deren Rechenleistung, Nutzen der Datenspeicher anhand derer Datenspeicherleistung, sowie Nutzen der Netzwerke aufgrund deren Datenübertragungsleistung. (Björn Schödwell et al., 2017, S. 98–113)

IT-Subsystem	Bezugsgröße	Eingabegröße
Server	CPU	Modellbezeichnung
	CPU	Anzahl (-)

	CPU	Auslastung (%)
Datenspeicher	Gerät	Anzahl Lese- und Schreibvorgänge (Transaktionsrate) (IO/s)
	Gerät	Datendurchsatz Lese- und Schreibvorgänge (GB/s)
	Gerät	Speicherplatz belegt (GB)
Netzwerkgerät	Gerät	Speicherplatz belegt (GB)

Tabelle 6: Eigene Darstellung Größen KPI4DCE Bewertung der IT-Leistung basierend auf (Björn Schödwell et al., 2017, S. 113)

Innerhalb der KPI4DCE Studie wurde eine umfassende Analyse der verschiedenen Bertwertungsmethoden für die Verbrauch von abiotischen Ressourcen innerhalb einer Ökobilanz vorgenommen. Es wurden dafür folgende aufgelistete Methoden analyisiert und deren Fokus gegenübergestellt: (Björn Schödwell et al., 2017, S. 75–84)

- CML: Methode des Centrum voor Milieukunde
- Ökobilanz nach ILCD-Handbuch
- AADP nach ESSENZ-Methode
- Eco-Indicator 99
- ReCiPe-Methode
- EPS 2000: Environmental Priority Strategies
- IMPACT 2002+: Life Cycle Impact Assessment Methodology
- EDIP97 und EDIP2003: Environmental Development of Industrial Products
- KRA: Kumulierter Rohstoffaufwand nach UBA-Methode
- KRA: Kumulierter Rohstoffaufwand nach VDI 4800 Blatt 1 und Blatt 2
- TRACI: Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts
- LUCAS: A New LCIA Method Used for a Canadian-Specific Context
- LIME: Life Cycle Impact Assessment Method based on Endpoint Modeling

Die KPI4DCE Studie definiert dann für die Bewertung innerhalb der Studie die ILCD-Methode als Bewertungsmethode für abiotische Ressourcen, da diese die größte Anzahl an Rohstoffen enthält (seltene Erden als besonders relevanter Rohstoff innerhalb der Herstellungsphase für Rechenzentren), sowie das die ILCD auf der CML mit einem großen Konsens innerhalb der Ökobilanzierung basiert. (Björn Schödwell et al., 2017, S. 85–90)

Entsprechend der Definition für Ökobilanz des deutschen Bundesumweltamt wurden die internationalen Normen bzw. ISO 14040:2006 Environmental management- Life cycle

assessment - Principles and framework und 14044:2006 Environmental management- Life cycle assessment - Requirements and guidelines auf deren Aktualität überprüft. ISO 14040:2006 wurde dabei 2022 kontrolliert und ist aktuell noch gültig, und hat bereits ein Amendment respektive Änderungsantrag 2020 erfahren. Auch die ISO 14044:2006 ist aktuell noch gültig und wurde 2022 das letzte Mal kontrolliert und besitzt zwei Amendments. Daher die zugrunden liegenden Normen, für die ILCD-Methode haben auch 5 Jahre nach der KPI4DCE Studie Gültigkeit und haben keine umfassende Änderung erfahren. (International Organization for Standardization, Juli.2006a, Juli.2006b, 2017b, 2020a, 2020b; Umweltbundesamt, 2018)

Aufgrund dieser Kontrolle, sowie der Überprüfung der genannten Bewertungsmethoden auf Aktualität wird im Rahmen dieser Masterarbeit der im Rahmen des KPI4DCE Projektes evaluierte und angewandete Kennzahlenkatalog verwendet. Eine Einschränkung, die im Rahmen dieser Masterarbeit aufgrund der zeitlichen Einschränkung sowie den Umfang der Masterarbeit akzeptiert wird, dass keine neuen Bewertungsmethoden auf eine bessere Eignung zu Bewertung der Ökobilanz von Rechenzentren mit Publikationsdatum nach 2018 betrachtet wurden.

Daher werden für die systematische Literaturrecherche und die den darauf aufbauenden Handlungsempfehlungen folgende Wirkungskategorien übernommen: (Björn Schödwell et al., 2017, S. 113–117)

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

Sowie für die Betrachtung der Lebenszyklusphasen folgende Komponenten und deren Ressourceninanspruchnahmen: (Björn Schödwell et al., 2017, S. 118–152)

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

4.4 Europäische Kommission und europäische Union

Die europäische Kommission stellt für Rechenzentren verschiedene Materialien, Bestpractices sowie Regulatorien zu Verfügung. Dazu gehören folgende:

4.4.1 Regulation on ecodesign requirements for servers and data storage products EU 2019/424

Gemäß der europäischen Verordnung 2019/424 gelten seit dem 1. März 2020 Energieverbrauchs- und Ressourceneffizienzmaßnahmen für die meisten Server und Datenspeicherausrüstungen, die typischerweise in Rechenzentren und Büros verwendet werden. Diese Verordnung enthält spezifische ökodesignbezogene Anforderungen für Server. (EU 2019/424, 2019/01.Mai 2021)

Die Verordnung 2019/424 beschreibt die ökodesignbezogenen Anforderungen für Server und Datenspeicherprodukte. Sie leitet sich von der EU-Richtlinie 2009/125/EG zu den ökodesignbezogenen Anforderungen für elektrogerätebezogene Produkte ab. Diese Verordnung betrifft insbesondere die identifizierte Produktkategorie Lot 9 - Unternehmensserver. (EU 2019/424, 2019/01.Mai 2021)

Zu den Anforderungen, die in den Anhängen der Verordnung 2019/424 aufgeführt sind, gehören unter anderem:

- Mindesteffizienz der Stromversorgungseinheit (PSU)
- Maximale Leistungsaufnahme im Leerlaufzustand
- Anweisungen für Hersteller und Endbenutzer
- Konformitätsbewertung anhand interner technischer Dokumentation
- Überlegungen zur Reparatur, Wiederverwendung und Aufarbeitung

Details zu den einzelnen aufgeführten Anforderungen können dem Anhang F entnommen werden. (EU 2019/424, 2019/01.Mai 2021)

4.4.2 Development of the EU Green Public Procurement (GPP) Criteria for Data Centres, Server Rooms and Cloud Services

Die Zielsetzung dieses Dokumentes ist es, grüne Kriterien für die öffentliche Beschaffung von Rechenzentren, Serverräume und Cloud-Services zu schaffen. Das Dokument soll öffentlichen Behörden Orientierung bieten, wie sie Ausrüstung und Dienstleistungen von Rechenzentren beschaffen können. Damit soll es Behörden möglich sein, Umweltverbesserungen zu erreichen. Dieser Kriterienkatalog soll dabei unterstützen, die europäischen Politikziele für Energie, Klimawandel und Ressourceneffizienz zu erreichen und die Lebenszykluskosten zu reduzieren.:

- Leistung von ICT-Systemen
- Leistung von mechanischen und elektrischen Systemen
- Reduzierung von Treibhausgasemissionen

Für diese Schwerpunktbereiche wurden Kriterien bereitgestellt, die unterstützt werden durch technische Begründungen sowie Beiträgen von Interessengruppen. Beschaffer können diese Kriterien anwenden und Bieter verpflichten Umweltauswirkungen im Lebenszyklus zu

reduzieren, insbesondere in Bereichen mit Kosten- und Marktperspektiven für Verbesserungen, die überprüfbar sind. Die Beschaffungsprozesse und Kriterien sind in einem separaten Dokument beschrieben (SWD(2020) 55 final), um öffentlichen Behörden bei der Integration in ihre Beschaffungsprozesse zu helfen (DODD et al., 2020)

4.4.3 2023 Best Practice Guidelines for the EU Code of Conduct on Data Centre Energy Efficiency

Das "European Code of Conduct for Data Centres" (EU DC CoC) ist eine freiwillige Initiative, initiiert vom Joint Research Centre (JRC), um den Energieverbrauch in Rechenzentren zu reduzieren und die damit verbundenen Umwelt-, Wirtschafts- und Energieversorgungssicherheitsauswirkungen anzugehen. Im Rahmen der jährlich erscheinenden Best Practice Guidelines werden freiwillige Standards für Unternehmen festgelegt. Zudem konzentrieren sich die Best Practice Guidelines auf Schlüsselthemen und vereinbarte Lösungen. Aufgrund der annuellen Erneuerung wird versucht auch die neuesten technologischen Entwicklungen mit einzubeziehen. (Acton et al., 2023)

Für diese Masterarbeit wird aufgrund der Aktualität, der regionalen Bedeutung, sowie der Möglichkeit eines Alleinstellungsmerkmal für österreichische Rechenzentren ein Fokus auf den EU DC CoC gelegt sowie dessen Best Practices. Vorhandene Best Practices werden im Rahmen der Literaturrecherche noch einmal explizit angeführt werden. Zusätzlich werden nun nachfolgenden spezifische Kategorien, die im Best Practice Guideline erstellt wurden, auf ihre Validität für diese Masterarbeit überprüft.

Für die Bewertung der in der systematischen Literraturrecherche stattfindenden Analyse der vorhandenen wissenschaftlichen Literatur bietet es sich an die im EU DC CoC vorhandene Definition für Betriebsmodelle und Verantwortungsbereiche zu überprüfen, ob diese als Kategorien angewandt werden können. Es werden dabei fünf verschiedene Betriebsmodelle und acht Verantwortungsbereiche definiert, die dann eine Matrix ergeben der Zuständigkeit ergeben. (Acton et al., 2023, S. 3–6)

Betriebsvariante	Beschreibung
Rechenzentrumsbetreiber	Betreibt das gesamte Rechenzentrum und übernimmt alle operativen, sowie wirtschaftlichen damit verbundenen Tätigkeiten. Nutzt selbst die zu Verfügung gestellten IT-Dienste
Colocationanbieter	Betreibt das Rechenzentrum primär um die Fläche für andere Betreiber zu Verfügung zu stellen damit diese die eigene Hard- und Software installieren können.
Colocationkunde	Betreibt selbst innerhalb eines Rechenzentrum Hard- sowie Software und bezieht Kühlungstechnik, Strom sowie Betriebsanlagen vom Colocationanbieter. Nutzt die IT-Dienste ann selbst.

Managed Service Provider (MSP)	Übernimmt dieselben Aufgaben wie der Rechenzentrumsbetreiber nutzt aber das Rechenzentrum primär um Kunden IT-Dienste zu liefern.
MSP in Colocation	Übernimmt dieselben Aufgaben wie ein Colocationkunde und nutzt dann das Rechenzentrum wie ein MSP

Tabelle 7: Eigene Darstellung Betriebsmodelle von Rechenzentren basierend auf (Acton et al., 2023, S. 3–4)

Ausgehend von dieser Tabelle wird sich die vorliegende Arbeit auf Rechenzentrumsanbieter sowie MSP konzentrieren und die beiden anderen Betriebsvarianten aufgrund der zu entwickelnden Handlungsempfehlung nicht betrachten.

Folgende Verantwortungsbereiche werden innerhalb des EU DC CoC definiert.

Bereichstyp	Beschreibung
Gebäude	Beinhaltet die Unterbereiche Sicherheit, Standort sowie Reparaturen, Erhaltung & Wartung.
Mechanische u. elektrische Anlagen	Alle Themen im Zusammenhang mit mechanischen und elektrischen Anlagen innerhalb eines Rechenzentrums (Auswahl, Installation, Konfiguration, Wartung und Verwaltung)
RZ-Fläche	Für die Hauptfläche eines Rechenzentrums auf der die IT-Infrastruktur installiert ist, die Übernahme folgender Tätigkeiten: Installation, Konfiguration, Wartung und Verwaltung.
IT-Schränke	Tätigkeiten (siehe RZ-Fläche) für die Serverracks | IT-Schränke
IT (physisch)	Tätigkeiten (siehe RZ-Fläche) für andere physische IT-Komponenten.
Betriebssystem / Virtualisierung	Tätigkeiten (siehe RZ-Fläche) für auf der physischen IT installierten Betriebs- und Virtualisierungssoftware
Software	Tätigkeiten (siehe RZ-Fläche) für auf der physischen IT installierten Applikationssoftware
Geschäftspraxis	Überprüfung der Bedeutung des Systems, Verfügbarkeit, Wartungsanforderungen und Datenmanagementprozesse angepasst auf den Bedarf der jeweiligen Organisation. Übernahme von Kommunikation sowie Entscheidungen betreffend die zuvor genannten Themen.

Tabelle 8: Eigene Darstellung Verantwortungsbereiche in Rechenzentren basierend auf (Acton et al., 2023, S. 4–5)

Aufgrund dessen, dass innerhalb dieser Masterarbeit Handlungsempfehlungen für Rechenzentrumsbetreiber entwickelt werden sollen, ist es nicht mehr notwendig, die Matrix aufzunehmen, da laut EU DC CoC, die Rechenzentrumsbetreiber für alle Bereiche verantwortlich sind. (Acton et al., 2023, S. 5)

Im Rahmen des EU DC CoC werden zusätzlich verschiedene Areale für die Umsetzung der Best Practices definiert und genannt. Diese bieten sich aufgrund der Aktualität, sowie der Möglichkeit der Nutzung des **Assessment Framework** des EU DC CoC auch als Kategorie für die systematische Literaturrecherche sowie die spätere Entwicklung der Handlungsempfehlungen. In der folgenden Tabelle sind die einzelnen Bereiche und Unterbereiche mit kurzer Erläuterung zusammengefasst dargestellt.

Hauptbereich	Unterbereich
Nutzung, Verwaltung und Planung von Rechenzentren (Acton et al., 2023, S. 7–13)	Einbindung von Organisationsgruppen
	Allgemeine Richtlinien
	Ausfallsicherheit und Provisionierung.
IT-Ausrüstung und Dienstleistungen (Acton et al., 2023, S. 14–25)	Auswahl und Einsatz neuer IT-Ausrüstung
	Einführung neuer IT-Dienste
	Verwaltung bestehender IT-Ausrüstung und -Dienste
	Datenverwaltung
Kühlung (Acton et al., 2023, S. 26–40)	Luftstrommanagement und Design
	Management der Kühlung
	Einstellungen für Temperatur und Luftfeuchtigkeit
	Freie und sparsame Kühlung
	Hocheffiziente Kühlanlage
	Computerraum-Klimageräte / Luftbehandlungsgeräte
	Direkte Flüssigkeitskühlung
	Wiederverwendung der Abwärme von Rechenzentren
Stromversorgungsanlagen für Rechenzentren (Acton et al., 2023, S. 41–42)	Auswahl und Einsatz von neuen Stromversorgungsanlagen
	Verwaltung bestehender Stromerzeugungsanlagen
Andere Ausrüstung des Rechenzentrums (Acton et al., 2023, S. 43)	Allgemeine Praktiken
Gebäude des Rechenzentrums (Acton et al., 2023, S. 44–46)	Physikalischer Aufbau des Gebäudes
	Geografischer Standort des Gebäudes
	Wasserquellen
Monitoring	Messung des Energieverbrauchs und der Umweltbelastung
	Erfassung und Protokollierung des Energieverbrauchs und

(Acton et al., 2023, S. 47–52)	der Umweltbedingungen
	Energieverbrauch und Umweltberichte
	IT-Berichterstattung

Tabelle 9: Eigene Darstellung der Optimierungsbereiche von Rechenzentren laut EU DC CoC basierend auf (Acton et al., 2023)

Für die Masterarbeit wird auf den Optimierungsbereich Gebäude des Rechenzentrums verzichtet. Dies erfolgt aufgrund der bereits im KPI4DCE Projektbericht dargestellten zwar essenziellen Standortfaktoren [Geografische Lage (Höhenlage, räumliche Nähe zu Seen, Flüssen und Meeren), Klimatische Bedingungen (Außentemperatur, Luftfeuchte, Sonneneinstrahlung, Wind), Direkte Umgebung, Gebäudeart, Energieverfügbarkeit sowie Konnektivität], aber deren fehlenden Bedeutung für die Anwendbarkeit für Kennzahlen und nach Bau geringen Änderungsmöglichkeiten. (Björn Schödwell et al., 2017, S. 91)

Die in den jeweiligen Jahresausgaben im Punkt „***10 Practices to become minimum expected“*** werden im Rahmen der Ergebnispräsentation in Kapitel Schlussfolgerung genutzt und in den Unterkapiteln „Konkrete Handlungsempfehlungen“ für die Erstellung einer Roadmap herangezogen. (Acton et al., 2020, S. 48, 2021, S. 48, 2022, S. 51, 2023, S. 53)

4.4.4 Assessment Framework for Data Centres in the Context of Activity 8.1 in the Taxonomy Climate Delegated Act

Das Assessment Framework, basierend auf dem European Code of Conduct for Energy Efficiency in Data Centres, betont Anforderungen über Empfehlungen hinaus und ergänzt das CoC Best Practices-Dokument. Es soll damit für Auditoren die notwendigen Tools bereitstellen, um zu überprüfen, ob ein Rechenzentrum die im Code of Conduct festgelegten Praktiken korrekt umsetzt. (Paolo Bertold, 2023)

4.4.5 Förderprogramme der europäischen Union

Das Joint Research Center nennt am 05.09.2023 folgende Förderprogramme der europäischen Unionen die den Einsatz einer innovativen, umweltfreundlichen und sicheren Cloud unterstützen:

- Horizon Europe (European Union)
- Connecting Europe Facility 2 (European Union, 2023b)
- Digital Europe Programm (European Union, 2023a)
- InvestEU - Strategic Technologies for Europe Plattform - Target investment areas (European Union)
- Recover and Resilience Facility (European Union)

Diese Themen werden im Rahmen, der Masterarbeit nicht weiter untersucht. aufgrund der notwendigen Abgrenzung, werden aber für den tatsächlichen Handlungsempfehlungsteil in der Konklusion nochmal erwähnt, da die Förderprogramme zum Großteil noch eine Laufzeit bis 2027 haben.

5 METHODIK – SYSTEMATISCHE LITERATURRECHERCHE

Aufgrund der Breite des Themas, der beschriebenen bereits vorhandenen Forschungsprojekte und Initiativen zu dem Thema, sowie den vorhandenen Normen und Zertifizierungen, die sich auf verschiedene Aspekte des „Green Cloud Computing“ fokussieren, wird in diesem Kapitel erläutert wieso die systematische Literaturrecherche als erfolgsversprechende Methodik ausgewählt wurde. Nachfolgenden werden die Möglichkeiten und Herangehensweise sowie der Ablauf der Literaturrecherche erörtert.

Literatur (Brocke et al., 2009; Giustini & Boulos, 2013; Greyson et al., 2019; Jane Webster & Richard T. Watson, 2002; Kitchenham BA & S. Charters, 2007; Murdiyanto & Priadana, 2021; Okoli & Schabram, 2010; Page et al., 2021; Watson & Webster, 2020)

5.1 Wahl der Literraturrecherche als Methode

Die primär von Brocke et al. (2009) beschriebene systematische Literaturrecherche bietet sich aufgrund der Möglichkeit eine große Menge an unterschiedlichen wissenschaftlicher Literatur und Quellen zu sichten an. Es ergibt sich damit die Möglichkeit eine große Menge an Rohdaten strukturiert zu erheben. Aufgrund der eingeschränkten Möglichkeiten die Themen dieser Masterarbeit mit besonderer breiter Betrachtungsweise zu evaluieren, wurde daher die systematische Literaturrecherche ausgewählt.

5.2 Methodik der Literaturrecherche

Bei der Literaturrecherche wird zumeist das Vorgehen nach Jane Webster und Richard T. Watson (2002) und deren 2020 angepasste Variante in Analysing the past to prepare for the future: Writing a literature review a roadmap for release 2.0 verwendet. (Watson & Webster, 2020)

Bei dieser Methode ist es die Zielsetzung, den aktuellen Stand der Wissenschaft respektive Technik im gewählten Fachgebiet zusammenzufassen. Daher es soll bei der Kontextualisierung der Forschung, sowie bei der Definition und des Aufbaus der notwendigen Terminologie sowie theoretischen Konzepten unterstützen. Aus diesen heraus kann dann eine Forschungslücke für die Entwicklung einer Forschungsfrage sowie Hypothesen abgeleitet werden. (Rowley & Slack, 2004)

Für den Zweck dieser Arbeit wird aber aufgrund der Notwendigkeit mit angemessenen Richtlinien für Methodik sowie Wissenschaftlichkeit zu arbeiten, die systematische Literaturanalyse gewählt. Zwei bekannte methodische Ansätze im Feld der Wirtschaftsinformatik sind Fettke (2006) und Brocke et al. (2009).

5.3 Die systematische Literraturrecherche

Bei der systematische Literaturrecherche nach vom Brocke et al. Handelt es sich um einen iterativen Prozess. Im Abbildung 9 werden die notwendigen Schritte visualisiert dargestellt (Brocke et al., 2009):

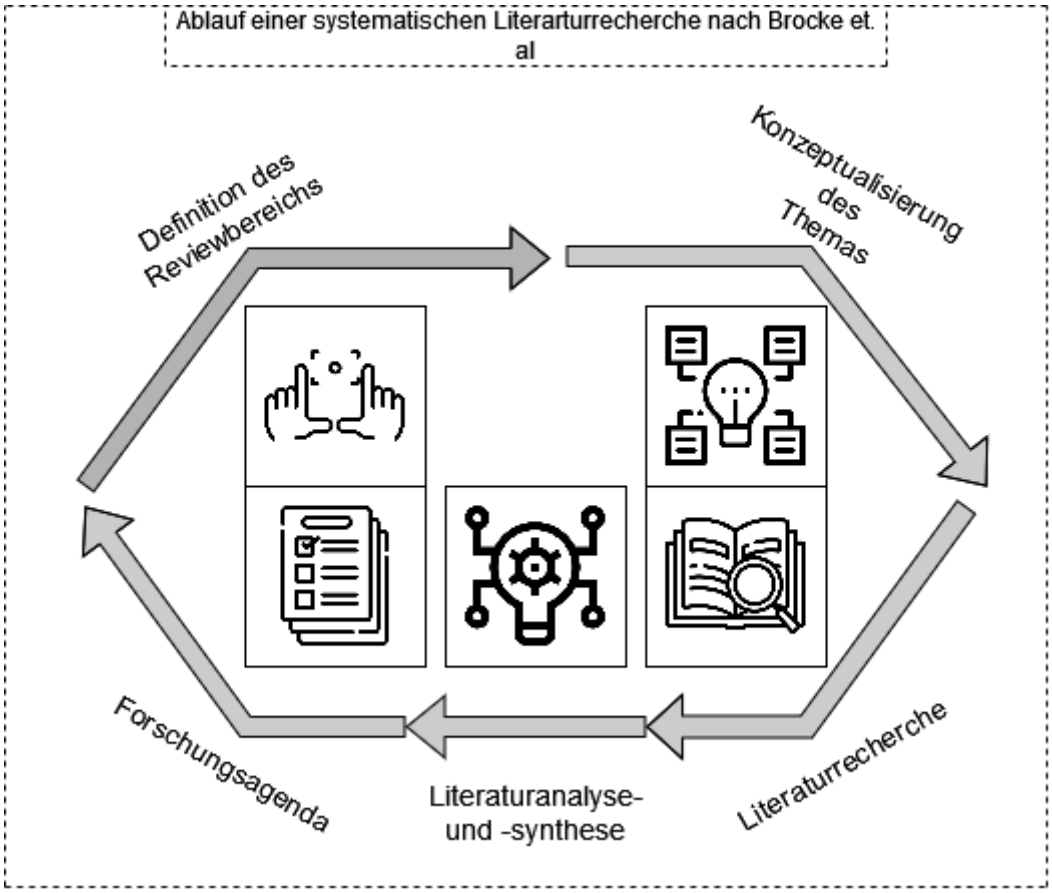


Abbildung 9: Eigene Darstellung Ablauf einer systematischen Literaturrecherche basierend auf (Brocke et al., 2009, S. 8)

1. Definition des Review- respektive Anwendungsbereiches
2. Konzeptionalisierung des Themas
3. Literatursuche bzw. systematische Literaturrecherche
4. Literaturanalyse und Literatursynthese
5. Zusammenfassung der Resultate bzw. Bearbeitung anhand der Resultate der Forschungsagenda

In den weiteren Unterkapiteln werden die einzelnen Schritte dieser Herangehensweise beschrieben.

5.3.1 Definieren des Anwendungsbereichs

Für die Durchführung einer strukturierten Literaturrecherche muss zuerst der Anwendungsbereich der Literaturrecherche definiert werden. Brocke et al. (2009) stellt dafür sechs Charakteristiken zu Verfügung um eine Entscheidung für die Ausrichtung der jeweiligen Charakteristik zu treffen. In der folgenden Tabelle sind diese angeführt:

Charakteristika	Kategorien für Charakteristik
Fokus	Ergebnisse
	Methoden
	Theorien
	Anwendung
Ziel	Integration
	Kritik
	Kernthemen/Zusammenfassung
Organisation	Historisch
	Konzeptionell
	Methodisch
Perspektive	Neutrale Position
	Verfechtende Position
Zielgruppe	Gelehrte/Wissenschaftlich (spezialisiert)
	Gelehrte/ Wissenschaftlich (generell)
	Anwender/Politiker
	Öffentlichkeit
Umfang	Erschöpfend
	Erschöpfend-selektiv
	Repräsentativ
	Zentral/Grundlegend/Bahnbrechende Arbeiten

Tabelle 10: Eigene Darstellung Anwendungsbereich Literaturrecherche nach Brocke et al. (2009)

Von diesen Kategorien kann jeweils pro Charakteristik nur eine ausgewählt werden.

5.3.2 Konzeptualisierung des Themas

Nach der Definition des Rechercheschwerpunkts erfolgt die Konzeptualisierung des Themas. Hierbei werden relevante Begriffe und Konzepte identifiziert und in einem theoretischen Rahmen verortet. Dies hilft dabei, die Suche nach Literatur gezielter durchzuführen und relevante Quellen besser zu verstehen. Beispiel für eine Methode der Konzeptualisierung wäre zum Beispiel eine oder mehrere Mindmaps. (Brocke et al., 2009)

5.3.3 Literatursuche

Der essenzielle Schritt mit dem höchsten Arbeitsaufwand ist die Sichtung von geeigneten Publikationen. In diesem Schritt werden systematisch verschiedene wissenschaftliche Datenbanken, Bibliothekskataloge und andere Informationsquellen genutzt. Aus diesen werden relevante Studien, Artikel und Bücher extrahiert bzw. bezogen. Vorab müssen Suchparameter, Suchstrings und vordefinierter Schlüsselbegriffe definiert werden, die aus der Konzeptualisierung des Themas abgeleitet wurden. Beispielhaft soll dieser Prozess in der nachfolgenden Abbildung dargestellt werden. (Brocke et al., 2009, S. 9)

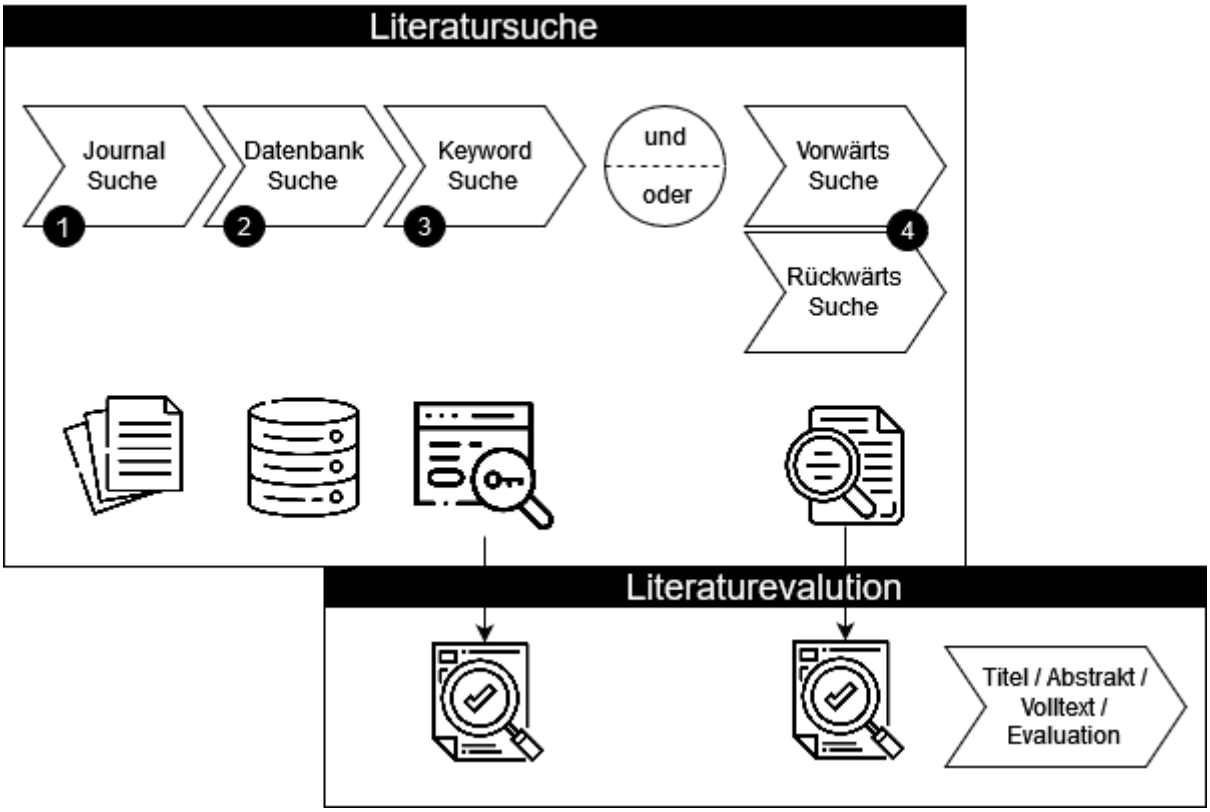


Abbildung 10: Eigene Darstellung Literatursuche nach Brocke et al. (2009, S. 9)

5.3.4 Literaturanalyse

Nachdem relevante Literaturquellen gesammelt wurden, erfolgt eine gründliche Analyse. Die identifizierten Studien und Artikel werden auf ihre Qualität, Relevanz und Methodik hin überprüft. Die Ergebnisse werden systematisch zusammengefasst und analysiert, um Muster,

Trends und Widersprüche zu erkennen. Dieser Schritt ermöglicht eine kritische Bewertung der vorhandenen Literatur. (Brocke et al., 2009)

Artikel	Konzepte											
	A			B			C			…		
Analysebereich	O	G	I	O	G	I	O	G	I	O	G	I
1					X				X			
2	X			X	X			X				
…								X	X			X
Legende	O (Organisation)				G (Gruppe)				I (Individum)			

Abbildung 11: Eigene Darstellung Konzeptmatrix erweitert um Analysebereichen basierend auf Jane Webster und Richard T. Watson (2002, S. 17)

Für diesen Schritt wird eine Konzeptmatrix übernommen die von Jane Webster und Richard T. Watson exemplarisch dargestellt wird. Dort werden horizontal die aus der vorhergehenden Theoriearbeit selbst erstellten Konzepte sowie Analysebereiche (in diesem Fall Kommunikation in Organisationen, Gruppen oder zwischen Individuen) eingetragen. Vertikal werden die einzelnen fachwissenschaftlichen Publikationen eingetragen und inwieweit Sie diese Konzepte oder Analysebereiche erfüllen bzw. abdecken. (Jane Webster & Richard T. Watson, 2002)

5.3.5 Forschungagenda

Die Forschungsagenda wird auf Grundlage der Literaturanalyse und -synthese entwickelt. Bestandteile der Forschungsagenda sind die offenen Forschungsfragen, die sich aus der vorhandenen Literatur ergeben, sowie potenzielle Ansatzpunkte für zukünftige Studien. Die Forschungsagenda dient als Grundlage für weitere wissenschaftliche Untersuchungen und gibt Impulse für die Weiterentwicklung des Forschungsgebiets. Die systematische Literaturrecherche nach Brocke et al. ermöglicht somit eine strukturierte und umfassende Untersuchung des Forschungsfelds, wodurch bestehendes Wissen kritisch bewertet und neue Erkenntnisse generiert werden können. (Brocke et al., 2009)

5.4 Durchführung der Literaturrecherche nach vom Brocke et al.

Nachfolgend erfolgt die Beschreibung der einzelnen Arbeitsschritte für diese Masterarbeit.

5.4.1 Definieren des Anwendungsbereichs

Ausgehend vom zuvor dargelegten Schema nach Brocke et al. Wurden folgende Anwendungsbereiche festgelegt:

- **Fokus:** Da im Zuge dieser Arbeit Handlungsempfehlungen für österreichische Rechenzentrumsbetreiber, anhand der wissenschaftlichen Literatur entwickelt werden sollen werden sowohl Forschungsmethoden als auch Theorien negiert. Fokus wird auf *Forschungsergebnisse* sowie falls möglich auf *Anwendungen* gelegt.
- **Ziel:** Entsprechend der Zielsetzung soll es einer nachfolgenden Zielgruppe ermöglicht werden anhand einer *Zusammenfassung* die Ergebnisse zu nutzen.
- **Organisation:** Die Organisation respektive Gliederung der Arbeit soll die Anwendbarkeit der Ergebnisse in Relevanz für die EU DC CoC, den zuvor genannten ISO-Normen sowie dem Blauen Engel bzw. österreichischen Umweltzeichen betrachten. Es handelt sich dabei also der zeitlichen Komponente in diesem um eine primär *konzeptionelle* Organisation mit Anteilen aus dem *historischen*.
- **Perspektive:** Generell werden Arbeiten übernommen, die eine *neutrale Position* einnehmen, aufgrund der Aktualität sowie auch dem politischen Interesse an dem Thema, weisen einige Arbeiten bereits eine Verfechtende Position auf.
- **Zielgruppe:** Da es sich um eine Masterarbeit einer Fachhochschule handelt, die einen größeren Fokus auf die Transfer von theoretischen Wissen in die Praxis legt und die Zielsetzung die Entwicklung von Handlungsempfehlungen zu Implementierung von Methoden des Green Cloud Computing für österreichische Rechenzentrumsbetreiber ist, wird als Zielgruppe *Anwender:Innen* bzw. *Praktiker:Innen* definiert.
- **Umfang**: Anhand der genutzten Kriterien, der Breite des Themas, sowie den damit verknüpften zusätzlichen Disziplinen und Themenkreisen, die bereits vorab eingeschränkt wurden erfolgt eine Erhebung im *repräsentativen* Umfang

Nachfolgend in Tabelle 11 angeführt die ausgewählten Kategorien.

Charakteristik	Kategorien			
Fokus	**Ergebnisse**	Methoden	Theorien	**Anwendung**
Ziel	Integration	Kritik	**Zusammenfassung Kernthemen**	
Organisation	**Historisch**	**Konzeptionell**	Methodisch	
Perspektive	**Neutrale Position**	Verfechtende Position		
Zielgruppe	Wissenschaft Spezial	Wissenschaft Generell	**Anwender / Politiker / Praktiker**	Öffentlichkeit
Umfang	Erschöpfend	Erschöpfend-selektiv	**Repräsentativ**	Zentral / Grundlegende

Tabelle 11: Eigene Darstellung Auswahl der Kategorien nach Brocke et al. (2009)

5.4.2 Konzeptualisierung des Themas

Brocke et al. (2009) definieren das für die Bildung eines Konzept zum Thema, sowie der Herauskristallisierung der Forschungsfrage es vorab notwendig ist, verschiedene Themen und Schlüsselbegriffe zu definieren. Daher wurde sowohl auf eine Mindmap, die im Nachgang erweitert wurde für die Handlungsempfehlungen, sowie eine Conceptmap im Aufbau Krüger et al. (2014) zurückgegriffen um die notwendige Darstellung sowie den Ablauf zu visualisieren.

Concept Map für Literraturrecherche nach Brooke et.al und Moore

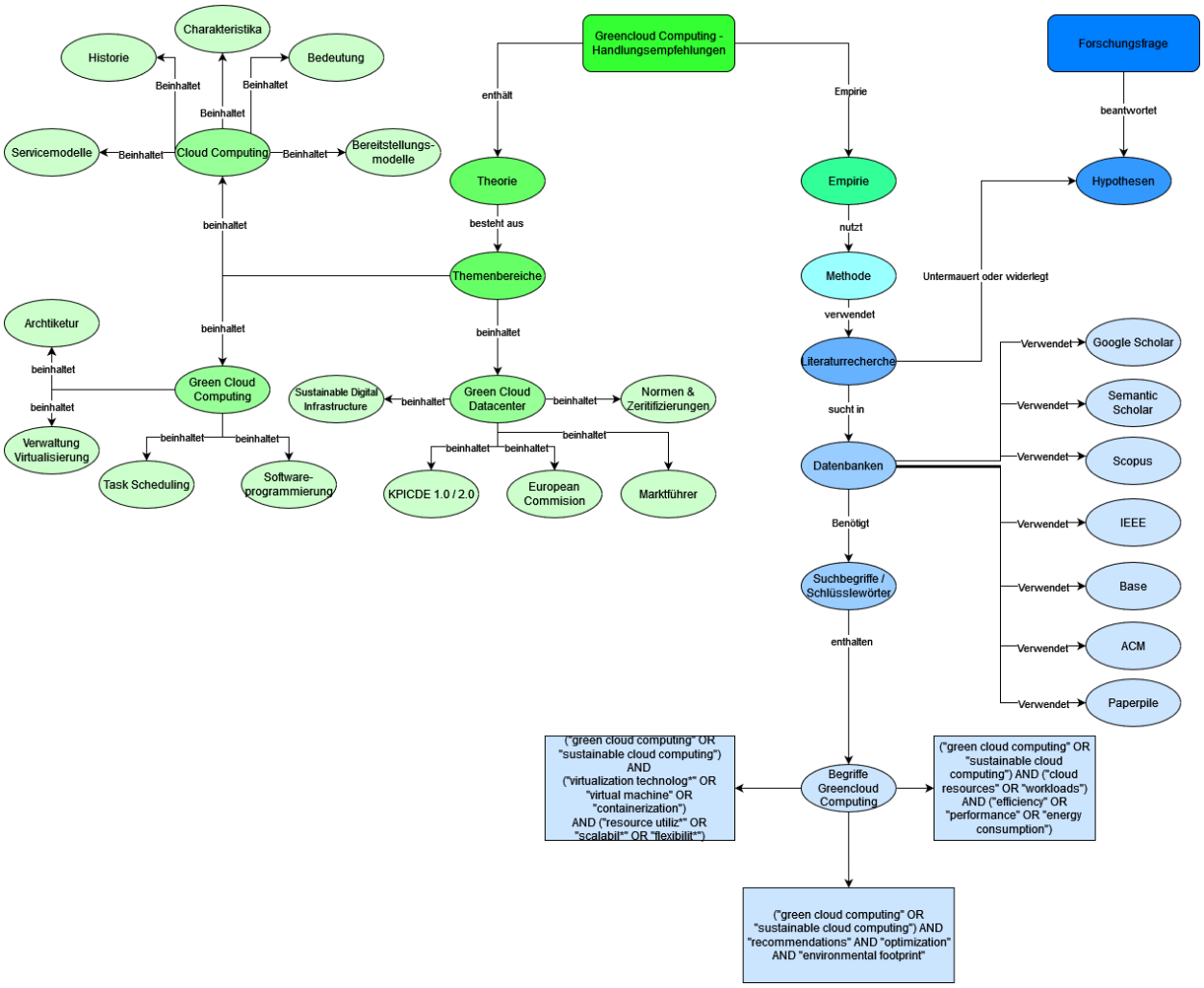


Abbildung 12: Eigene Darstellung einer Concept Map nach (Krüger et al., 2014)

Ausgehend von der Conceptmap werden dann die drei weitere Kategorien Datenbanken, Einschluss und Ausschlusskriterien sowie Suchbegriffe bzw. Suchoperationen benötigt. Diese ergänzen die Konzeptmatrix, die in Kapitel 5.3.4 präsentiert wurden.

5.4.2.1. Datenbanken

Die Auswahl der Datenbanken muss entsprechend der Menge der vorhandenen wissenschaftlichen Publikationen, Zugänglichkeit, Spezifizität für die Fachwissenschaft sowie der Möglichkeit verschiedene Suchoperationen mit unterschiedlichen Parametern und Operatoren durchzuführen, ausgewählt werden. Aufgrund der Möglichkeit des Autors dieser Masterarbeit auch auf Datenbanken zuzugreifen, durch die Kooperationen und Verträge der Universität Wien, wurden folgende Suchmaschinen und Datenbanken ausgewählt:

- Scopus
- Google Scholar
- Semantic Schoolar
- IEEE (Aufgrund der Spezialisierung auf Informatik und Wirtschaftsinformatikthemen)
- ACM (Aufgrund der Spezialisierung auf Informatik und Wirtschaftsinformatikthemen)

Im Rahmen der nachfolgenden Untersuchung lässt sich feststellen, dass durch Scopus, Google Scholar und Semantic Scholar beinahe alle anderen Datenbanken abdecken lassen. Da insbesondere Semantic Scholar und Scopus auch über die Datenbanken von IEEE und ACM bereits Suchoperationen durchführt, also als Metasuchmaschine fungiert.

5.4.2.2. Einschluss und Ausschlusskriterien

Bei einer ersten Analyse der großen Suchmaschinen Semantic Schoolar wurden bereits 2,180 Publikationen gefunden, bei Google Schoolar 492, sowie 266 bei Scopus. Es war daher notwendig mit Einschluss und Ausschlusskriterien zu arbeiten. Folgenden Einschluss- und Ausschlusskriterien (EAK) kamen bei der Auswahl zur Anwendung:

- **EAK1**: Einschränkung des Publikationszeitraum von 2010 bis 2024
- **EAK2:** Einschränkung auf Publikationen die mindestens 5 Zitationen in einer anderen wissenschaftlichen Publikation hatten
- **EAK3:** Publikation ist in englischer oder deutscher Sprache vorhanden
- **EAK4:** Publikation kann über eine Datenbank entweder mit Zugangskonto der Universität Wien oder des Campus02 aufgerufen werden
- **EAK5:** Publikation ist online oder in der Universitätsbibliothek Wien bzw. Fachhochschulbibliothek des Campus02 auffindbar
- **EAK6:** Die wissenschaftliche Methode der Quelle, sowie die Validierung der Ergebnisse sind schlüssig, nachvollziehbar und angemessen
- **EAK7:** Themen innerhalb der Publikation bezieht sich primär auf Green Cloud Computing und nicht eines der angrenzenden Forschungsfelder (Bsp.: Green Software Development, Green Hardware Production)

5.4.2.3. Suchbegriffe

Für eine korrekte Suche innerhalb der Datenbanken ist es notwendig Schlüsselworte zu identifizieren, die in der jeweiligen Fachdisziplin auch verwendet werden. Es sollten zudem Synonyme und Wortgruppen berücksichtigt werden, die eine ähnliche Bedeutung aufweisen. Alle verwendeten Datenbanken bieten dafür die Möglichkeit mit dem boolschen Operator „OR“ zu arbeiten. Sollten nach Konzepten und Begriffen die ausreichende Differenzierungsmerkmale aufweisen gleichzeitig gesucht werden, kann mit dem boolschen Operator „AND“ gearbeitet werden. (Giustini & Boulos, 2013; Greyson et al., 2019)

Als Lingua Franca[1] hat sich in der Informatik Englisch durchgesetzt, daher erfolgt zwar ein Abgleich mit deutschen Suchbegriffen, Deutsche Suchbegriffe führten bei allen Plattformen zu keinen Ergebnissen. Folgende Schlüsselwörter wurden im Rahmen der Masterarbeit verwendet:

- green cloud computing
- sustainable cloud computing
- sustainable cloud

5.4.2.4. Suchstrings

Für die korrekte Umsetzung wurden mehrere unterschiedliche Suchstrings zu der Hauptsuchanfrage mit

```
TITLE ("green cloud computing") AND PUBYEAR > 2010 AND PUBYEAR < 2024
```

Wurden zudem folgenden Suchstrings verwendet:

1. Suchstring Green Cloud Computing:
   ```
   ("green cloud computing" OR "sustainable cloud computing") AND
   ("virtualization technolog*" OR "virtual machine" OR
   "containerization")
   AND ("resource utiliz*" OR "scalabil*" OR "flexibilit*")
   ```
2. SuchstringGreen CloudComputing:
   ```
   ("green cloud computing" OR "sustainable cloud computing") AND
   "recommendations" AND "optimization" AND "environmental footprint"
   ```
3. Suchstring Green Cloud Computing:

[1] Verkehrssprache eines größeren mehrsprachigen Raums

5.4.3 Literatursuche

Im Rahmen der nächsten Phase der systematischen Literaturanalyse nach Brocke et al. (2009) wird auf die PRISMA Method zurückgegriffen. Diese wurde von Moher et al. (2009) entwickelt und dann von Page et al. (2021) weiterentwickelt. Es besteht aus 4 Phasen mit klaren systematischen Vorgehensmodell.

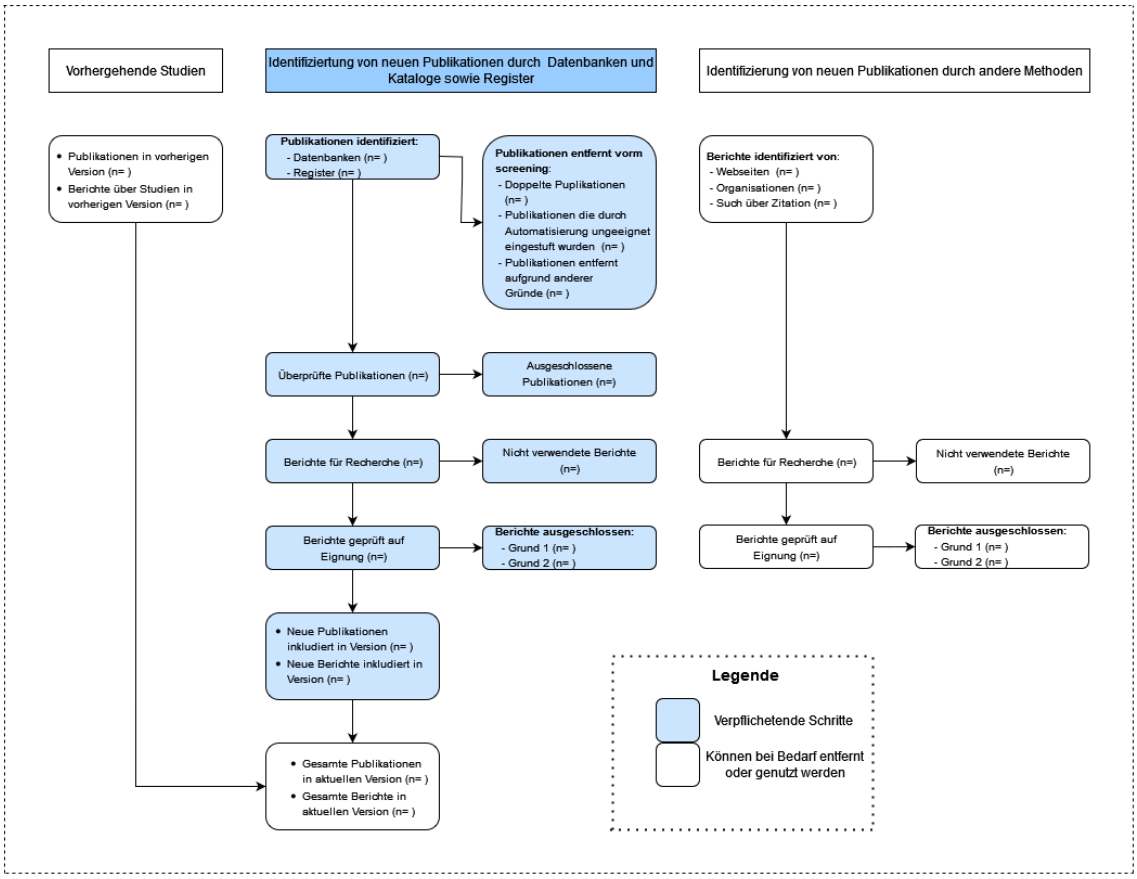


Abbildung 13: Eigene Darstellung PRISMA Flow Diagramm basierend auf Page et al. (2021, 5)

5.4.3.1. Identification Phase

Innerhalb der Idenitification Phase werden in den gewünschten und definierten Suchmaschinen zuerst im Gesamtbestand gesucht. Folgende Suchergebenisse ergaben sich dabei bei den generellen Suchen:

- Semantic Schoolar
  - Suchworte: „Green“ „Cloud“ „Computing“
  - Zeitraum: 2010 – 2024
  - Ergebnisse: circa 174000
- Google Scholar
  - Suchworte: „Green“ „Cloud“ „Computing“
  - Zeitraum: 2010 – 2024

  - Ergebnisse: circa 628 000

- Scopus
  - Suchworte: „Green“ „Cloud“ „Computing“
  - Zeitraum: 2010 – 2024
  - Ergebnis: 7407

Aufgrund der Ergebnisse zwei sehr umfangreicher Suchmaschinen und Stichprobenkontrolle, wurden die Suchen nach Titel, Abstrakt und Key Wörter gefiltert. Ziel war es die Anzahl der Suchergebnisse signifikant zu reduzieren und relevantere Quellen zu erhalten. Beispiel eines Suchstring bei Scopus

- TITLE-ABS-KEY (green AND cloud AND computing)

Folgende Ergebnisse ergaben sich damit für die relevanten Suchmaschinen:

- Semantic Schoolar: 2730
- Google Scholar: 439
- Scopus: 404

Aufgrund der noch immer großen Menge wurde vor dem aussortieren der Dubletten die Suche zuerst auf die Suchmaschinen Semantic Schoolar, Google Scholar und Scopus fokussiert und dort dann das EAK2 direkt angewandt. Das reduzierte die Suchergebnisse folgendermaßen:

1	Titel	Publisher	Jahr	Sprac	Abrufl	Zitation	Link
142	Green Cloud Computing and Economics of the Cloud: Moving towards Sustainable Future	GSTF Journal on Computing	2016	EN	Ja	31	http://dl6.globalstf.org/index.php/joc/article/downloa
143	Energy-Information Transmission Tradeoff in Green Cloud Computing	University of Toronto	2010	EN	Ja	83	https://intra.engr.ucr.edu/~hamed/MRLGcGC10.pdf
144	Profiling Energy Consumption of VMs for Green Cloud Computing	IEEE	2011	EN	Ja	101	https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/61189
145	Integrated Green Cloud Computing Architecture	IEEE	2012	EN	Ja	36	https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/65163
146	Energy saving approaches for Green Cloud Computing: A review	IEEE	2014	EN	Ja	49	https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/67996
147	Green Cloud Computing - A Greener Approach To IT	IEEE	2019	EN	Ja	21	https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/90042
148	Green Cloud? An Empirical Analysis of Cloud Computing and Energy Efficiency	informs Pubsonline	2022	EN	Nein	12	https://pubsonline.informs.org/doi/epdf/10.1287/mns
149	Performance analysis based resource allocation for green cloud computing	Springer	2013	EN	Ja	76	https://link.springer.com/article/10.1007/s11227-013-
150	Green Cloud Computing	IET Digital Library	2012	EN	Nein	18	https://digital-library.theiet.org/content/conferences/
151	Green cloud computing schemes based on networks: a survey	IET Digital Library	2012	EN	Nein	81	https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1
152	Model-driven auto-scaling of green cloud computing infrastructure	ScienceDirect	2012	EN	Ja	203	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S01
153	Using Ant Colony System to Consolidate VMs for Green Cloud Computing	IEEE	2014	EN	Ja	391	https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/69989
154	An adaptive task allocation technique for green cloud computing	Springer	2017	EN	Ja	100	https://link.springer.com/article/10.1007/s11227-017-
155	Green cloud computing: an approach towards sustainability	IRJMETS	2022	EN	Ja	21	https://www.irjmets.com/uploadedfiles/paper/issue_1
156	Towards Green Cloud Computing an Algorithmic Approach for Energy Minimization in Cloud Data Centers	IGI Global	2021	EN	Nein	68	https://www.igi-global.com/chapter/towards-green-cl
157	CyberGuarder: A virtualization security assurance architecture for green cloud computing	ScienceDirect	2012	EN	Ja	197	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S01
158	Green Cloud Computing: Balancing Energy in Processing, Storage, and Transport	IEEE	2010	EN	Ja	1157	https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/55593
159	State-of-the-art research study for green cloud computing	Springer	2011	EN	Ja	219	https://link.springer.com/article/10.1007/s11227-011-
160	Energy efficient fault tolerance techniques in green cloud computing: A systematic survey and taxonomy	ScienceDirect	2022	EN	Ja	56	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S22
161	A Study on Green Cloud Computing	International Journal of Grid	2013	EN	Ja	74	https://www.academia.edu/download/90787042/8.pd
162	Energy efficient computing- Green cloud computing	IEEE	2013	EN	Ja	113	https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/65335
163	Green Cloud Computing and Environmental Sustainability	Wiley Online Libary	2012	EN	Ja	276	https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781
164	Green cloud computing: A review on Green IT areas for cloud computing environment	IEEE	2015	EN	Ja	69	https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/71550
165	Green Cloud Computing: A Literature Survey	MDPI	2017	EN	Ja	111	https://www.mdpi.com/2073-8994/9/12/295

Auswertungstabelle | Google Schoolar | SCOPUS | Semantic Schoolar | BASE | Dubletten SVerweis

Abbildung 14: Exemplarischer Screenshot Tabelle Analyse Suchmaschine Google Scholar

- Google Scholar: 164
  - Davon sind 27 nicht aufrufbar
  - 1 Artikel in Spanisch (Westphall & Villarreal, 2013)
  - 1 Artikel wurde zurück gezogen (Geetha & Robin, 2023)
  - 135 Publikationen die für diese Masterarbeit von dieser Suchmaschine nutzbar sind

1	Titel	Datenbank / Publisher	Jahr	Sprach	Abrufb	Zitationen	Link
165	Recent Trends in Green Cloud Computing	Springer	2019	EN	Nein	6	https://link.springer.com/chapter/
166	Energy-aware task scheduling strategies with QoS constraint for green computing in cloud data centers	ACM	2018	EN	Ja	6	https://dl.acm.org/doi/10.1145/32
167	Analysis of Cybersecurity Based on Li-Fi in Green Data Storage Environments	IEEE	2017	EN	Ja	6	https://ieeexplore.ieee.org/docum
168	Paradigm shift to green cloud computing	Journal of theoretical and applic	2015	EN	Ja	6	http://www.jatit.org/volumes/sev
169	A novel cost based model for energy consumption in cloud computing	Hindawi	2015	EN	Ja	6	https://www.hindawi.com/journal
170	Carbon efficient VM placement and migration technique for green federated cloud datacenters	IEEE	2014	EN	Ja	6	https://ieeexplore.ieee.org/docum
171	Understanding tradeoffs between power usage and performance in a virtualized environment	IEEE	2013	EN	Ja	6	https://ieeexplore.ieee.org/docum
172	Load balancing in green cloud computation	IAENG	2013	EN	Ja	6	https://www.iaeng.org/publicatio
173	Optimal green virtual machine migration model	IGL	2013	EN	Ja	6	https://www.igi-global.com/gatew
174	Dynamic data aggregation algorithm for data centers of green cloud computing	Wanfang Data	2012	ZH	Nein	6	https://d.wanfangdata.com.cn/pe
175	A survey of cloud computing dynamic resource management	International Journal of Advanc	2012	EN	Nein	6	
176	MECpVmS: an SLA aware energy-efficient virtual machine selection policy for green cloud computing	Springer	2022	EN	Ja	5	https://link.springer.com/article/1
177	Deep learning-based multivariate resource utilization prediction for hotspots and coldspots mitigation in green cloud data centers	Springer	2021	EN	Ja	5	https://link.springer.com/article/1
178	Carbon Footprint Analysis: Need for Green Cloud Computing	IEEE	2022	EN	Ja	5	https://ieeexplore.ieee.org/docum
179	A Succinct Review Of Intelligent Computational Techniques In Green Cloud Computing	IEEE	2021	EN	Ja	5	https://ieeexplore.ieee.org/docum
180	Challenges and Practices Identification via a Systematic Literature Review in the Adoption of Green Cloud Computing: Client's Side Ap	IEEE	2021	EN	Ja	5	https://ieeexplore.ieee.org/docum
181	On performance of commodity single board computer-based clusters: A big data perspective	Springer	2019	EN	Nein	5	https://link.springer.com/chapter/
182	Using Artificial Neural Network for VM Consolidation Approach to Enhance Energy Efficiency in Green Cloud	Springer	2019	EN	Nein	5	https://link.springer.com/chapter/
183	Dynamic VM consolidation enhancement for designing and evaluation of energy efficiency in green data centers using regression analy	Science Publishing Corporation	2018	EN	Ja	5	https://www.sciencepubco.com/ir
184	A comparative study of resource allocation strategies for a green cloud	IEEE	2016	EN	Ja	5	https://ieeexplore.ieee.org/docum
185	A survey of computing strategies for green cloud	IEEE	2016	EN	Ja	5	https://ieeexplore.ieee.org/docum
186	Power-efficient immune clonal optimization and dynamic load balancing for low energy consumption and high efficiency in green clou	Journal of Communications	2016	EN	Ja	5	https://www.jocm.us/index.php?n
187	IDPS based framework for security in green cloud computing and comprehensive review on existing frameworks and security issues	IEEE	2015	EN	Ja	5	https://ieeexplore.ieee.org/docum
188	An adaptive bandwidth allocation algorithm for virtual machine migration based on service features	Chinese Journal of Computers	2013	ZH	Nein	5	

Auswertungstabelle | Google Schoolar | SCOPUS | Semantic Schoolar | BASE | Dubletten SVerweis

Abbildung 15: Exemplarischer Screenshot Tabelle Analyse Suchmaschine Scopus

- Scopus: 187
  - Davon sind 20 nicht aufrufbar
  - 1 Artikel wurde zurückgezogen (selbe Publikation wie bei Google Scholar)
  - 2 Artikel sind in Chinesisch verfasst
  - 164 Publikationen die für diese Masterarbeit von dieser Suchmaschine nutzbar sind

1	Titel	Publisher	Jahr	Sprac	Abrufb	Zitationen	Link
43	Consolidating VMs in green cloud computing using harmony search algorithm	ACM	2018	EN	Ja	13	https://dl.acm.org/d
44	Green Cloud Computing - A Greener Approach to IT	IEEE	2019	EN	Ja	12	https://ieeexplore.ie
45	Green Cloud Computing: A Review on Adoption of Green-Computing attributes and Vendor Specific Implementations	IEEE	2019	EN	Ja	12	https://ieeexplore.ie
46	Energy efficient in virtual infrastructure and green cloud computing: A review	Indian Journal of Sci	2016	EN	Ja	12	https://indjst.org/art
47	Design of cultural emperor penguin optimizer for energy-efficient resource scheduling in green cloud computing environment	Springer	2022	EN	Ja	11	https://link.springer.c
48	Survey of State-of-Art in Green Cloud Computing	IGI Global	2016	EN	Ja	10	https://www.igi-glob
49	RETRACTED ARTICLE: Power conserving resource allocation scheme with improved QoS to promote green cloud computing	Springer	2021	EN	Ja	9	https://link.springer.c
50	Recent Trends in Green Cloud Computing	Springer	2019	EN	Nein	9	https://link.springer.c
51	RESCUE: Enabling green healthcare services using integrated IoT-edge-fog-cloud computing environments	Wiley Online Libary	2022	EN	Ja	9	https://onlinelibrary.
52	A Preemptive Priority Based Job Scheduling Algorithm in Green Cloud Computing	IEEE	2016	EN	Ja	9	https://ieeexplore.ie
53	Green Cloud? An Empirical Analysis of Cloud Computing and Energy Efficiency	informs Pubsonline	2022	EN	Ja	8	https://pubsonline.in
54	MECpVmS: an SLA aware energy-efficient virtual machine selection policy for green cloud computing	Springer	2022	EN	Ja	8	https://link.springer.c
55	An improvement of task scheduling algorithms for green cloud computing	IEEE	2020	EN	Ja	8	https://ieeexplore.ie
56	Green cloud computing: Efficient energy-aware and dynamic resources management in data centers	The Science and Info	2018	EN	Ja	8	https://thesai.org/Pu
57	Effort of load balancer to achieve green cloud computing: A review	International Journal	2016	EN	Ja	8	https://gvpress.com/
58	Analysis on energy efficient green cloud computing	IOP Science	2021	EN	Ja	6	https://iopscience.io
59	Active & Idle Virtual Machine Migration Algorithm- a new Ant Colony Optimization approach to consolidate Virtual Machines and ensure Green Cloud Computing	IEEE	2020	EN	Ja	6	https://ieeexplore.ie
60	Carbon Footprint Analysis: Need for Green Cloud Computing	IEEE	2022	EN	Ja	5	https://ieeexplore.ie
61	Advances in Green Cloud Computing	IGI Global	2021	EN	Nein	5	https://www.igi-glob
62	Foreword to the special issue of green cloud computing: Methodology and practice	Wiley Online Libary	2019	EN	Ja	5	https://onlinelibrary.
63	An analytical evaluation of challenges in Green cloud computing	IEEE	2017	EN	Ja	5	https://ieeexplore.ie
64	Power-efficient immune clonal optimization and dynamic load balancing for low energy consumption and high efficiency in green cloud computing	Journal of Communi	2016	EN	Ja	5	https://www.jocm.us
65	Max-Min Ant System based Approach for Intelligent VM Migration and Consolidation for Green Cloud Computing	International Journal	2016	EN	Ja	5	https://citeseerx.ist.p
66	Dynamic Voltage and Frequency Scaling Enhanced Task Scheduling Technologies toward Green Cloud Computing	IEEE	2016	EN	Ja	5	https://ieeexplore.ie

Auswertungstabelle | Google Schoolar | SCOPUS | Semantic Schoolar | BASE | Dubletten SVerweis

Abbildung 16: Exemplarischer Screenshot Tabelle Analyse Suchmaschine Semantic Scholar

- Semantic Scholar: 65
  - Davon sind 5 nicht aufrufbar
  - 1 Artikel wurde zurückgezogen (selbe Publikation wie bei Google Scholar und Scopus)
  - 59 Publikationen die für diese Masterarbeit von dieser Suchmaschine nutzbar sind

5.4.3.2. Screening Phase

Im Rahmen der Screening Phase wurden die Ergebnisse der Suchmaschinen zusammengeführt und danach erfolgt die Überprüfung bzw. das Screening. Ingesamt waren 416 Publikationen vorhanden. Dies kann in Abbildung 17 exemplarisch eingesehen werden.

1	Titel	Publisher	Jahr	Sprache	Abrufbar	Zitation	Suchmaschine
395	Green Cloud Computing - A Greener Approach to IT	IEEE	2019	EN	Ja	12	Semantic Schoolar
396	Green Cloud Computing: A Review on Adoption of Green-Computing attributes and Vendor Specific Implementations	IEEE	2019	EN	Ja	12	Semantic Schoolar
397	Energy efficient in virtual infrastructure and green cloud computing: A review	Indian Journal	2016	EN	Ja	12	Semantic Schoolar
398	Design of cultural emperor penguin optimizer for energy-efficient resource scheduling in green cloud computing environment	Springer	2022	EN	Ja	11	Semantic Schoolar
399	Survey of State-of-Art in Green Cloud Computing	IGI Global	2016	EN	Ja	10	Semantic Schoolar
400	RETRACTED ARTICLE: Power conserving resource allocation scheme with improved QoS to promote green cloud computing	Springer	2021	EN	Ja	9	Semantic Schoolar
401	Recent Trends in Green Cloud Computing	Springer	2019	EN	Nein	9	Semantic Schoolar
402	RESCUE: Enabling green healthcare services using integrated IoT-edge-fog-cloud computing environments	Wiley Online I	2022	EN	Ja	9	Semantic Schoolar
403	A Preemptive Priority Based Job Scheduling Algorithm in Green Cloud Computing	IEEE	2016	EN	Ja	9	Semantic Schoolar
404	Green Cloud? An Empirical Analysis of Cloud Computing and Energy Efficiency	informs Pubsc	2022	EN	Ja	8	Semantic Schoolar
405	MECpVmS: an SLA aware energy-efficient virtual machine selection policy for green cloud computing	Springer	2022	EN	Ja	8	Semantic Schoolar
406	An improvement of task scheduling algorithms for green cloud computing	IEEE	2020	EN	Ja	8	Semantic Schoolar
407	Green cloud computing: Efficient energy-aware and dynamic resources management in data centers	The Science a	2018	EN	Ja	8	Semantic Schoolar
408	Effort of load balancer to achieve green cloud computing: A review	International	2016	EN	Ja	8	Semantic Schoolar
409	Analysis on energy efficient green cloud computing	IOP Science	2021	EN	Ja	6	Semantic Schoolar
410	Active & Idle Virtual Machine Migration Algorithm- a new Ant Colony Optimization approach to consolidate Virtual Machines and ensure Green Cloud Computing	IEEE	2020	EN	Ja	6	Semantic Schoolar
411	Carbon Footprint Analysis: Need for Green Cloud Computing	IEEE	2022	EN	Ja	5	Semantic Schoolar
412	Advances in Green Cloud Computing	IGI Global	2021	EN	Nein	5	Semantic Schoolar
413	Foreword to the special issue of green cloud computing: Methodology and practice	Wiley Online I	2019	EN	Ja	5	Semantic Schoolar
414	An analytical evaluation of challenges in Green cloud computing	IEEE	2017	EN	Ja	5	Semantic Schoolar
415	Power-efficient immune clonal optimization and dynamic load balancing for low energy consumption and high efficiency in green cloud computing	Journal of Co	2016	EN	Ja	5	Semantic Schoolar
416	Max-Min Ant System based Approach for Intelligent VM Migration and Consolidation for Green Cloud Computing	International	2016	EN	Ja	5	Semantic Schoolar
417	Dynamic Voltage and Frequency Scaling Enhanced Task Scheduling Technologies toward Green Cloud Computing	IEEE	2016	EN	Ja	5	Semantic Schoolar
418							

... | SCOPUS | Semantic Schoolar | **Liste Gesamt_unbereinigt** | Liste Gesamt Bereinigt | Liste Gesamt_ohne_Duplikate

Abbildung 17: Exemplarischer Screenshot Tabellenblatt Gesamtliste unbereinigt

Davon waren 364 online oder innerhalb einer Bibliothek einsehbar. Zusätzlich waren dann noch 3 Publikationen nicht auf Englisch bzw. deutsch. (2 chinesisch, 1 spanisch). 3 Publikationen mussten aufgrund eine Retraction Note des Publisher und der Nichterfüllung der Einschlusskriterien in EAK6 aussortiert werden. Damit blieben insgesamt 358 Publikationen für die genauerer Untersuchung.

1	Titel	Publisher	Jahr	Sprache	Abrufbar	Zitation	Suchmaschine
337	Energy efficient hybrid policy in green cloud computing	IEEE	2015	EN	Ja	15	Semantic Schoolar
338	G-Route: an energy-aware service routing protocol for green cloud computing	Springer	2015	EN	Ja	14	Semantic Schoolar
339	Consolidating VMs in green cloud computing using harmony search algorithm	ACM	2018	EN	Ja	13	Semantic Schoolar
340	Green Cloud Computing - A Greener Approach to IT	IEEE	2019	EN	Ja	12	Semantic Schoolar
341	Green Cloud Computing: A Review on Adoption of Green-Computing attributes and Vendor Specific Implementations	IEEE	2019	EN	Ja	12	Semantic Schoolar
342	Energy efficient in virtual infrastructure and green cloud computing: A review	Indian Journal	2016	EN	Ja	12	Semantic Schoolar
343	Design of cultural emperor penguin optimizer for energy-efficient resource scheduling in green cloud computing environment	Springer	2022	EN	Ja	11	Semantic Schoolar
344	Survey of State-of-Art in Green Cloud Computing	IGI Global	2016	EN	Ja	10	Semantic Schoolar
345	RESCUE: Enabling green healthcare services using integrated IoT-edge-fog-cloud computing environments	Wiley Online I	2022	EN	Ja	9	Semantic Schoolar
346	A Preemptive Priority Based Job Scheduling Algorithm in Green Cloud Computing	IEEE	2016	EN	Ja	9	Semantic Schoolar
347	Green Cloud? An Empirical Analysis of Cloud Computing and Energy Efficiency	informs Pubsc	2022	EN	Ja	8	Semantic Schoolar
348	MECpVmS: an SLA aware energy-efficient virtual machine selection policy for green cloud computing	Springer	2022	EN	Ja	8	Semantic Schoolar
349	An improvement of task scheduling algorithms for green cloud computing	IEEE	2020	EN	Ja	8	Semantic Schoolar
350	Green cloud computing: Efficient energy-aware and dynamic resources management in data centers	The Science a	2018	EN	Ja	8	Semantic Schoolar
351	Effort of load balancer to achieve green cloud computing: A review	International	2016	EN	Ja	8	Semantic Schoolar
352	Analysis on energy efficient green cloud computing	IOP Science	2021	EN	Ja	6	Semantic Schoolar
353	Active & Idle Virtual Machine Migration Algorithm- a new Ant Colony Optimization approach to consolidate Virtual Machines and ensure Green Cloud Computing	IEEE	2020	EN	Ja	6	Semantic Schoolar
354	Carbon Footprint Analysis: Need for Green Cloud Computing	IEEE	2022	EN	Ja	5	Semantic Schoolar
355	Foreword to the special issue of green cloud computing: Methodology and practice	Wiley Online I	2019	EN	Ja	5	Semantic Schoolar
356	An analytical evaluation of challenges in Green cloud computing	IEEE	2017	EN	Ja	5	Semantic Schoolar
357	Power-efficient immune clonal optimization and dynamic load balancing for low energy consumption and high efficiency in green cloud computing	Journal of Co	2016	EN	Ja	5	Semantic Schoolar
358	Max-Min Ant System based Approach for Intelligent VM Migration and Consolidation for Green Cloud Computing	International	2016	EN	Ja	5	Semantic Schoolar
359	Dynamic Voltage and Frequency Scaling Enhanced Task Scheduling Technologies toward Green Cloud Computing	IEEE	2016	EN	Ja	5	Semantic Schoolar
360							

... | SCOPUS | Semantic Schoolar | Liste Gesamt_unbereinigt | **Liste Gesamt Bereinigt** | Liste Gesamt_ohne_Duplikate

Abbildung 18: Exemplarischer Screenshot Tabellenblatt Gesamtliste bereinigt

Danach wurde in Excel die Publikationen auf Duplikate bereinigt. Dabei wurden nochmal 127 Publikationen entfernt, was zu einer Liste von 231 Publikationen führte.

1	Titel	Publisher	Jahr	Sprache	Abrufbar	Zitation	Suchmaschine
210	The green cloud effective framework: An environment friendly approach reducing CO2 level	IEEE	2014	EN	Ja	8	SCOPUS
211	How energy consumption in the cloud data center is calculated	IEEE	2019	EN	Ja	7	SCOPUS
212	Towards greener services in cloud computing: Research and future directives	IEEE	2015	EN	Ja	7	SCOPUS
213	Incentives to apply green cloud computing	SCIELO	2013	EN	Ja	7	SCOPUS
214	Temperature aware resource scheduling in Green Clouds	IEEE	2013	EN	Ja	7	SCOPUS
215	A new metaheuristic-based method for solving the virtual machines migration problem in the green cloud computing	Wiley Online Libary	2022	EN	Ja	6	SCOPUS
216	Energy-efficient enhanced Particle Swarm Optimization for virtual machine consolidation in cloud environment	Springer	2021	EN	Ja	6	SCOPUS
217	Novel load balancing approach based on ant colony optimization technique in cloud computing	Bulletin of Electrical Engineering and Informatics	2022	EN	Ja	6	SCOPUS
218	Analysis of Cybersecurity Based on Li-Fi in Green Data Storage Environments	IEEE	2017	EN	Ja	6	SCOPUS
219	Paradigm shift to green cloud computing	Journal of theoretical and applied information te	2015	EN	Ja	6	SCOPUS
220	A novel cost based model for energy consumption in cloud computing	Hindawi	2015	EN	Ja	6	SCOPUS
221	Carbon efficient VM placement and migration technique for green federated cloud datacenters	IEEE	2014	EN	Ja	6	SCOPUS
222	Understanding tradeoffs between power usage and performance in a virtualized environment	IEEE	2013	EN	Ja	6	SCOPUS
223	Load balancing in green cloud computation	IAENG	2013	EN	Ja	6	SCOPUS
224	Optimal green virtual machine migration model	IGL	2013	EN	Ja	6	SCOPUS
225	Deep learning-based multivariate resource utilization prediction for hotspots and coldspots mitigation in green cloud data centers	Springer	2021	EN	Ja	5	SCOPUS
226	Dynamic VM consolidation enhancement for designing and evaluation of energy efficiency in green data centers using regression analysis	Science Publishing Corporation	2018	EN	Ja	5	SCOPUS
227	A comparative study of resource allocation strategies for a green cloud	IEEE	2016	EN	Ja	5	SCOPUS
228	Towards Green Cloud Computing an Algorithmic Approach for Energy Minimization in Cloud Data Centers	IGL Global	2019	EN	Ja	37	Semantic Schoolar
229	An Enhanced Green Cloud Based Queue Management (GCQM) System to Optimize Energy Consumption in Mobile Edge Computing	Springer	2021	EN	Ja	20	Semantic Schoolar
230	Survey of State-of-Art in Green Cloud Computing	IGI Global	2016	EN	Ja	10	Semantic Schoolar
231	RESCUE: Enabling green healthcare services using integrated IoT-edge-fog-cloud computing environments	Wiley Online Libary	2022	EN	Ja	9	Semantic Schoolar
232	Green Cloud? An Empirical Analysis of Cloud Computing and Energy Efficiency	informs Pubsonline	2022	EN	Ja	8	Semantic Schoolar
233							

... | SCOPUS | Semantic Schoolar | Liste Gesamt_unbereinigt | Liste Gesamt Bereinigt | **Liste Gesamt_ohne_Duplikate**

Abbildung 19: Exemplarischer Screenshot Tabellenblatt Gesamtliste bereinigt ohne Duplikate

5.4.3.1. Eligibilty Phase

Im Rahmen der Eligibilty oder Eignungsphase wurden die 231 Publikationen noch überprüft auf deren Nutzbarkeit bzw. Informationsgehalt. Aufgrund der Kontrolle der Texte und Kontrolle der bereits im Rahmen des ***KPICDE*** Projekte von Björn Schödwell et al. (2017) und ***Projekt Green Cloud Computing (GCC)*** von Jens Gröger et al. (2021) verwendeten Literatur sowie dem der bereits im Theorieteil verwendeten Arbeit ***Green Cloud Computing: A Literature Survey*** von Radu (2017) ergab sich eine hohe Schnittmenge der Werke bis 2017. Daher wurde entschieden, die bereinigten Publikation noch einmal einzuschränken auf die Werke von 2017 bis 2023. Das ergab dann eine Liste von 106 geeigneten Publikationen für ein eingehendes Screening im Rahmen von EAK6 und EAK7. Im Zuge dieses Schrittes wurden nun für die 106 Publikationen ein Screening der Abstracts und Keywords durchgeführt, sowie eine kurze Überprüfung der verwendeten Methodik.

5.4.3.2. Inclusion

Ausgehend davon das die 106 Publikationen im Rahmen der Abstract Prüfung EAK6 und EAK7 erfüllten wurden diese Texte für die weitere Literaturanalyse inkludiert. Die visuellen Darstellung der Literartursuche nach Moher et al. (2009) ist in Abbildung 20 zu finden.

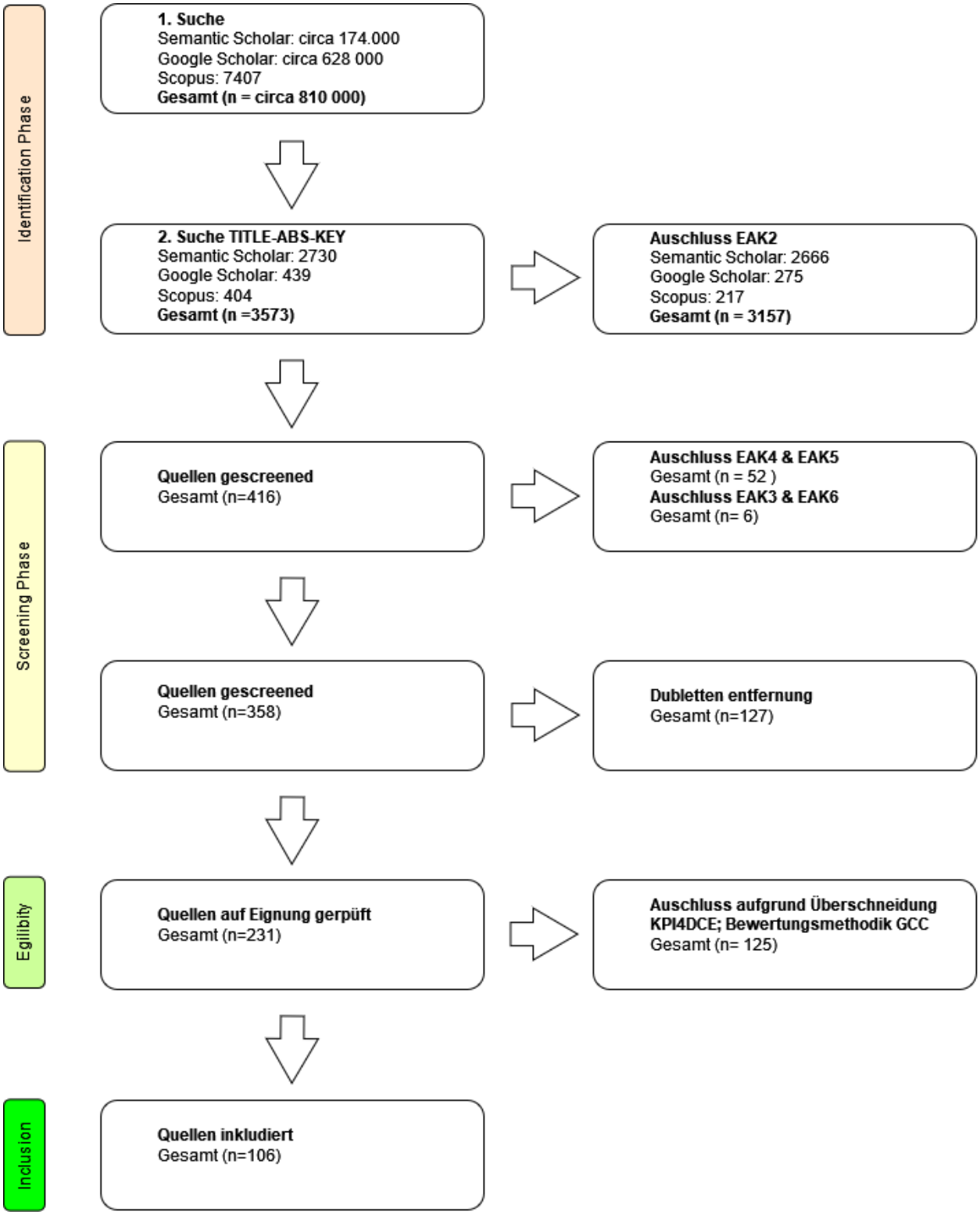


Abbildung 20: Schematische Darstellung der Literatursuche

5.4.4 Literaturanalyse

In der abschließenden Phase der systematischen Literaturrecherche nach Brocke et al. findet die Analyse der gefunden Publikationen statt. Es erfolgt nun die Bewertung und Analyse der

Publikationen anhand der Konzeptmatrix von Jane Webster und Richard T. Watson (2002) statt. Für die Analyse wurden im Rahmen des Theorieteil folgende Kriterien aufgenommen:

- **Green Cloud Charakteristika:** Energieeffizient, Virtualisierung, Multitenancy, Konsolidierung und umweltfreundlich
- **Auswirkung auf Bereiche laut KPI4CDE:** Abiotischer Rohstoffverbrauch (ADP), Kumulierter Energieaufwand (KEA), Treibhausgaspotenzial (THG), Wasserverbrauch
- **Lebensphase laut KPI4CDE:** *Herstellung*: IT (Server, Datenspeicher und Netzwerkgeräte), Anlagen zur unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) und Batterien; *Distribution*: IT, USV-Anlagen und Batterien; *Nutzung*: Energie-, Kältemittel- und Wasserverbrauch des Rechenzentrums; *Entsorgung*: IT, USV-Anlagen und Batterien
- **Digitale Infrastruktur nach SDIA:** Stromversorgung, Rechenzentrumsanalage, Netzwerk, Hardware, Ressourcenprovisionierung, Softwareapplikation
- **Normen relevant (nur ISO 22237 und 30134):** ISO/IEC 22237-1: Allgemeine Konzepte, ISO/IEC TS 22237-2: Gebäudekonstruktion, ISO/IEC 22237-3: Stromversorgung, ISO/IEC 22237-4: Regelung der Umgebungsbedingungen, ISO/IEC TS 22237-5: Infrastruktur der Telekommunikationsverkabelung, ISO/IEC TS 22237-6: Sicherungssysteme, ISO/IEC TS 22237-7: Informationen für das Management und den Betrieb, ISO/IEC 30134-1:2016 Überblick und allgemeine Anforderungen, ISO/IEC 30134-2:2016 Stromverbrauchseffektivität (PUE), ISO/IEC 30134-3:2016 Faktor für erneuerbare Energien (REF), ISO/IEC 30134-4:2017 Energieeffektivität von IT-Ausrüstung für Server (ITEEsv), ISO/IEC 30134-5:2017 IT-Ausrüstungsnutzungsgrad für Server (ITEUsv), ISO/IEC 30134-6:2021 Energie-Wiederverwendungs-Faktor (ERF), ISO/IEC 30134-7:2023 Kühleffizienz-Verhältnis (CER), ISO/IEC 30134-8:2022 Effektivität der Kohlenstoffnutzung (CUE),ISO/IEC 30134-9:2022 Wasserverbrauchseffizienz (WUE)
- **Verantwortungsbereich nach EU DC CoC:** Gebäude, Mechanische u. elektrische Anlagen, RZ-Fläche, IT-Schränke, IT (physisch), Betriebssystem / Virtualisierung, Software, Geschäftspraxis
- **Best Practices Areale nach EU DC CoC:** Einbindung von Organisationsgruppen, Allgemeine Richtlinien, Ausfallsicherheit und Provisionierung, Auswahl und Einsatz neuer IT-Ausrüstung, Einführung neuer IT-Dienste, Verwaltung bestehender IT-Ausrüstung und -Dienste, Datenverwaltung, Management der Kühlung, Einstellungen für Temperatur und Luftfeuchtigkeit, Freie und sparsame Kühlung, Hocheffiziente Kühlanlage, Computerraum-Klimageräte / Luftbehandlungsgeräte, Direkte Flüssigkeitskühlung, Wiederverwendung der Abwärme von Rechenzentren, Auswahl und Einsatz von neuen Stromversorgungsanlagen, Verwaltung bestehender Stromerzeugungsanlagen, Allgemeine Praktiken zum Stromsparen, Physikalischer Aufbau des Gebäudes, Geografischer Standort des Gebäudes, Wasserquellen, Messung des Energieverbrauchs und der Umweltbelastung, Erfassung und

Protokollierung des Energieverbrauchs und der Umweltbedingungen, Energieverbrauch und Umweltberichte, IT-Berichterstattung

Die Kriterien **Green Cloud Charakteristika, Auswirkung auf Bereiche laut KPI4CDE, Lebensphase laut KPI4CDE** sowie **Digitale Infrastruktur nach SDIA** sollen primär die Daten in einer Form aufarbeiten, damit diese auch durch nachfolgende wissenschaftliche Arbeiten genutzt werden können.

Da es sich aber um eine Masterarbeit im Rahmen einer Fachhochschule handelt, ist ein Praxistransfer der Ergebnisse angestrebt. Daher werden trotz vorhandener Überschneidungen die Kriterien **Normen relevant, Verantwortungsbereich nach EU DC CoC** sowie **Verantwortungsbereich nach EU DC CoC** übernommen. Sowohl ISO 22237 und 30134 sind durch Rechenzentrumsbetreiber zertifizierbar und das Joint Research Center verleiht jährlich Awards an Rechenzentrumsbetreiber, die den EU DC CoC besonders gut erfüllen. 2023 haben sowohl ATOS als auch T-Systems der Rechenzentrumsbetreiber von T-Mobile dies werbewirksam auf Ihren Homepages präsentiert. (Atos, 2023; T-Systems, 2023)

6 ERGEBNISSE

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die Ergebnisse der Empirik dieser Masterarbeit ausgewertet und anhand verschiedener Diagramme visualisiert. Im Rahmen in Kapitel 5 beschriebenen Vorgehensweise konnte die Anzahl der Publikationen auf 106 festgelegt werden. Diese wurden im Rahmen der Literaturanalyse schließlich im Detail betrachtet. Eine genaue Übersicht über die analysierten Quellen findet sich in **Literaturverzeichnis zur Literaturrecherche**. Im Folgenden werden die Ergebnisse dieser Literaturanalyse von unterschiedlichen Perspektiven aus analysiert und aufgeschlüsselt.

6.1 Matrixdarstellung der Literaturanalyse

Als finales Produkt für die weiteren Auswertungen und Darstellungen wurde eine Tabelle erstellt. Diese enthält alle 106 analysierten Publikationen und die entsprechend Kapitel 5.4.4 vorhandenen Kategorien für die Analyse und Bewertung. Die Tabelle kann wie alle anderen Tabellen dem der virtuellen Abgabe beigelegten ZIP entnommen. Für die Nachvollziehbarkeit soll anhand der Abbildung 21 der zugrundeliegende Aufbau beschrieben werden. In der Spalte A werden vertikal werden die einzelnen Publikationen und ihre Zuordnungen aufgetragen. In den Zeilen, werden horizontal die einzelnen Analysekriterien dargestellt. In diesem beispielhaften Ausschnitt sind die Einschluss- und Ausschlusskriterien, die Suchmaschinen, Datenbanken, Anzahl der Zitationen sowie die Green Cloud Charakteristika und die Auswirkung auf Bereiche laut KPI4CDE erkennbar.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
1						E/A Kriterien							Green Cloud Charakteristika					Auswirkung auf Bereiche laut KPI4CDE			
2																					
3	Titel	Erscheinungsjahr	Suchmaschine	Datenbank	Zitationen	EAK1	EAK2	EAK3	EAK4	EAK5	EAK6	EAK7	Energieeffizient	Virtualisierung	Multitenancy	Konsolidierung	umweltfreundlich	ADP	KEA	THG	WV
4															88					37	
5						106	106	106	106	106	27	27	22	18	9	18	21	0	23	10	4
6	Attitude's mediating effect on intentio	2017	Google Scholar	Journal of Information Systen	9	1	1	1	1	1	1	0									
7	SaaS cloud computing as a means of Gr	2017	Google Scholar	Journal of Information Systen	11	1	1	1	1	1	1	0									
8	Energy-efficient Virtual Machine Alloca	2019	Google Scholar	Springer	43	1	1	1	1	1	1	1	1	1			1		1		
9	A novel energy-aware resource manag	2020	Google Scholar	ScienceDirect	64	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1		1	1	
10	Energy-efficient cloud data center with	2021	Google Scholar	Springer	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1		
11	A Green Energy-aware task scheduling	2019	Google Scholar	Journal of Advances in Compu	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1			1		
12	Better Transmission of Information	2020	Google Scholar	Researchgate	12	1	1	1	1	1	1	1	1			1	1		1		1
13	A Novel Cost Optimization Method for	2019	Google Scholar	IEEE	19	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1		1	1	1
14	MeReg: Managing Energy-SLA Tradeoff	2017	Google Scholar	Hindawi	64	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1		1	1	
15	Elasticity Debt Analytics Exploitation fo	2018	Google Scholar	IEEE	16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	
16	Energy-aware task scheduling strategie	2018	Google Scholar	ACM	9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	
17	Edge Up Green Computing in Cloud Dat	2017	Google Scholar	International Journal of Adva	7	1	1	1	1	1	1	0									
18	System Architecture for Green Universi	2017	Google Scholar	Researchgate	6	1	1	1	1	1	1	0									
19	Can cloud computing be labeled as "gre	2017	Google Scholar	ScienceDirect	55	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1		
20	Gray Wolf Optimisation Based Energy E	2022	Google Scholar	Journal of Algebraic Statistics	8	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1		1		
21	Green Computing: An Era of Energy Sav	2021	Google Scholar	MECS	14	1	1	1	1	1	1	1	1				1		1	1	
22	Maximum Correlationwith Migration C	2018	Google Scholar	IEEE	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1			1		
23	A Study on Energy Efficient VM Allocati	2018	Google Scholar	Scope Database	7	1	1	1	1	1	1	1	1	1			1		1		
24	Challenges and Practices Identification	2021	Google Scholar	IEEE	6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1
25	Active & Idle Virtual Machine Migratior	2020	Google Scholar	IEEE	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1			1		1		
26	A Succinct Review Of Intelligent Compu	2020	Google Scholar	IEEE	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	
27	Understand the Application of Efficient	2022	Google Scholar	IEEE	5	1	1	1	1	1	1	1					1		1	1	1
28	Green Cloud Computing: Efficient Ener	2018	Google Scholar	Researchgate	16	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1		1		
29	Energy Saving from Cloud Resources fo	2018	Google Scholar	Journal of Cyber Security and	9	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1		1	1	
30	Consolidating VMs in Green Cloud Com	2018	Google Scholar	ACM	17	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1		1		
31	A Predictive Anti-Correlated Virtual Ma	2018	Google Scholar	IEEE	18	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1		1		
32	SLA-driven container consolidation wit	2019	Google Scholar	Springer	19	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1		

... | Liste Gesamt_ohne_Duplikate | Auswertungstabelle_befüllt | Konzepte und Ideen | Nach Suchmaschine

Abbildung 21: Ausschnitt aus der Auswertungsmatrix der Literaturanalyse

6.2 Ergebnisse nach Suchmaschinen

Insgesamt wurden 3 unterschiedliche wissenschaftliche Suchmaschinen genutzt. Dabei wurde zuerst mit Google Scholar begonnen. Danach wurde eine Suche in Scopus durchgeführt und abschließend in Semantic Scholar. Bei der Bereinigung der Dubletten wurden die Daten entsprechend der Abfolge im Excelsheet eingetragen. Nach der Anwendung der EAK sowie der

Bereinigung der Daten und der Reduktion auf den Publikationszeitraum von 2017 bis 2023 durch die Suchmaschinen, konnten die Ergebnis von Google Scholar um 40,6 Prozentpunkte an weitere Publikationen angereichert werden durch Scopus. Dabei handelt es sich um Publikationen die nicht über Google Scholar gefunden werden konnten. Zu den Ergebnissen von Google Scholar erweitert um jene von Scopus konnten dann mit Semantic Scholar nochmal 3,7 Prozentpunkte an Publikationen hinzugefügt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit können die Annahmen von Giustini und Boulos (2013) in ***Google Scholar is not enough to be used alone for systematic reviews*** für den eingeschränkten Untersuchungsrahmen bestätigt werden. Durch die Nutzung zusätzlicher Suchmaschinen konnte der Korpus der Publikationen für die Literaturanalyse nach Brocke et al. (2009) erweitert werden.

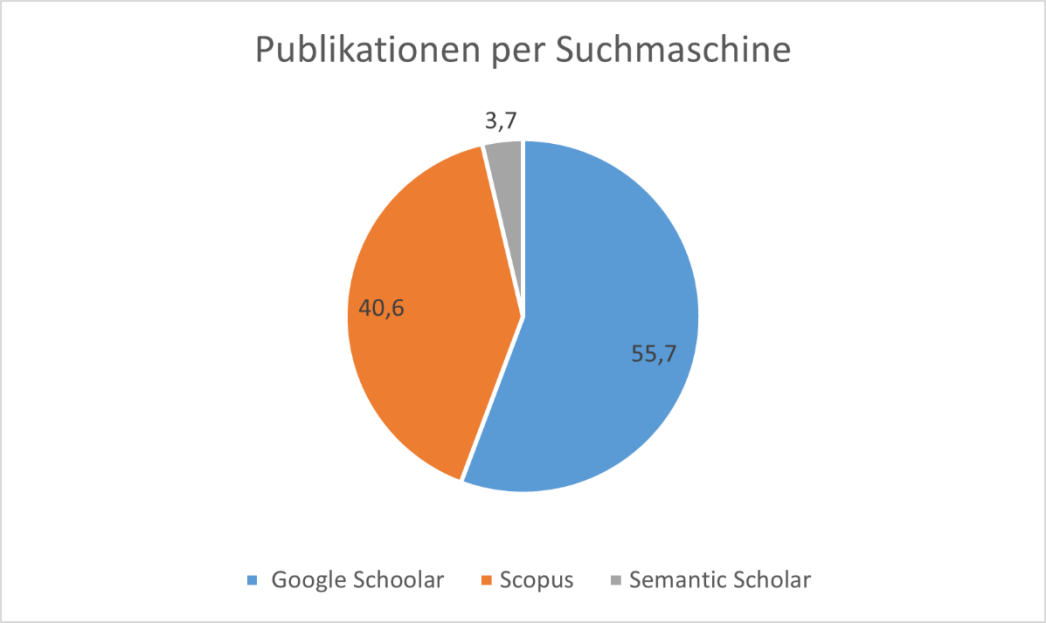


Abbildung 22: Prozentuelle Verteilung der Publikationen nach Suchmaschinen

6.3 Publikationen nach Jahr der Veröffentlichung und Datenbank / Publisher

Nachfolgend sind die Publikationen pro Jahr aufgegliedert, die in der systematischen Literaturrecherche analysiert wurden. Die Publikationen haben in den Jahren 2017 und 2018 zwar einen Höhepunkt, aber auch im Jahr 2021 mit 16,1 Prozent alles Publikationen ist das Forschungsinteresse weiterhin vorhanden. Leider konnten aufgrund einiger Paywalls insbesondere beim Springerverlag, keine weiteren Publikationen aus dem Jahr 2023 herangezogen werden.

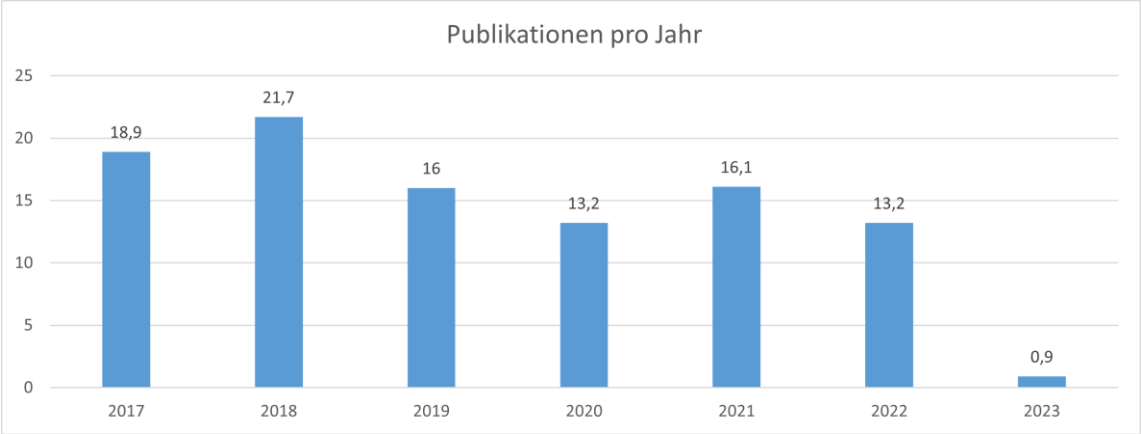


Abbildung 23: Prozentuelle Verteilung der Publikationen pro Jahr

In Abbildung 24 ist ersichtlich, dass 29 unterschiedliche Datenbanken und Publisher verwendet wurden, um Publikationen zu beziehen. Wobei IEEE mit 32,9 Prozent. Springer mit 19,7 Prozent und ScienceDirect mit 10,2 Prozent aller Publikationen die ersten drei Plätze belegen.

Dennoch kann festgestellt werden, dass aufgrund der unterschiedlichen Suchparameter und Suchmaschinen eine Bandbreite von verschiedenen Publishern herangezogen wurden, um etwaige Bias der Publisher entgegenzuwirken.

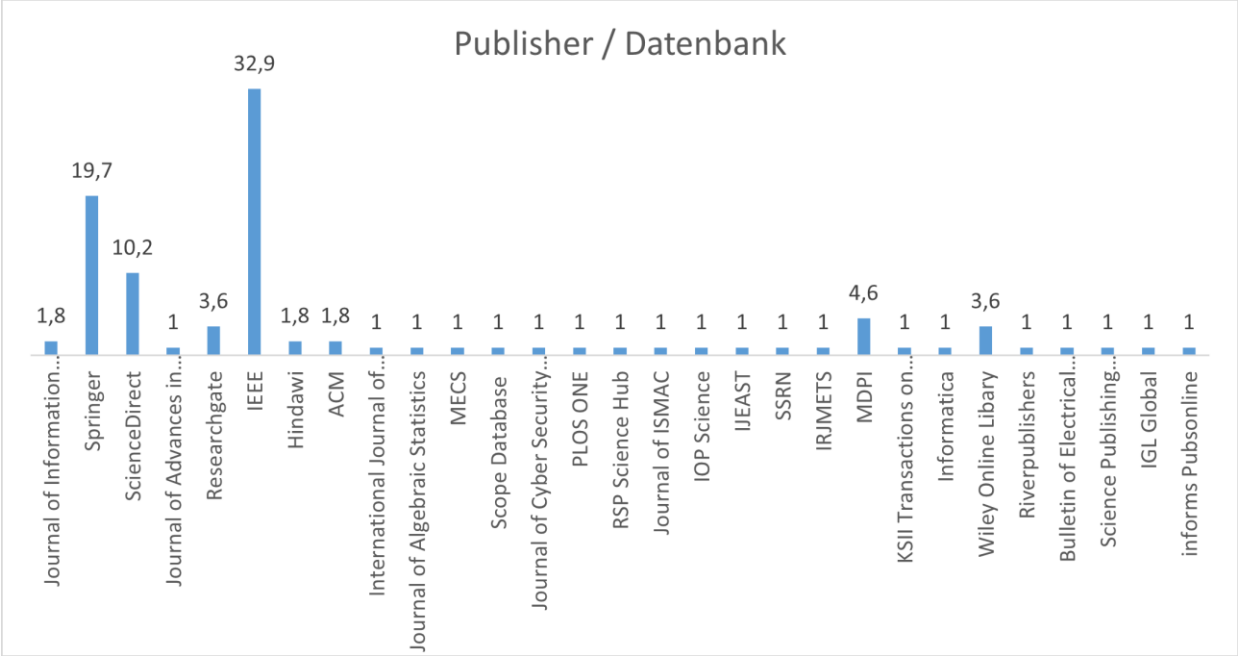


Abbildung 24: Prozentuelle Verteilung der Publikationen nach Publisher bzw. Datenbank

6.4 Ergebnisse nach Kriterium Green Cloud Charakteristika

Im Rahmen der Literaturanalyse nach Brocke et al. (2009) und der Auswertung anhand der in Kapitel 3.2 Charakteristika präsentierenten Themen, sind ins besonders die Parameter Energieeffizient und Virtualisierung jene mit den meisten Publikationen. Mit 36,8 Prozent aller

Publikationen ist der Parameter Multitenancy jener mit den geringsten Publikationen. Viele Publikationen beschäftigen sich mit mehreren Charakteristika gleichzeitig.

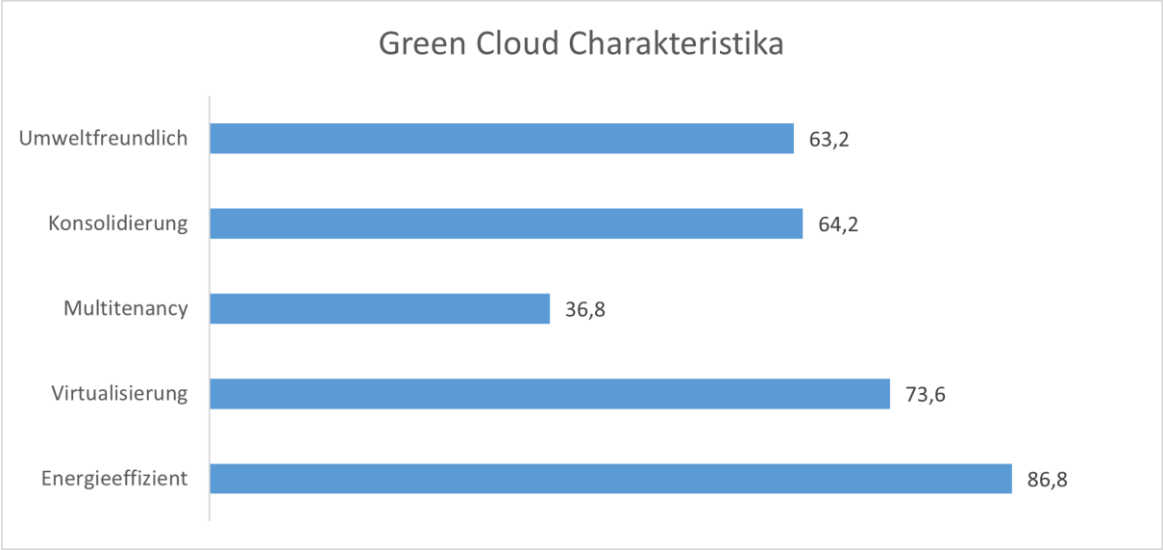


Abbildung 25: Prozentuelle Verteilung der Publikationen die sich mit einem oder mehreren Green Cloud Charakteristika beschäftigen

6.5 Ergebnisse nach Auswirkung auf Bereiche laut KPI4CDE

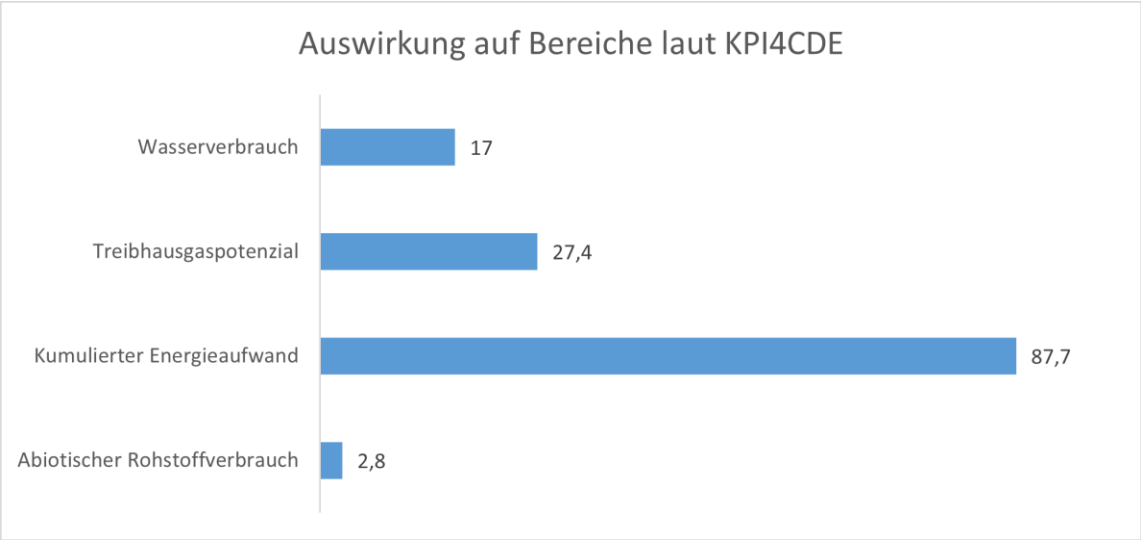


Abbildung 26: Prozentuelle Verteilung der Publikationen nach Auswirkung auf die Bereiche laut KPI4CDE

Entsprechend des in KPI4CDE Projekt von Björn Schödwell et al. (2017) und GCC von Jens Gröger et al. (2021) festgestellten Fokus auf Energieaufwand gestaltet sich auch im Rahmen dieser Masterarbeit ein ähnliches Ergebnisse. Auf die in Kapitel 4.3.2 beschriebenen Auswirkungen ergibt sich nachfolgende Aufschlüsselung. Der Abiotische Rohstoffverbrauch wird von 2,8 Prozent der Publikationen untersucht, der Wasserverbrauch von 17 Prozent und das Treibhausgaspotenzial von 27,4 Prozent. Mit aufgerundet 87,7 Prozent beschäftigen sich die meisten Publikationen mit dem Kumulierten Energieaufwand. Einige Publikationen beschäftigen sich mit mehreren der Themen gleichzeitig.

6.6 Ergebnisse nach Lebensphase laut KPI4CDE

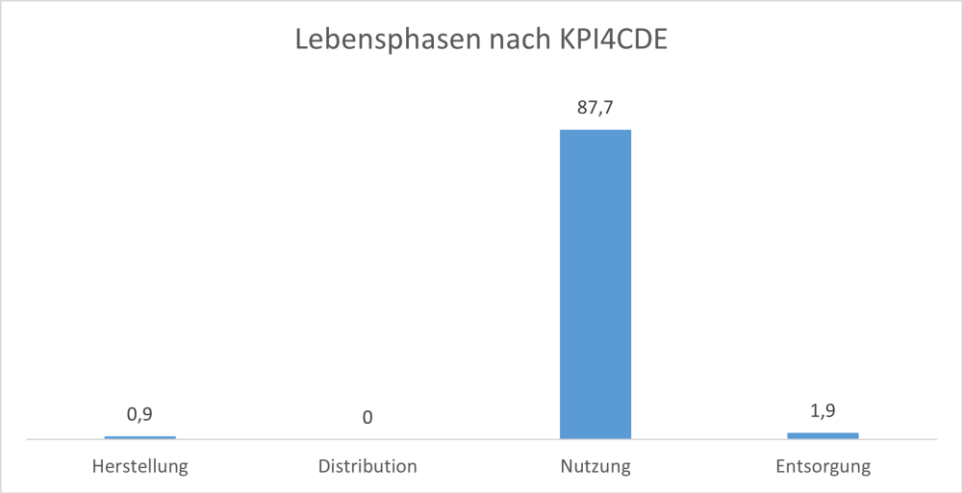


Abbildung 27: Prozentuelle Verteilung der Publikationen die sich mit Lebensphase laut KPI4CDE beschäftigen

Die Lebensphasen Herstellung, Entsorgung sowie Distribution werden von unter 3 Prozent aller Publikationen bearbeitet. 87,7 Prozent aller untersuchten Publikationen beschäftigten sich mit der Nutzungsphase nach KPI4CDE. Die Nutzungsphasen selbst und deren Erläuterung kann in Kapitel 4.3.1 nachgelesen werden. Einige Publikationen die systematische Literaturanalyse sind oder für die Begriffsdefinition dienen, können keine der Phasen zugeordnet werden

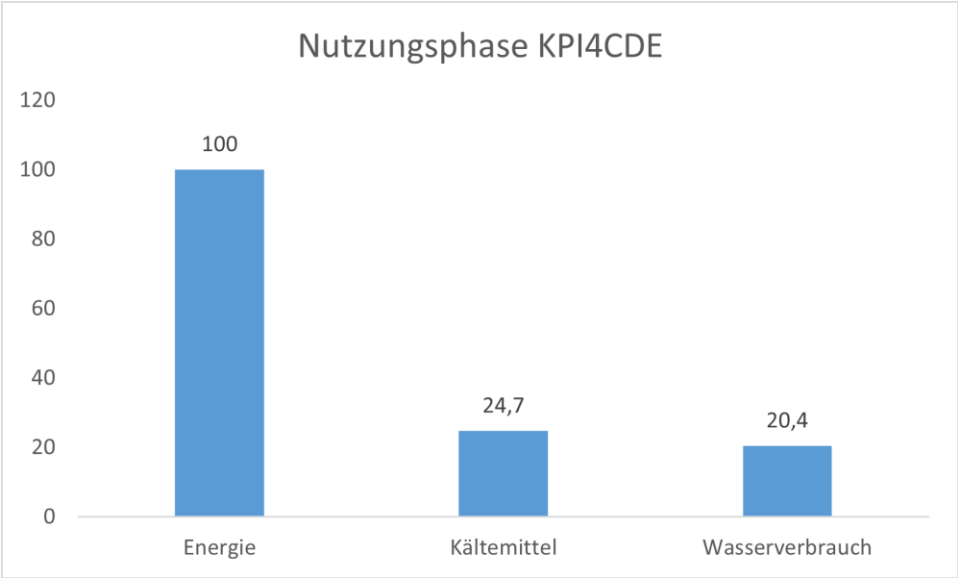


Abbildung 28: Prozentuelle Verteilung der Publikationen in der Nutzungsphase nach KPI4CDE

Von jenen Publikationen, die der Nutzungsphase zugeordnet werden können, bearbeiten 100 Prozent das Thema Energie, 24,7 das Thema Kältemittel und 20,4 Prozent das Thema Wasserverbrauch. Verschiedene Publikationen behandeln mehrere der Themen dadurch entsteht auch die in Abbildung 28 dargestellte Verteilung.

6.7 Ergebnisse nach Bereich der digitalen Infrastruktur nach SDIA

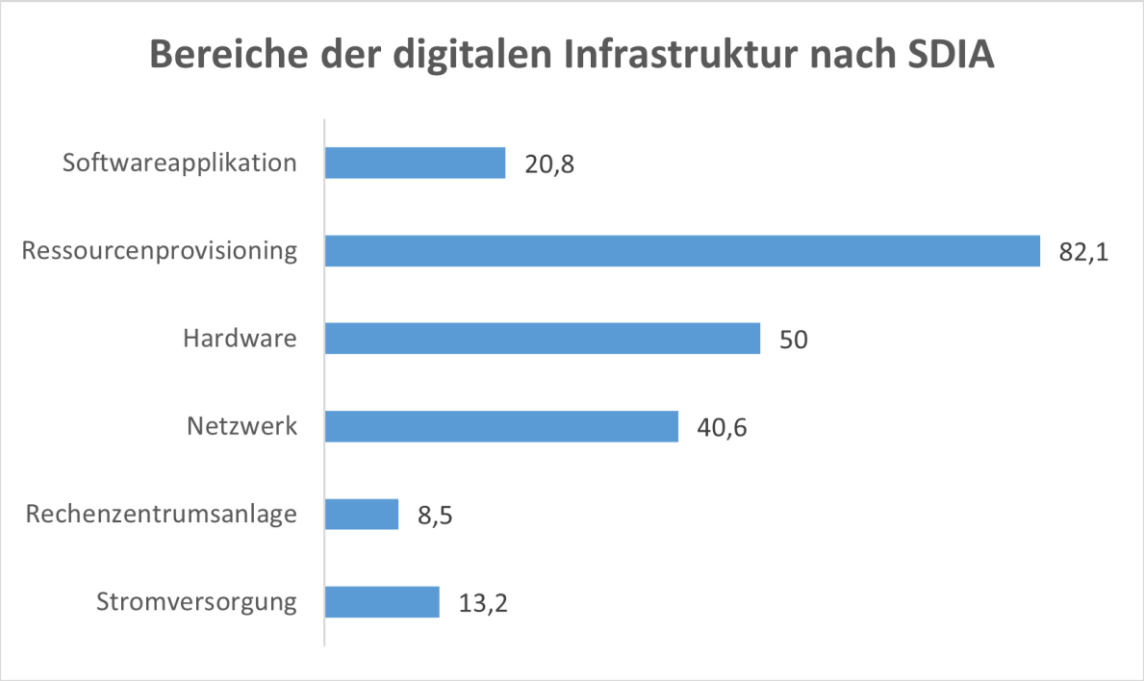


Abbildung 29: Prozentuelle Verteilung der Publikationen nach Bereichen der digitalen Infrastruktur nach SDIA

Bei der Auswertung nach den Bereichen der digitalen Infrastruktur nach SDIA deren Erläuterung in Kapitel 3.1 Taxonomie erfolgt, zeigt sich das 82,1 Prozent aller Publikationen, sich auf Ressourcenprovisioning fokussieren. Die Rechenzentrumsanlage als Untersuchungsgebiet haben hingegen nur 8,5 Prozent der Publikationen als Forschungsgebiet. Verschiedene Publikationen untersuchen mehrere der Bereiche der digitalen Infrastruktur nach SDIA gleichzeitig.

6.8 Ergebnisse nach Revelanz für die Normen (ISO 22237 und ISO 30134)

Entsprechend der in den Kapitel 4.1.1 EN 50600 Serie und ISO/IEC 2237 Serie und Kapitel 4.1.2 ISO/IEC 30134 Serie ergeben sich für die Literaturrecherche die in Abbildung 30 dargestellten Ergebnisse.

Anhand der Anzahl der Publikationen sind ein Großteil davon für ISO/IEC 30134 Serie relevant. Innerhalb der ISO/IEC 30134 Serie sind die drei Unterkapitel mit den meisten Puplikationen folgende:

- 92 ISO/IEC 30134-2:2016 Stromverbrauchseffektivität (PUE)
- 89 ISO/IEC 30134-4:2017 Energieeffektivität von IT-Ausrüstung für Server (ITEEsv)
- 67 ISO/IEC 30134-5:2017 IT-Ausrüstungsnutzungsgrad für Server (ITEUsv)

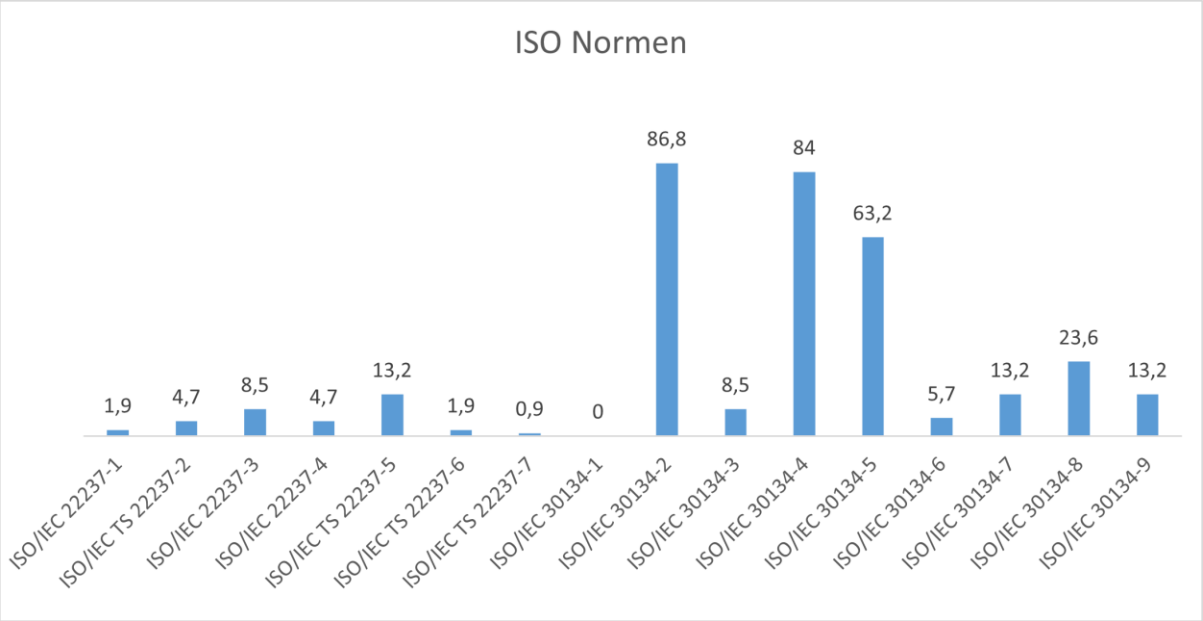


Abbildung 30: Prozentuelle Verteilung der Publikationen nach ISO Normen ISO/IEC 30134 und ISO/IEC 2237

Auch in diesem Bereich sind die Ergebnisse verschiedenen Publikationen für mehrere Normen relevant.

6.9 Ergebnisse nach Verantwortungsbereich nach EU DC CoC

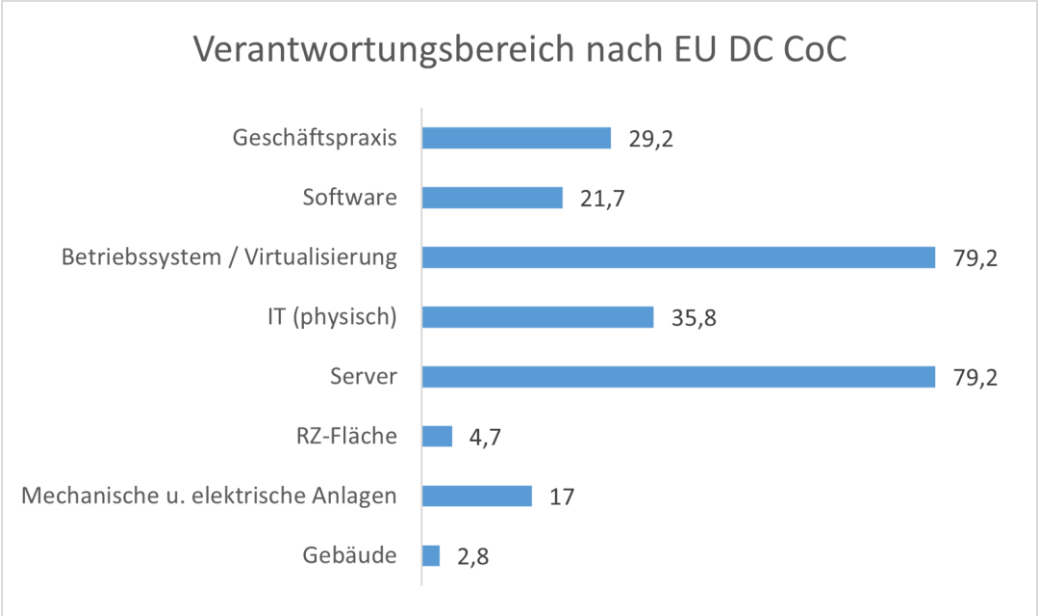


Abbildung 31: Prozentuelle Verteilung der Publikationen entsprechend der Verantwortungsbereichen nach EU DC CoC

In Abbildung 31 ist die Prozentuelle Verteilung der Publikationen nach den Verantwortungsbereichen des EU DC CoC dargestellt. Die Verantworungsbereiche können in Kapitel 4.4.3 2023 Best Practice Guidelines for the EU Code of Conduct on Data Centre Energy Efficiency nachgeschlagen werden. Auffällig ist, dass die Verantwortungsbereiche

Rechenzentrumsfläche und Gebäude jeweils nur von 4,7 und 2,8 Prozent der Publikationen bearbeitetet wurden. Publikationen beschäftigen sich oft mit mehreren Verantwortungsbereichen nach EU DC CoC.

6.10 Ergebnisse nach Arealen bzw. Bereichen und Unterbereiche im Assessment Framework nach EU DC CoC

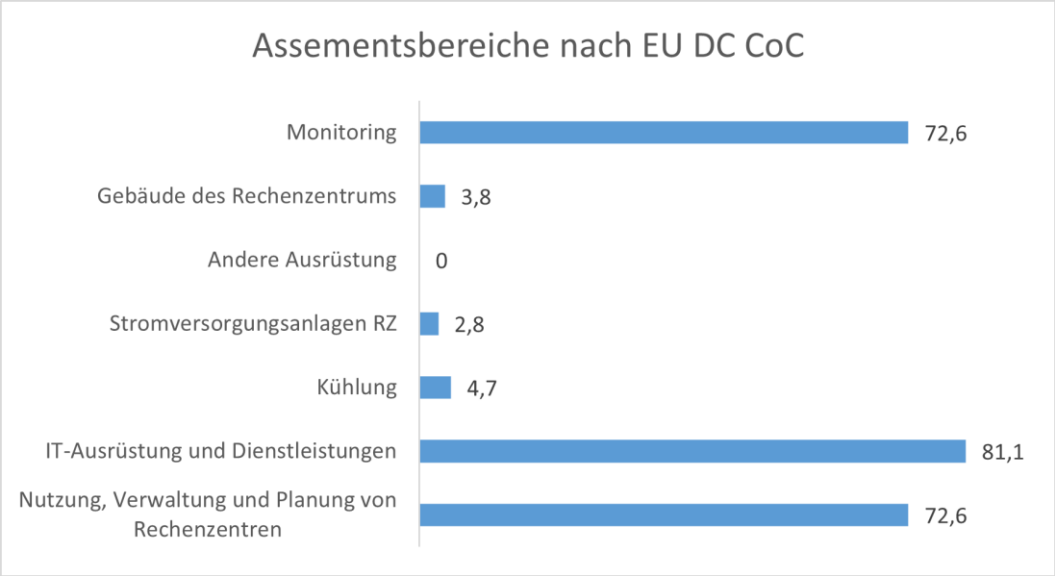


Abbildung 32: Prozentuelle Verteilung Publikationen nach Assementsbereiche nach EU DC CoC

Im Rahmen der erfolgten Analyse ergibt sich folgendes Bild das die Assessment-Bereiche Monitoring, IT-Ausrüstung und Dienstleistungen sowie Nutzung, Verwaltung und Planung von Rechenzentren den höchsten prozentuellen Anteil mit wissenschaftlichen Publikationen aufweisen.

Publikationen können aber in mehrere Assessmentbereiche bzw. Unterbereiche fallen.

Bei genauerer Analyse fallen aber ein Großteil aller Publikationen auf die in Abbildung 32 dargestellten Unterbereiche. Erst danach folgt mit 17,9 Prozent Publikationen der Unterbereich *Energieverbrauch und Umweltberichte*. Für eine genaue Erläuterung der Assementbereich und deren Unterbereiche kann Anhang D überprüft werden.

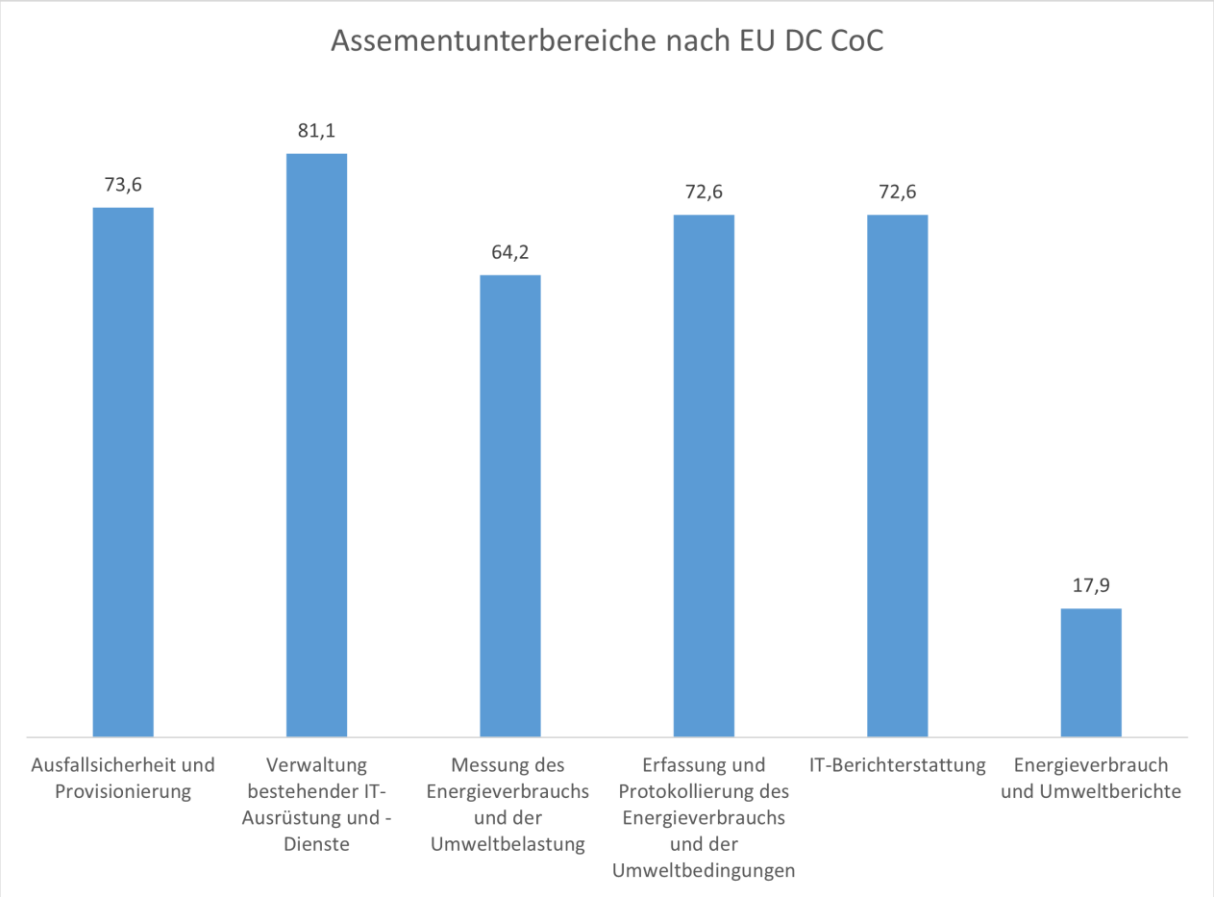


Abbildung 33: Prozentuelle Verteilung der Publikationen nach Unterbereichen im Assementframework nach EU DC CoC

7 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Im nachfolgenden Kapitel werden die Grundlagen, Parameter und Aspekte der bisherigen Arbeit zusammengefasst. Die Ergebnisse der Theoriearbeit und der Literaturanalyse werden interpretiert und zur Hypothesenprüfung verwendet. Entsprechend des im Kapitel 1 definierten Zielsetzung werden dann Handlungsempfehlungen für Cloudanbieter in Österreich erstellt. Im Rahmen dessen erfolgt auch die Beantwortung der Forschungsfrage. Danach erfolgt eine Kritische Würdigung und Reflexion der vorliegenden Masterarbeit, um die vorhandenen Limitationen und Schwächen des Forschungsdesign aufzuzeigen. Das abschließende sind Empfehlungen für etwaige Forschungsfelder.

7.1 Aufgabenstellung und Zusammenfassenfassung

Diese Arbeit setzt sich aus einem theoretischen Teil und einem methodischen Teil zusammen. Im theoretischen Teil der Arbeit wurde die Forschungsfrage herauskristallisiert, aufgrund der zuvor skizzierten Problemstellung und Motivation. Basierend darauf wurden vier Hypothesen gebildet, die im direkten Zusammenhang mit der Forschungsfragen stehen. Die Beantwortung der Forschungsfrage ist neben der Entwicklung von Handlungsempfehlungen das primäre Ziel dieser Masterarbeit.

Für die methodische Bearbeitung des Themas war es notwendig, eine theoretische Grundlage auszuarbeiten, eine Abgrenzung des Themas durchzuführen, sowie notwendige Begriffe anhand von wissenschaftlichen Publikationen und vorhandenen Quellen zu definieren. Kapitel 2 beschreibt daher die notwendigen fundamentalen Charakteristika die Cloud Computing ermöglicht haben, welche Servicemodelle durch Cloud Service Provider angeboten werden, sowie in welchen Bereitstellungsmodellen die Cloud auftreten kann.

Kapitel 3 und Kapitel 4 definieren dann genauer Green Cloud Computing und Green Datacenter. Es werden dabei verschiedene Initiativen und Forschungsprojekte, die bereits zur Thematik vorhanden sind, präsentiert und zusammengefasst. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Präsentation der Maßnahmen, Programmen und Richtlinien, die innerhalb der europäischen Union vorhanden sind. Anhand dieser Ergebnisse werden dann für den methodischen Teil bereits Kategorien gebildet sowie Themenschwerpunkte gesetzt.

In den darauffolgenden Kapitel 5 wird die Methodik und das Vorgehen der systematischen Literaturanalyse nach Brocke et al. (2009) beschrieben. Die vorgenommene Erweiterung um die PRISMA Methode die von Moher et al. (2009) erstellt wurde und von Page et al. (2021) erweitert. Nachfolgend wurde dann anhand methodischen Grundlagen das eigene weitere Vorgehen und die Paramater einer Konzeptmatrix nach Watson und Webster (2020) präsentiert.

In Kapitel 6 wurden die Ergebnisse visualisiert und präsentiert als Grundlage für das Kapitel 7. In Kapitel 7 erfolgt nun die Analyse, Hypothesenprüfung sowie die Herleitung der Handlungsempfehlungen.

7.2 Interpretation der Ergebnisse

Im Rahmen dieses Kapitel werden nun die Ergebnisse aus den Kapitel 6 in Bezug auf den zuvor erfolgten Theorieteil in Kontext gesetzt. Dies dient zu weiterer Aufbereitung für die nachfolgende Hypothesenprüfung.

Besonders auffällig ist der in Kapitel 6.5 geringe Wert an Publikationen, die sich mit dem abiotischen Rohstoffverbrauch beschäftigten. Dies deckt sich auch sowohl mit dem Fokus der ISO-Normen in Kapitel 4.1.1 und 4.1.2, des EU DC CoC in Kapitel 4.4.3 und 4.4.4 sowie der Darstellung der Maßnahmen der Marktführer die in Kapitel 4.2 beschrieben wurden. Ein möglicher Schluss dabei ist, dass diese Themen durch die Suchstrings nicht korrekt abgedeckt wurden, bzw. Publikationen noch nicht mit den Keywords versehen wurden. Ein weiterer Gesichtspunkt ist, dass dieses Thema bisher noch nicht direkt in Verbindung mit Cloud Computing wahrgenommen wurde.

Aufbauend darauf zeigt sich in Kapitel 6.6 ein ähnliches Bild, das ein Großteil der Publikationen einen Fokus auf die Nutzungsphase liegt. Sowohl die Herstellung, Distribution als auch Entsorgung werden kaum durch Publikationen bearbeitet. Dies entspricht dem Bild von Kapitel 6.5 das kaum abiotischer Rohstoffverbrauch wissenschaftlich untersucht wird, da dieser primär in diesen Phasen anfällt. Auch in der Nutzungsphase liegt der primäre Fokus auf die Energienutzung und deutlich geringer auf Kältemittel für die Kühlung und Wasserverbrauch. Da die Marktführer insbesondere Microsoft und AWS beide aber den Wasserverbrauch spezifisch aufgenommen, in haben den letzten Jahresumweltberichten, gibt es möglicherweise ein erhöhtes Forschungsinteresse in den nächsten Jahren zu diesem Thema.

Kapitel 6.7 zeigt einen starken Fokus auf die direkt im Einflussgebiet der Cloudanbieter liegenden Themen Ressourcenprovisionierung, Hardware, sowie Netzwerk. Auch in diesem Fall wäre ein möglicher auslösender Faktor die genutzten Suchstrings im Rahmen der Literaturanalyse. Desweiteren ist die SDIA als Interessensgemeinschaft erst im Februar 2020 gegründet worden. (Sustainable Digital Infrastructure Alliance e.V., Colonnaden 5, 20354 Hamburg, Deutschland)

In Kapitel 6.8 gibt es bei den Publikationen einen Fokus auf verschiedene Bereiche in der ISO/IEC 30134 Serie, da sich die ISO/IEC 22237 Serie primär auf die Bereiche des Aufbau des Rechenzentrums fokussiert, entspricht das Ergebnis jenen aus den vorangegangen Kapiteln.

Die Kapitel 6.9 und 6.10 die beiden Analysen im Rahmen des EU DC CoC beinhalten bestätigen das Bild der Schwerpunktsetzung im Rahmen der unterschiedlichen Publikationen auf Server, Virtualisierung sowie die damit einhergehenden Monitoringmaßnahmen.

Aufgrund der vorhandenen Ergebnisse der Literaturanalyse wäre ein möglicher Interpretationsschluss das Green Cloud Computing als Forschungsfeld bisher noch nicht sämtliche Lebensphasen bzw. betroffenen Themenfelder beinhaltet. Eine Änderung die möglicherweise Auswirkungen auf die Ergebnisse hat ist das Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on Corporate Sustainability Due Diligence and amending Directive (EU) 2019/1937. (European Commission, 2022)

Auch durch die Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD) der europäischen Union sowie die Bemühungen der Marktführer die gesamte Bandbreite der ökologischen Auswirkungen des Cloud Computing darzustellen (siehe dazu Kapitel 4.2.2) könnte die Literaturanalyse mit denselben Keywords und Suchstrings innerhalb von wenigen Jahren bereits andere Ergebnisse ergeben. (Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD), 2022)

Aufgrund der nachfolgenden Hypothesenprüfung in Kapitel 7.3 müssen einige Ergebnisse der Publikationen exemplarisch dargestellt werden. Für den Bereich Hardware sind im **ANHANG J - Energieeffizienz Technik – Hardwarelevel** 3 Energieeffizientechniken angeführt. Sohaib Ajmal et al. (2021) konnten mit Ihrer vorgeschlagenen Algorithmus *„Cost-based Energy Efficient Scheduling Technique for Dynamic Volage Frequency Scaling (DVFS) Systems (CEEST)“* eine Einsparung von bis zu 30 % Energie im Vergleich zu bestehenden Algorithmen erreichen. Auch die Auslastung der Ressourcen wird deutlich um 30 % erhöht. Was die SLA-Verletzungen angeht, so hat der vorgeschlagene Algorithmus die SLA-Verletzungen um bis zu 50 % reduziert.

Für den Bereich der VM-Konsolidierungstechniken werden im **ANHANG K -Energieeffizienz Technik – VM Konsolidierung Level**, exemplarisch 5 Techniken und Algorithmen sowie die Ergebnisse der Unterschungen und Einsparungsergebnisse dargestellt. Die *VM Scheduling for Efficient Dynamically Migrated VM (VMS-EDMVM)* von S. Supreeth (2022) konnte in Simulation mit einer SLA-Verletzungsrate von 0,1%, einem Energieverbrauch von 104,45 KWH und lediglich 2202 VM-Migrationen eine signifikanten Verbesserungen gegenüber den Vergleichsalgorithmen in Bezug auf den Energieverbrauch, SLA Verletzungen und VM Migrationen erreichen.

Im Rahmen der Literaturanalyse konnte eruiert werden, das 8,5 Prozent aller Publikationen entweder Task Allokation oder Task Scheduling bereits im Titel enthalten oder als primäres Forschungsthema bearbeiteten. Alle diese Forschungsarbeiten haben als Zielsetzung die Optimierung der Energienutzung und der Energieeinsparung. Die letzte spezifische Forschungsarbeit ***Research on strong agile response task scheduling optimization enhancement with optimal resource usage in green cloud computing*** von Shu et al. (2021) und die vorgeschlagene Technik **Strong agile response optimization (SARO) für Task scheduling** basierend auf **Immune clonal selection algorithm (ICSA)** zeigen gute Leistung in Bezug auf Konvergenzgeschwindigkeit, Ausführungszeit, Zuverlässigkeit, Stabilität, Optimierung des Energieverbrauchs sowie CPU Auslastung im Vergleich zu den Testalgorithmen. Weitere Informationen zu SARO können **ANHANG K -Energieeffizienz Technik – VM Konsolidierung Level** entnommen werden.

7.3 Hypothesenprüfung

Nach der Interpretation in Kapitel 7.2 erfolgt nun im Rahmen dieses Unterkapitel die Prüfung der zu Beginn der Masterarbeit aufgestellten Hypothesen. Die Nullhypothese und die

Alternativhypothese zu den Hypothese H1 bis H4 werden nochmal beschrieben und dann entweder bestätigt oder bei Bedarf verworfen.

7.3.1 H1

H1-0: Im Cloud Computing erfolgt bereits die Energie effizienteste Nutzung der Hardware im Rechenzentrum aufgrund des Kostenfaktors.

H1-1: Ein verstärkter Einsatz energieeffizienter Nutzung der Hardware im Green Cloud Computing führt zu einer signifikanten Reduzierung des ökologischen Fußabdrucks.

in Kapitel 6.7, wie in Abbildung 29 dargestellt, wurde erhoben, dass sich 50 Prozent aller Publikationen nach wie vor mit dem Themengebiet Hardware und der energieeffizienten Nutzung von Hardware in Rechenzentren befassen. Kapitel 7.2 und ANHANG J - Energieeffizienz Technik – Hardwarelevel präsentieren spezifische Algorithmen aus der Forschung und deren Wirkungsgrad. Diese neuartigen Algorithmen und Techniken können nach wie vor eine deutliche Verbesserung der Hardwarenutzung sowie Energieeinsparung ermöglichen. Aufgrund dieser Ergebnisse wird bei H1 die Nullhypothese verworfen und die Alternativhypothese bestätigt.

7.3.2 H2

H2-0: Cloud-Ressourcen und -Workloads können nicht mehr optimiert werden.

H2-1: Die Optimierung von Cloud-Ressourcen und -Workloads im Green Cloud Computing trägt zu einer Steigerung der Effizienz, Leistung und einer Reduzierung des Energieverbrauchs bei.

In der Analyse von Kapitel 6.4 und in Abbildung 25 zeigt sich, dass sich 64,2 Prozent aller untersuchten Publikationen der Thematik der Konsolidierung von Workloads und Cloud-Ressourcen widmen. Kapitel 7.2 und ANHANG K - Energieeffizienz Technik – VM Konsolidierung Level präsentieren die Ergebnisse und Einsparungspotenziale verschiedener Techniken und Algorithmen. Aufgrund dieser Ergebnisse wird bei H2 die Nullhypothese verworfen und die Alternativhypothese bestätigt.

7.3.3 H3

H3-0: Im Cloud Computing sind durch bestehende Algorithmen und Prozeduren die Task-Allokationen bereits maximal optimiert.

H3-1: Neue Algorithmen und Prozeduren im Green Cloud Computing können Effizienz- und Leistungsverbesserungen sowie eine optimierte Allokation von Tasks in Rechenzentren ermöglichen, um eine maximale Energieausnutzung zu gewährleisten.

Die Überprüfung der H3 basiert auf den Ergebnissen der Literaturanalyse und den in Kapitel 7.2 dargestellten Ergebnissen. Dabei zeigt sich, dass sich lediglich 8,5 Prozent aller untersuchten

Publikationen mit Task-Allokationen und der maximalen Energieausnutzung beschäftigen. Aufgrund dieser Ergebnisse wird die Alternativhypothese H3-1 bestätigt.

7.3.4 H4

H4-0: Virtualisierungstechnologien besitzen keinen nennenswerten Vorteil mehr.

H4-1: Der verstärkte Einsatz von Virtualisierungstechnologien im Green Cloud Computing verbessert die Ressourcennutzung, Skalierbarkeit und Flexibilität von Cloud-Diensten.

In Kapitel 6.9, wie in Abbildung 31 dargestellt, ergab sich, dass sich 79,2 Prozent aller untersuchten Publikationen mit dem Verantwortungsbereich Betriebssysteme und Virtualisierung auseinandersetzen. Ebenso zeigen die Ergebnisse in Kapitel 6.4, wie in Abbildung 5 illustriert, dass sich 73,6 Prozent aller Publikationen spezifisch mit der Virtualisierung im Kontext von Cloud-Charakteristika befassen. Von den im Jahr 2022 veröffentlichten Publikationen, die sich mit Virtualisierung beschäftigen (9,4 Prozent), präsentieren 60 Prozent neue Modelle für die Virtualisierung zur Erreichung von Energieeinsparung und -effizienz.

Die Anhänge ANHANG I -Energieeffizienz-Technik – Softwarelevel) und ANHANG L - Energieeffizienz-Technik – Natur inspirierte Algorithmen stellen verschiedene Ergebnisse, Techniken und Algorithmen vor, die zu einer verbesserten Ressourcennutzung, Skalierbarkeit und Flexibilität führen.

Aufgrund dieser Erkenntnisse wird die Nullhypothese H4-0 verworfen und die Alternativhypothese H4-1 bestätigt.

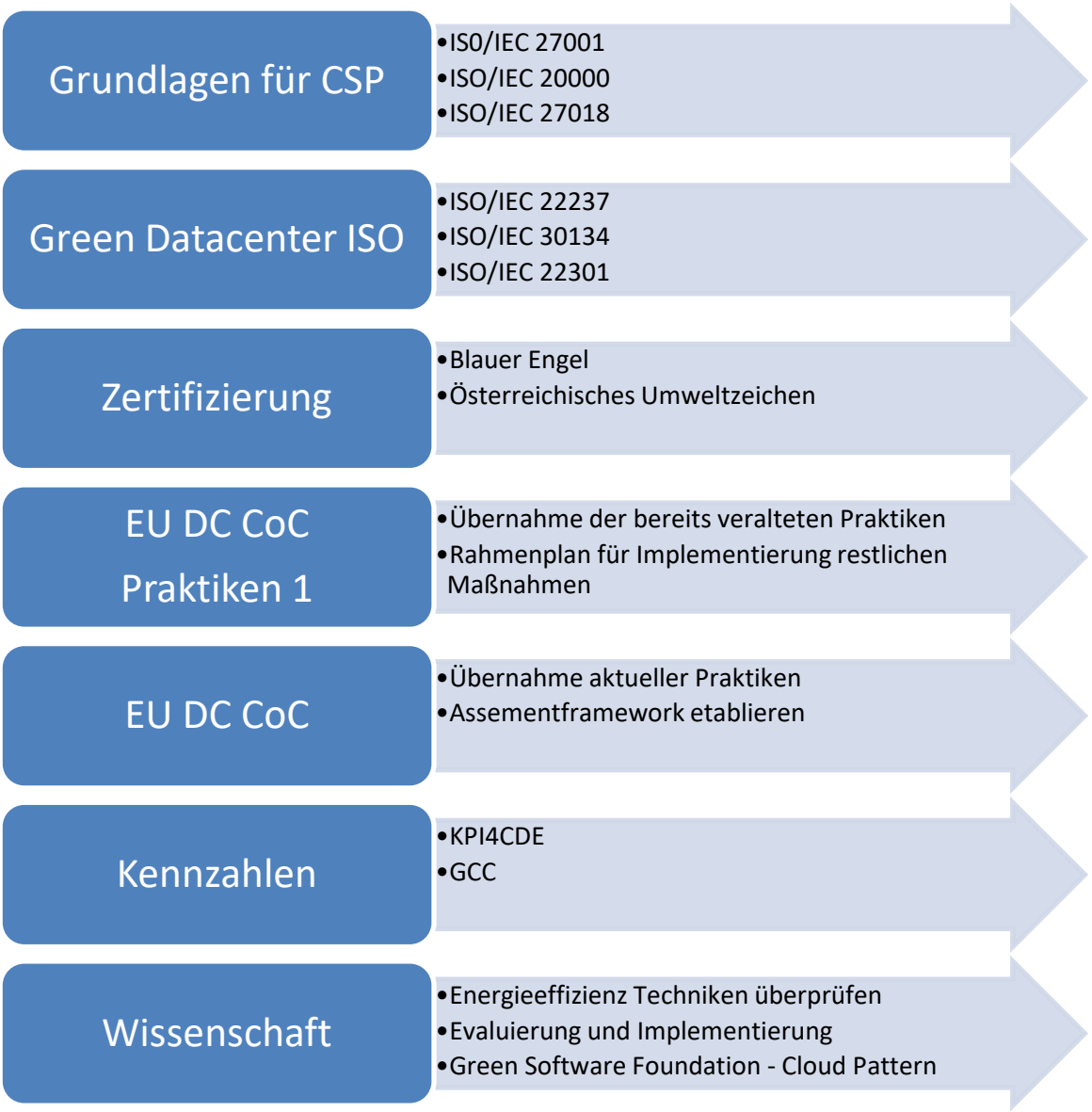
7.4 Konkrete Handlungsempfehlungen

Anhand der Ergebnisse in Kapitel 6 und einer detaillierten Analyse in Kapitel 7.2 wird deutlich, dass der aktuelle Fokus wissenschaftlicher Publikationen im Bereich Green Cloud Computing auf Virtualisierung, Algorithmen zur Optimierung, Konsolidierung und Migration liegt. Durch die Initiativen der Europäischen Union, bestehende Normen sowie Forschungsprojekte wie KPI4CDE und GCC können konkrete Handlungsempfehlungen für österreichische Cloudservice Provider skizziert werden.

In Österreich existieren verschiedene Cloudservice Provider mit unterschiedlichen Ansätzen zum Green Cloud Computing und möglichen Zertifizierungen. Eine exemplarische, nicht erschöpfende Auflistung enthält daher die folgenden Rechenzentren:

- Raiffeisen Rechenzentrum GmbH
- TIMEWARP IT Consulting GmbH
- Silenos

Je nach individuellem Rechenzentrum sind bereits unterschiedliche Maßnahmen umgesetzt. Zur Schaffung eines Mehrwerts und zur Unterstützung von Praktikern gemäß der Definition des Anwendungsbereichs in Kapitel 5.3.1 erfolgt im Anschluss die Ausarbeitung einer Roadmap.



Im ersten Schritt sollten Cloud Service Provider (CSP) in Österreich die allgemeinen ISO-Richtlinien und Zertifikate übernehmen, um den Kunden die erforderlichen Parameter vorlegen zu können und etwaige Sicherheitsbedenken bei der Migration in die Cloud auszuräumen. Als zweiten Schritt empfiehlt es sich, EN DIN 5006 bzw. ISO/IEC 22337 und ISO 3013e zu etablieren. In diesen Richtlinien, wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, sind verschiedene Maßnahmen und Praktiken für das Green Cloud Computing enthalten, insbesondere hinsichtlich Gebäude, Kühlung und Hardware.

Im dritten Schritt ist es ratsam, eine der beiden Zertifizierungen, entweder den "Blauen Engel" oder das österreichische Umweltzeichen, anzustreben und aktiv zu bewerben. (Blauer Engel, 2023; Blauer Engel - Das Umweltzeichen, Erstausgabe 2023; Österreichisches Umweltzeichen, 2021)

Darauf aufbauend sollten CSP in Österreich anstreben, in der Liste der CoC DC Partners geführt zu werden. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Masterarbeit war nur die A1 Telekom Austria AG mit den Rechenzentren in der Lassallestrasse 9A, 1020 Wien, Mitglied. Die Liste kann über folgenden Link eingesehen werden: CoC DC Partners | E3P (europa.eu)

COMPANY	N. DATA CENTRES	DATA CENTRES	YEAR REGISTERED	ADDRESS
BBBELL S.p.A.	1	1. Torino	2023	Corso svizzera 185, fabbricato 2 10149 Torino Italy
]init[AG	1	1. Berlin	2012	Köpenicker Str. 910997 Berlin Germany
A1 Telekom Austria AG	1	1. Wien 1 2. Wien 2	2012	Lassallestrasse 9A 1020 - Vienna Austria

Abbildung 34: Screenshot 01.12.2023 von European Energy Efficiency Plattform [E3P], 2023

Als erster Schritt ist es notwendig, die in den jährlich erscheinenden Best Practice Guidelines für den EU Code of Conduct on Data Centre Energy Efficiency, speziell im Punkt 10 ("Practices to become minimum expected"), aufgeführten Anforderungen umzusetzen. Eine Liste dieser Minimalanforderungen bis zum Zeitpunkt dieser Masterarbeit ist im Anhang H enthalten.

Im nächsten Schritt sollten die aktuellen Best Practice Guidelines von Acton et al., 2023 übernommen werden, und anhand des "Assessment Framework for Data Centres in the Context of Activity 8.1 in the Taxonomy Climate Delegated Act" von Paolo Bertold (2023) sollte ein internes Controlling- und Monitoring-Framework aufgebaut werden.

Im darauffolgenden Schritt sollten die Kennzahlen aus KPI4CDE bzw. aus KPI4CDE und dem GCC übernommen werden. Mit diesen Kennzahlen können entsprechende Ausweisungen gegenüber den Kund*innen des Cloud Service Providers erfolgen. Dies bildet die Grundlage für den nächsten Schritt, bei dem Algorithmen und Techniken aus der Wissenschaft angewandt werden. Diese dienen als Gewichtungen für das NP (nichtdeterministisch polynomielle Zeit)-vollständige bzw. NP-schwere Problem. (Björn Schödwell et al., 2017; Jens Gröger et al., 2021; Umweltbundesamt, 2023)

Abschließend sollten die Cloud Software Patterns aus Tabelle 3 in Kapitel 3.2 übernommen werden, und die in Kapitel 7.5 dargestellten Energieeffizienztechniken, die aus

wissenschaftlichen Publikationen extrahiert wurden, als Handlungsempfehlungen genutzt werden.

7.5 Beantwortung der Forschungsfrage

Die Intention dieser Masterarbeit war die Entwicklung einer Handlungsempfehlung für Geschäftsführer:innen von Hostinganbieter die sowohl Cloudrechenzentren für Collocation, als auch MSP anbieten. Die Ergebnisse aus der systematischen Literaturrecherche sollen visualisiert und im Rahmen der Anhänge präsentiert werden. Die Forschungsfrage, die es im Rahmen dieser Masterarbeit zu beantworten galt, war dabei folgende:

„Welche Handlungsempfehlungen lassen sich aus der wissenschaftlichen Literatur ableiten, um den Einsatz von Maßnahmen des Green Cloud Computing zur Reduzierung des ökologischen Fußabdrucks innerhalb von österreichischen Cloudanbieter zu optimieren?“

Um diese Frage zu beantworten, wurde in Kapitel 7.4 eine Roadmap für die Implementierung von Green Cloud Computing für CSP in Österreich entwickelt. Damit der letzte Teil dieser Roadmap mit Handlungsempfehlungen angereichert werden kann,muss die in Kapitel 6 sowie 7.2 erfolgte Analyse herangezogen werden.

Dort wurde festgestellt, dass der wissenschaftliche Fokus auf Energie Effizienz gelegt wird. Aus diesem Grund werden die Kategorien der Publikation ***A Systematic Survey on Energy-Efficient Techniques in Sustainable Cloud Computing*** die im Zuge der Literarturrecherche analysiert wurden, für die Beantwortung der Forschungsfrage herangezogen. (Bharany et al., 2022)

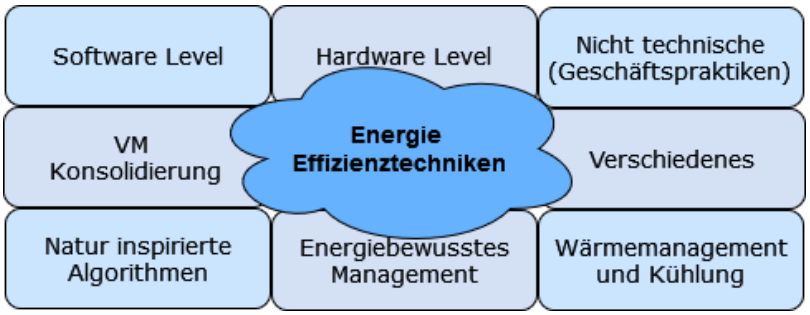


Abbildung 35: Eigene Darstellung basierend auf (Bharany et al., 2022, S. 23)

Es wurden dabei verschiedene Faktoren in Abhängigkeit gesetzt, um eine nachvollziehbare Einordnung der einzelnen in der wissenschaftlichen Literatur genannten Maßnahmen korrekt zu gewährleisten.

Aufgrund der vorhandenen analysierten Publikationen sowie der in Kapitel 6 und 7.2 erfolgten Interpretation der Ergebnisse, können für die oben genannten Bereiche nicht alle **Handlungsempfehlungen** durch die aktuelle Masterarbeit abgedeckt werden. Es wird daher näher auf die Breiche Softwarelevel, Hardwarelevel, durch die Natur inspirierte Algorithmen sowie auf VM-Konsolidierung eingegangen. Für diese Ebenen werden anhand der Taxonomie basierend auf Bharany et al. (2022) jeweils **Handlungsempfehlungen** präsentiert und in den dazugehörigen Anhängen die Ergebnisse detaillierter aufgearbeitet.

Die Ergebnisse weiterer systematischer Literaturanalyse wie ***Energy efficiency in cloud computing data center: a survey on hardware technologies*** von Katal et al. (2022) bzw. ***Energy Efficient Algorithms based on VM Consolidation for Cloud Computing: Comparisons and Evaluations*** von Zhou et al. (2020) werden berücksichtigt und enthalten zusätzliche Handlungsempfehlungen für österreichische CSP.

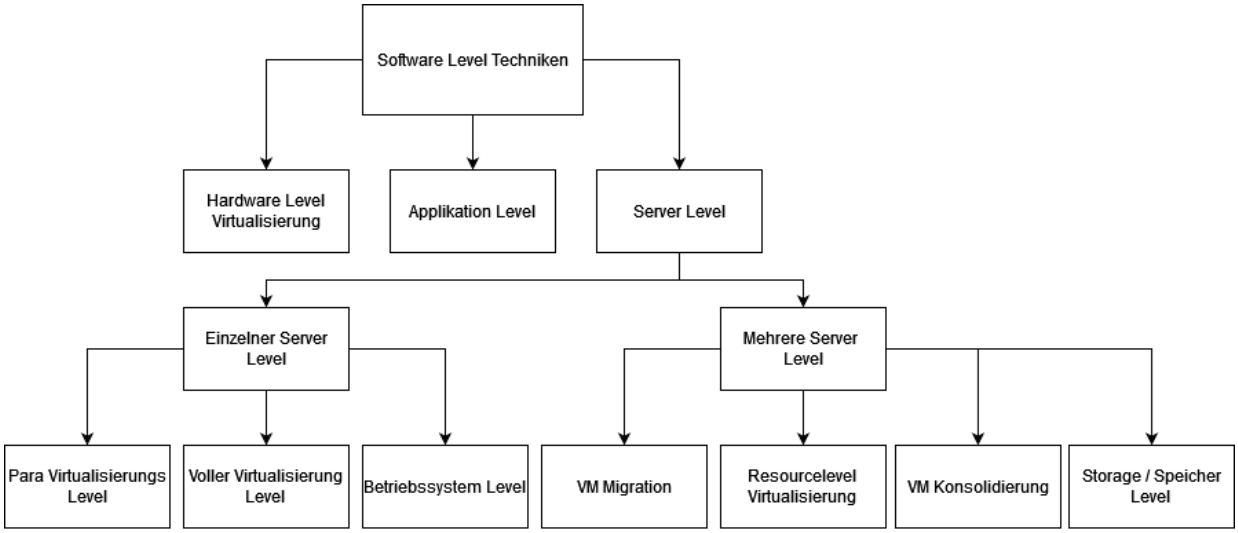


Abbildung 36: Eigene Darstellung Taxonomie der Energieeffizienz-Techniken auf Software-Ebene basierend auf Bharany et al., 2022, S. 39

Die in Abbildung 36 dargestellte erste Ebene, die im Rahmen der systematischen Literaturanalyse Ergebnisse produziert hat, umfasst Techniken auf der Softwareebene.

Das Hauptziel der Minimierung des Energieverbrauchs auf der Softwareebene erfolgt primär durch die Optimierung von Ressourcennutzung und Speicherverbrauch. In der Literatur werden Virtualisierungstechniken, insbesondere im Bereich Energiemanagement, als Schlüssel zur Effizienz in Rechenzentren betrachtet.

Die Herausforderungen und Techniken zur Platzierung und Migration von virtuellen Maschinen sind dabei ein primärer Forschungsgegenstand, ebenso wie die Auswirkungen auf die Leistung von Cloud-Rechenzentren. Entsprechend der Gliederung von Bharany et al. (2022) werden Handlungsempfehlungen und Publikationen für die jeweiligen Taxonomien aus den eigenen Ergebnissen in Tabelle 12 dargestellt. Eine mögliche Ergänzung für Anwender*innen könnte auch die systematische Literaturanalyse von von Rawat et al. (2017) sein.

Referenz -Literaturanalyse	Taxonomie	Technologie
Shojaei et al., 2018 Publikation im Rahmen der eigenen systematischen Literaturanalyse gefunden	Hardware Level Virtualisierung	VMDFS steht für "Virtual Machine Dynamic Frequency Scaling Framework"
Liao et al., 2020 Publikation im Rahmen der eigenen systematischen Literaturanalyse gefunden	Applikation Level	Kosteneffiziente ausgelagerte Entschlüsselung von attributbasierten Verschlüsselungsschemata sowohl für Nutzer als auch für Cloud Server im Green Cloud Computing
Beloglazov & Buyya, 2010 Publikation aus der systematischen Literturanalyse von Bharany et al. (2022)	Voller Virtualisierung Level	Reallocation algorithm and Modified Best-Fit Decreasing (MBFD) algorithm
Shailesh S. Deore & Ashok Narayan Patil, 2012 Publikation aus der systematischen Literturanalyse von Bharany et al. (2022)	Betriebssystem Level	Energy-Efficient Scheduling Scheme for Virtual Machines in Cloud Computing
Mandal et al., 2023 Publikation im Rahmen der eigenen systematischen Literaturanalyse gefunden	VM-Migration	Maximum energy consumption per unit VM size (MECpVmS) VM selection policy
Mustafa et al., 2019 Publikation im Rahmen der eigenen systematischen Literaturanalyse gefunden	Ressourcenlevel Migration	Minimum Power Best Fit Decreasing (MPBFD)
Gholipour et al., 2020 Publikation im Rahmen der eigenen systematischen Literaturanalyse gefunden	VM-Konsolidierung	Joint VM and Container Multi-Criteria Migration Decision (JVCMMD)
Thayananthan et al., 2017 Publikation im Rahmen der eigenen systematischen Literaturanalyse gefunden	Speicher Level	Li-Fi

Tabelle 12: Handlundsempfehlungen für den Software Level der Energieeffizienz Techniken

Detaillierte Beschreibungen dieser Handlungsempfehlungen sowie die Ergebnisse der Algorithmen und Techniken können **Anhang I** entnommen werden.

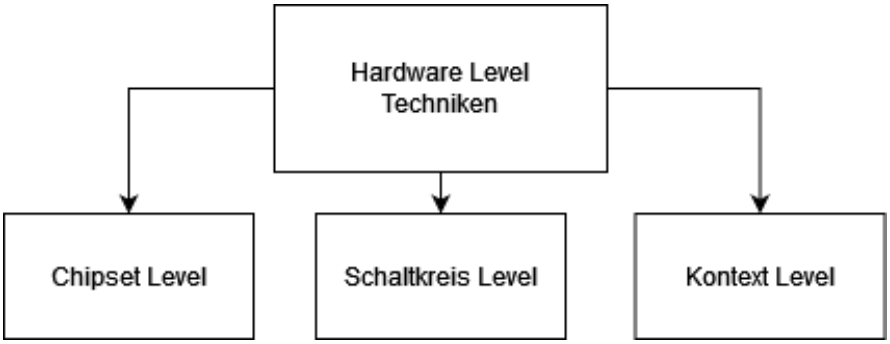


Abbildung 37: Eigene Darstellung Taxonomie der Energieeffizienz-Techniken auf Hardwareebene basierend auf Bharany et al., 2022, S. 27

Die Energieeffizienz auf der Hardwareebene im Kontext von Cloud Computing wurde in mehreren Publikationen behandelt. Verschiedene Quellen betonen die Notwendigkeit, Energie effizient zu nutzen, insbesondere im Hinblick auf Server mit unterschiedlichen Rechenkapazitäten. Im Rahmen der analysierten wissenschaftlichen Literatur gibt es unterschiedliche Optimierungsvorschläge, beispielsweise durch die Steuerung von Frequenzen, Spannungen und anderen Hardwarekomponenten.

Ein weiteres Forschungsfeld ist die Verbesserung der Energieeffizienz von Prozessoren und der Mikroprozessarchitektur. Die Handlungsempfehlungen auf der Hardwareebene werden entsprechend der Taxonomie von Bharany et al. (2022) exemplarisch aber nicht erschöpfend in **Tabelle 13** dargestellt. Zusätzlich können interessierte Anwender*innen Ihren Fundus durch die Publikationen aus ***Energy efficiency in cloud computing data center: a survey on hardware technologies*** von Katal et al. (2022) erweitern.

Referenz - Literaturanalyse	Taxonomie	Technologie
Sohaib Ajmal et al., 2021 Publikation im Rahmen der eigenen systematischen Literaturanalyse gefunden	Chipset Level	Cost-based Energy Efficient Scheduling Technique for Dynamic Volage Frequency Scaling (DVFS) Systems (CEEST)
Safari & Khorsand, 2018 Publikation im Rahmen der eigenen systematischen Literaturanalyse gefunden	Schaltkreis Level	Energy-aware scheduling algorithm for time-constrained workflow tasks
Stavrinides & Karatza, 2019 Publikation im Rahmen der eigenen systematischen Literaturanalyse gefunden	Kontext Level	Earliest Deadaline First with DVFS and Approximate Computations (EDF_DVFS)

Tabelle 13: Handlungsempfehlungen für den Hardwarelevel

In **Anhang J** werden Techniken, die in der eignen Analyse gefunden wurden und deren Einsparungsergebnisse detaillierter dargestellt.

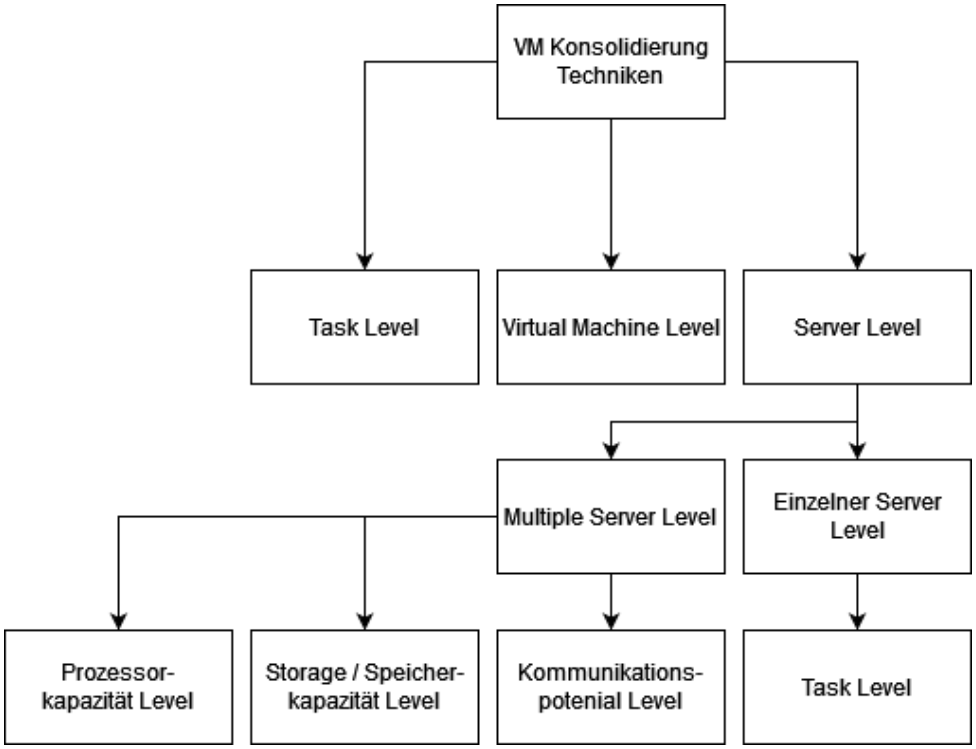


Abbildung 38: Eigene Darstellung Taxonomie VM Konsolidierungstechniken basierend auf Bharany et al., 2022, S. 48

Konsolidierung ist ein Prozess, der darauf abzielt, verschiedene Rechenzentrumsoperationen auf einem einzigen Server mithilfe von Virtualisierungstechnologie zu betreiben. Durch diese Funktion wird versucht, Lastenausgleich, effiziente Nutzung virtueller Systeme sowie die Reduzierung des Energieverbrauchs auf Prozessebene zu erreichen.

Im Rahmen des Cloud Computing bietet Virtualisierung bei der Ressourcenpool-Zugriffsverwaltung und durch Konsolidierungsmethoden die Möglichkeit, Effizienzvorteile zu erzielen. Im Bereich des Green Cloud Computing sind Dynamische VM-Konsolidierung, Threshold-basierte Konsolidierung und Optimierung des Konsolidierungsprozesses aktuelle Themen. Der Fokus wird in den untersuchten Publikationen auf die Reduzierung des Energieverbrauchs und die Verbesserung der Dienstqualität gelegt.

Die von Bharany et al. (2022) präsentierten Ergebnisse können durch zusätzliche Publikationen aus der systematischen Literaturanalyse ***A Study on Energy Efficient VM Allocation in Green Cloud Computing*** von Chingrace Guite, Kamaljeet Kaur Mangat (2018) angereichert werden. Die **Handlungsempfehlungen** der VM Konsolidierungstechniken sind für das jeweiligen Taxonomielevel in der **Tabelle 14** zu finden

Referenz - Literaturanalyse	Taxonomie	Technologie
Shu et al., 2021 Publikation im Rahmen der eigenen systematischen Literaturanalyse gefunden	Task Level	Strong agile response optimization (SARO) für Task scheduling und Immune clonal selection algorithm (ICSA)
Surendran & Tamilvizhi, 2018	Virtual Machine Level	Green Resource Management Techniques (GRMT).

Publikation im Rahmen der eigenen systematischen Literaturanalyse gefunden		
S. Supreeth, 2022 Publikation im Rahmen der eigenen systematischen Literaturanalyse gefunden	Prozessor-kapazität Level	VM Scheduling for Efficient Dynamically Migrated VM (VMS-EDMVM) unter Anwendung Modified Weighted Local Regression (MWLR) Over-utilized host detection Algorithm
Lin et al., 2011 Publikation aus der systematischen Literturanalyse von Bharany et al. (2022)	Speicher Level	„Dynamic Round-Robin" (DRR)
Shojafar et al., 2020 Publikation im Rahmen der eigenen systematischen Literaturanalyse gefunden	Kommunikationspotential Level	Joint computing-plus-communication optimization framework exploiting virtualization technologies, called MMGreen

Tabelle 14: Handlungsempfehlungen für VM Konsoldierungs Techniken

Im Rahmen von **Anhang K** werden die Ergebnisse dargestellt und Techniken detaillierter beschrieben.

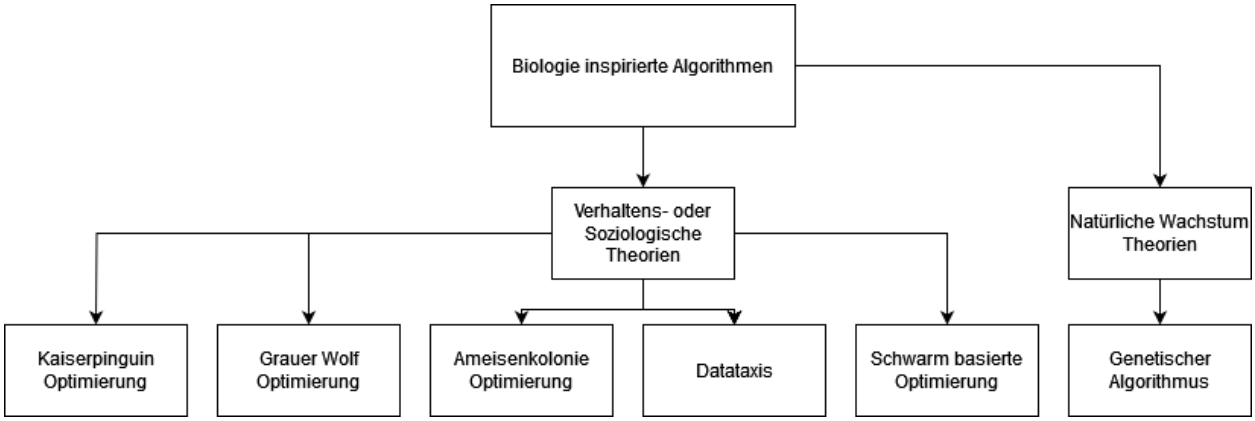


Abbildung 39: Eigene Darstellung Taxonomie durch die Biologie inspirierte Algorithmen basierend auf Bharany et al., 2022, S. 58

Im Rahmen der systematischen Literaturanalyse wurden verschiedene Meta-Heuristiken untersucht. Ein gemeinsames Merkmal besteht darin, biologische Verhaltensweisen wie Ameisenkolonien, Vogelschwärme und Fischschulen zu simulieren, um komplexe Probleme innerhalb von Rechenzentren zu lösen.

In dieser Masterarbeit werden Algorithmen für Energieeffizienz präsentiert, die Tierverhalten nachahmen. Diese Techniken werden hauptsächlich im Kontext der Platzierung von virtuellen Maschinen (VMs) in IaaS-Umgebungen eingesetzt, einschließlich verschiedener Ameisenkolonieoptimierungen und Grauer Wolf Optimierungen.

Das Hauptziel besteht darin, Multi-Objective-Platzierungsprobleme zu lösen. Die von Bharany et al. (2022) präsentierten Algorithmen können durch Erweiterungen aus ***Energy Efficient***

Algorithms based on VM Consolidation for Cloud Computing: Comparisons and Evaluations von Zhou et al. (2020) ergänzt werden.

In **Tabelle 15** finden sich für den jeweiligen Taxonomielevel eine **Handlungsempfehlung**.

Referenz - Literaturanalyse	Taxonomie	Technologie
Mansour et al., 2023 Publikation im Rahmen der eigenen systematischen Literaturanalyse gefunden	Kaiserpinguin Optimierung	Energy efficient resource scheduling using Cultural emperor penguin optimizer (CEPO) algorithm, EERS-CEPO
Mohammadzadeh et al., 2021 Publikation im Rahmen der eigenen systematischen Literaturanalyse gefunden	Graue Wolf Optimierung	Improved chaotic binary grey wolf optimization algorithm
Alyouzbaki & Al-Rawi, 2021 Publikation im Rahmen der eigenen systematischen Literaturanalyse gefunden	Ameisenkolonie Optimierung	Novel load balancing approach based on ant colony optimization technique
Usha Kirana & D'Mello, 2021 Publikation im Rahmen der eigenen systematischen Literaturanalyse gefunden	Schwarm basierte Optimierungen	Enhanced Particle Swarm Optimization (PSO)
Y. Xu & Abnoosian, 2022 Publikation im Rahmen der eigenen systematischen Literaturanalyse gefunden	Genetischer Algorithmus	Hybrid algorithm aus Genetic Algorithm (GA) und PSO als metaheuristischer Ansatz

Tabelle 15: Handlungsempfehlungen Natur inspirierte Algorithmen

In **Anhang L** werden basierend auf der eigenen systematischen Literaturanalyse exemplarische Publikationen als Handlungsempfehlungen zu den jeweiligen Optimierungen präsentiert und genauer beschrieben.

Anhand der vorgelegten Taxonomien, bereits bestehenden systematischen Literaturanalysen und den in den Tabellen 12-15 präsentierten Handlungsempfehlungen, sowie deren detaillierte Beschreibung in den Anhängen I – L kann daher festgehalten werden, dass sich insbesondere im Rahmen der Energieeffizient Technik auf verschiedenen Ebenen klare Handlungsempfehlungen aus den wissenschaftlichen Publikationen für Anwender*Innen und CSP in Österreich ableiten lassen.

7.6 Kritische Würdigung

Ziel dieser Arbeit war es, gemäß Kapitel 1 eine Handlungsempfehlung zu entwickeln, die es ermöglicht, theoretische wissenschaftliche Ergebnisse für die praktische Anwendung aufzubereiten. Wie bereits in Kapitel 1 dargelegt wurde, ist ein Wachstum des Cloud Computing und der benötigten Kapazitäten für die fortschreitende Digitalisierung unumgänglich. Aufgrund der Breite des Themas und der verschiedenen angrenzenden Disziplinen wurde der erste Ansatz einer Versuchsreihe mit CloudSim oder anderen Instrumenten verworfen. Stattdessen wurde die systematische Literaturanalyse als Ansatz mit der höchsten deskriptiven Aussagekraft gewählt.

Durch die selbst gewählten Einschluss- sowie Ausschlusskriterien könnte es zum Verlust wichtiger Quellen gekommen sein, da Publikationen, die 2023 erst publiziert wurden, möglicherweise noch nicht die notwendigen Zitationen zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Masterarbeit hatten.

Ein weiterer wichtiger Parameter im Rahmen der systematischen Literaturanalyse sind die gewählten Suchmaschinen, Datenbanken sowie Suchstrings und Operatoren. Eine größere Breite an Suchstrings und eine Ausdehnung der Suchoperatoren hätten möglicherweise zusätzliche Ergebnisse und Publikationen erbracht.

Die selbstgewählten Kriterien für die Konzeptmatrix engen den Blickwinkel auf die Thematik Green Cloud Computing ein und führen dazu, dass mögliche Gesichtspunkte außer Acht gelassen wurden. Diese fehlenden Gesichtspunkte können bei einem Thema mit verschiedenen involvierten Disziplinen und Interessen zu einer wissenschaftlich unzulässigen Verengung bzw. Marginalisierung von konträren Meinungen führen.

Auch die zur Beantwortung der Forschungsfrage gewählte Taxonomie ist nicht allgemeingültig, und im Rahmen der systematischen Literaturanalyse wurden in anderen Publikationen andere Taxonomie-Modelle vorgestellt. Diese Modelle können jedoch Vorteile in der Analyse und Aufbereitung der verschiedenen Algorithmen, Techniken sowie Methoden bieten.

Schließlich ist aufgrund des Umfangs einer Masterarbeit eine geographische Einschränkung vorhanden. Diese geographische Einschränkung und der Fokus auf die innerhalb von Europa vorhandenen Richtlinien, Forschungsprojekte und Normen können dazu führen, dass Parameter unterschiedlich gewichtet und bewertet wurden. Dies kann insbesondere bei Algorithmen, die eine NP-schwere Komplexität aufweisen, zu unterschiedlichen Ergebnissen führen.

Bei den Handlungsempfehlungen wurde zudem Wert daraufgelegt, eine breite Betrachtung der vorhandenen Möglichkeiten, Maßnahmen, Normen und Zertifizierungen vorzunehmen. Es wurde versucht, durch die Anhänge zusätzliche Informationen der Leserschaft zur Verfügung zu stellen. Dennoch handelt es sich dabei nicht um tiefgehende Umsetzungspläne oder komplett ausgearbeitete Maßnahmenkataloge.

7.7 Forschungsmöglichkeiten

Die Analyse in Kapitel 6 und 7.2 hat ergeben, dass insbesondere im Lebensphasenmodell noch Forschungsbedarf für die Herstellungs-, Distributions- und Entsorgungsphase besteht. Der Autor dieser Masterarbeit geht davon aus, dass es zwar bereits unterschiedliche Publikationen in angrenzenden Wissenschaftsdisziplinen dazu gibt, diese jedoch derzeit noch nicht unter dem Keyword oder Parameter "Green Cloud Computing" erfolgen.

Auch in der Nutzungsphase gibt es einen starken Fokus auf die Energieeffizienz. Hemmende Gebiete wie Wasserverbrauch und die Nutzung der Abwärme durch Rechenzentren könnten möglicherweise lohnende Forschungsfelder sein, die im Rahmen des Green Cloud Computing untersucht werden können bzw. sollten.

Es erscheint essenziell, ein zusammenhängendes Kettenverständnis, wie von der SDIA angestrebt, wissenschaftlich fundiert zu entwickeln, um entlang des Lebenszyklus sowie der Lieferketten mit gleichen Begriffen und Methoden die Thematik weiter zu untersuchen. Im Rahmen der Wirtschaftsinformatik und auch aufbauend auf dieser Arbeit wäre die Entwicklung eines Preismodells unter Berücksichtigung verschiedener Parameter wie SLA, erneuerbare Energieressourcen, QoS, Energieeffizienz und ökologischer Fußabdruck ein mögliches Untersuchungsgebiet.

Eine weitere Möglichkeit wäre es, im Rahmen der verhaltensorientierten Wirtschaftsinformatik eine Untersuchung der Akzeptanz erhöhter Kosten durch die Kund*innen der CSP durchzuführen.

ANHANG A - Servicemodelle – Cloud Computing

Faktoren	SaaS	PaaS	IaaS
Charakteristika	• SaaS ermöglicht den jederzeitigen und standortunabhängigen Zugriff auf Anwendungen. • Anwendungen werden über einen Eins-zu-Viel-Mechanismus über das Web bereitgestellt. • Nutzer müssen sich nicht um die Verwaltung von Software kümmern (Upgrades, Patches). • SaaS bietet Schnittstellen zur Integration von Softwarekomponenten. • Service Level Agreements (SLAs) regeln die Leistungsparameter. • Die Benutzeroberfläche wird über "Thin Client"-Anwendungen bereitgestellt. • SaaS ist zustandslos und lose gekoppelt. • Das System ist modular aufgebaut und ermöglicht semantische Interoperabilität. • Hosting und Bereitstellung erfolgen zentral. • SaaS bietet eine einheitliche Plattform für die Bereitstellung. • Offene Kollaboration und	• Plattform ermöglicht die Entwicklung von Cloud-Anwendungen. • Einheitliche Entwicklungsumgebung für Entwicklung, Tests, Bereitstellung und Wartung. • Webbasierte Tools zur Anpassung und Erstellung von Benutzeroberflächen. • Mehrere Benutzer können dieselbe Entwicklungsumgebung nutzen. • Integration von Webservices und Datenbanken über gemeinsame Standards. • Teamarbeit während der Entwicklung wird unterstützt. • Tools für Abrechnung und Abonnementverwaltung vorhanden. • Anpassbare Benutzeroberfläche und unbegrenzte Datenbankanpassungen. • Workflow-Engine und flexible Integrationsmöglichkeiten. • Nutzung der Cloud-Infrastruktur für die Plattform.	• Bereitstellung von virtualisierter Hardware und Speicher für die Anwender. • Dynamische und selbstständige Skalierung der Infrastruktur. • Kosten- und Preismodell kann angepasst werden. • Gemeinsame Nutzung einer einzelnen Hardware durch mehrere Benutzer. • Unterstützung verschiedener Betriebssysteme und Plattformen. • Kostenersparnis durch gemeinsame Nutzung der Infrastruktur. • Service Level Agreements (SLAs) vorhanden. • Abrechnung basierend auf tatsächlichem Verbrauch. • Unterstützung für verschiedene Anwendungen und Frameworks.

	Austausch sind möglich.		
Kontrolllevel des Kunden	Nutzung und nutzungsbezogene Konfiguration	Begrenzte Verwaltung	Volle Verwaltung
Kunden Aktivitäten	Konfiguration der Benutzer und der Software des Cloud-Dienstes	Testen, Entwickeln, Verwalten und Bereitstellen Cloud-basierte Lösungen und Cloud-Dienste	Konfigurieren und Einrichten der Infrastruktur, Installation, Verwaltung und Überwachung aller erforderlichen Software
Cloud Provider Aktivitäten	Verwalten, pflegen und implementieren sowie Überwachung der Nutzung von Cloud-Diensten durch Nutzer der Cloud Software	Vorkonfiguration der Plattform und Bereitstellung der zugrunde liegenden Infrastruktur, Middleware und andere erforderliche IT-Ressourcen nach Bedarf. Erforderliche Überwachung der Nutzung durch Nutzer der Cloud	Verwalten und Bereitstellen des Speichers, physische Verarbeitung, Hosting und Vernetzung sowie die erforderliche Überwachung der Nutzung der Cloud durch den Verbraucher
Typische Services	Email, CRM, website testing, Virtual desktop, Wiki, Blog, automation	Test von Diensten und Anwendungen, Entwicklung, Integration und Bereitstellung	Virtuelle Maschine, Betriebssystem, Nachrichtenwarteschlange, Netzwerk, Speicher, CPU, Speicher, Sicherungsdienst
	Salesforce, Microsoft Dynamics, MailChimp, Campaign Monitor, Google Analytics, Slack, Atlasian, Marketo, Adobe Creative Cloud, Freshworks, Microsoft 365 Suite, Xero, Service Now, Zoho, Zoom	AWS Elastic Beanstalk, Engine Yard, Google Cloud, Heroku, IBM Cloud, Microsoft Azure, Red Hat Open Shift, VMware Cloud Foundry	Amazon EC2. Google Compute Engine, DigitalOcean. Azure Virtual Machines, SAP Business Technology Platform, IBM Cloud IaaS, IBM Cloud Pak for Data, Linode.

ANHANG B - Bereitstellungsmodelle Cloud

Nr	Charakteristik	Public Cloud	Private Cloud	Hybrid-Cloud
1	Skalierbarkeit	Sehr hoch	Limitiert	Sehr hoch, kann Cloud Burst unterliegen
2	Sicherheit	Niedrig, abhängig von verwendeter kryptographischer Verschlüsselung durch den Cloud Anbieter	Hoch	Mittel
3	Perfomanz	Niedrig bis mittel	Sehr gut	Gut
4	Zuverlässigkeit	Mittel, abhängig von der Erreichbarkeit des Anbieters und der Internetkonnektivität	Hoch, Großteil der Infrastruktur innerhalb der Organisation	Mittel bis hoch, da bestimmte Daten und Inhalte repliziert in der Organisation vorliegen
5	Kosten der Nutzung	Zahlung entsprechend der Nutzung	Hohe Kosten für das initiale Setup	Zahlung entsprechend der Nutzung
6	Integration von Daten und Anwendungen	Einfach	Einfach	Schwierig aufgrund der Wechsel zwischen den Cloud Plattformen
7	Systemmanagement	Einfacher im Vergleich zu hybrider Cloud	Einfacher im Vergleich zu hybrider Cloud	Schwer im Vergleich zu private und public Cloud
8	Portabilität	Einfach	Einfach	Schwierig
9	Tools und Fähigkeiten	Einfach	Moderat	Schwierig
10	Datensicherheitslösungen	Besser Verschlüsselung, Authentifikation der User durch Provider	Verschlüsselung der Daten auf privaten Servern	Verschlüsselung der persönlichen Daten, Sensible Daten werden nicht in der Public Cloud gespeichert
11	Privacy	Moderate Chancen einer Verletzung der Privacy	Deutlich geringere Chancen für eine Verletzung der Privacy	Auditierung der einzelnen Schritte notwendig um Datenverlust oder Privacyverletzungen zu verhindern
12	Behandlung und Speicherung von Daten	Alle Daten sind in der Public Cloud	Alle Daten sind in der private Cloud	Private Daten sind auf privaten Server insbesonders unter Einhaltung der jeweiligen Landesgesetze
13	Arbeitslast/Workload	Normale Arbeitslast mit kurzen Spitzen bei Bedarf	Für Operationen kritische Arbeitslast unter Berücksichtigung der Sicherheits- oder Managementanforderungen	Dynamisch anpassbar
14	Kapitalaufwand	Niedrig	Hoch	Reduziert zur private cloud weil Spitzen auf die Public Cloud ausgelagert werden
15	Organisatorische Agilität	Moderat	Moderat	Erhöht aufgrund der Nutzung beider Vorteile
16	Netzwerk Anforderungen	Nutzung und Funktion über das Internet	Nutzung und Funktion über das interne Netzwerk	Muss zwischen internen Netzwerk und interne wechseln können

ANHANG C - EU DC CoC – Rechenzentrumsbereiche für Verbesserung

Hauptbereich	Unterbereich
Nutzung, Verwaltung und Planung von Rechenzentren: Entwicklung einer umfassenden Strategie und eines Managementkonzept für das Rechenzentrum. Dies ermöglicht es den Betreibern, Zuverlässigkeit, Wirtschaftlichkeit, Nutzung und Umweltvorteile effektiv zu optimieren.	**Einbindung von Organisationsgruppen:** Die mangelnde Kommunikation zwischen den verschiedenen im Rechenzentrum tätigen Teams führt zu Ineffizienz sowie Kapazitäts- und Zuverlässigkeitsproblemen. Es ist wichtig, die Organisationsgruppen effektiv miteinander zu verbinden
	Allgemeine Richtlinien: Diese Richtlinien gelten für alle Aspekte des Rechenzentrums und seines Betriebs.
	Ausfallsicherheit und Provisionierung: In Rechenzentren führt die Überbelegung von Raum, Strom, und Kühlung sowie der Betrieb bei Teilauslastung zu Ineffizienz. Der monolithische Aufbau verursacht oft unnötige Kapitalausgaben im Gegensatz zum modularen Ansatz. Höhere Ausfallsicherheit erhöht die Ineffizienzen durch fixe Gemeinkosten und wird durch schlechte Auslastung verstärkt.
IT-Ausrüstung und Dienstleistungen: Die IT-Ausrüstung bestimmt den Strom- und Kühlungsbedarf im Rechenzentrum. Jede Reduzierung dieser Bedürfnisse wirkt sich stark auf die Energieversorgung aus. Es ist jedoch wichtig zu betonen, dass die angegebenen Betriebstemperatur- und Luftfeuchtigkeitsbereiche der IT-Geräte nicht bedeuten, dass die Geräte immer am oberen Rand dieser Bereiche betrieben werden sollten. Diese Spezifikationen sollen sicherstellen, dass neue Geräte in einem größeren Temperatur- und Feuchtigkeitsbereich funktionieren können, was dem Betreiber mehr Flexibilität in Bezug auf Betriebstemperatur und Luftfeuchtigkeit ermöglicht.	**Auswahl und Einsatz neuer IT-Ausrüstung:** Nach der Installation verbleibt die IT-Ausrüstung für mehrere Jahre im Rechenzentrum, verbraucht Strom und erzeugt Wärme. Durch eine sorgfältige Auswahl der Hardware und Einsatzmethoden können langfristige erhebliche Einsparungen erzielt werden.
	Einführung neuer IT-Dienste: Die Service-Architektur, die Software und die Bereitstellung von IT-Diensten haben einen mindestens ebenso großen Einfluss wie die IT-Hardware.
	Verwaltung bestehender IT-Ausrüstung und -Dienste: Es ist üblich, sich auf neue Dienste und Geräte im Rechenzentrum zu konzentrieren, jedoch bestehen auch erhebliche Möglichkeiten zur Energie- und Kostensenkung innerhalb der bestehenden Dienste und Infrastruktur.
	Datenverwaltung: Die Datenspeicherung ist ein bedeutender Wachstumsbereich, der sowohl Kosten als auch den Energieverbrauch im Rechenzentrum beeinflusst. Es ist weit verbreitet, dass ein erheblicher Teil der gespeicherten Daten unnötig, doppelt vorhanden oder nicht relevant ist, was eine Herausforderung für viele Unternehmen darstellt. Besonders in Sektoren mit vagen Vorschriften zur Datenaufbewahrung durch Regierungen oder Regulierungsbehörden besteht das Risiko, dass große Mengen an unnötigen Daten übermäßig geschützt und archiviert werden, wenn die

	Datenspeicherung nicht strukturiert ist.
Kühlung: Die Kühlung des Rechenzentrums ist häufig der größte Energieverlust in der Einrichtung und stellt daher eine bedeutende Möglichkeit zur Verbesserung der Effizienz.	**Luftstrommanagement und Design:** Das Luftstrommanagement im Rechenzentrum hat das Ziel, nur die erforderliche Luftmenge durch das Zentrum zirkulieren zu lassen, um die von den IT-Geräten erzeugte Wärme abzuführen. Eine ineffiziente Luftstromführung führt oft zu versuchten Kompensationen wie niedrigeren Zulufttemperaturen oder übermäßigem Luftstrom, was zu Energieverlusten führt. Durch optimales Luftstrommanagement, unterstützt durch computergestützte Strömungsmechanik (CFD) in der Planungsphase, können einheitlichere Temperaturen erreicht und Energieeinsparungen durch Erhöhung der Sollwerte realisiert werden. Dies ist jedoch erst möglich, nachdem grundlegende Voraussetzungen erfüllt sind und die Luftströmung nicht mehrfach durch die IT-Ausrüstung zirkuliert oder ohne Wärmeaufnahme zurück zum Kühlsystem gelangt.
	Management der Kühlung: Im Rechenzentrum sollten Kühlsysteme dynamisch angepasst werden, um Veränderungen in der thermischen Belastung der Einrichtung sowie saisonale Schwankungen in den externen Umgebungsbedingungen zu berücksichtigen, da das Rechenzentrum kein statisches System ist.
	Einstellungen für Temperatur und Luftfeuchtigkeit: Einrichtungen werden oft überkühlt und die Kaltwassertemperaturen zu niedrig eingestellt, was zu unnötigem Energieverlust führt. Die Ausdehnung des Luftfeuchtigkeitsbereichs kann die Befeuchterlasten reduzieren. Es wird empfohlen, die Aspekte des Luftmanagements in den vorherigen Unterbereichen *Management der Kühlung* und *Luftstrommanagement* zu überprüfen, bevor Sollwerte geändert werden, um die betriebliche Integrität nicht zu gefährden. Änderungen der Umgebungsbereiche sollten immer in Betracht gezogen werden. Eine Erhöhung der Kaltwassertemperatursollwerte verbessert die Effizienz der freien Kühlung und reduziert den Energieverbrauch der Kompressoren. Unnötige Befeuchterlasten sollten durch Anpassung des unteren Feuchtesollwerts vermieden werden. Die Festlegung breiterer Betriebsfeuchtigkeits- und Temperaturbereiche für die Datenhalle sollte in Verbindung mit Änderungen in der Beschaffungspolitik für IT-Geräte erfolgen, da Geräte mit enger Toleranz mit der Zeit ausgemustert und ersetzt werden.
	Freie und sparsame Kühlung: Bei der freien Kühlung wird kühle Umgebungsluft genutzt, um den Kühlbedarf der Anlage zu decken, wodurch die Abhängigkeit von mechanischer Kühlung, einschließlich Kompressoren, reduziert oder beseitigt wird. Dies führt zu erheblichen Energieeinsparungen und ist

	besonders effektiv in kühleren, trockeneren Klimazonen sowie bei höheren Temperatursollwerten. Die Implementierung von Technologien zur freien Kühlung sollte in allen neuen Projekten sowie bei Renovierungen und Nachrüstungen in Betracht gezogen werden, da sie zu reduzierten Betriebs- und Kapitalkosten führen können.
	Hocheffiziente Kühlanlage: Es ist entscheidend, eine hocheffiziente Kühlanlage auszuwählen und effiziente Komponenten sowie eine wirksame Regelstrategie zu verwenden, um den Betrieb zu optimieren, ohne die Zuverlässigkeit zu beeinträchtigen. Selbst bei begrenztem Betrieb können die Kosteneinsparungen in Bezug auf elektrische Kapazität und Stromgebühren die Wahl einer hocheffizienten Anlage rechtfertigen.
	Computerraum-Klimageräte / Luftbehandlungsgeräte: Die Klimaanlagen im Computerraum, eine entscheidende Komponente der meisten Kühlsysteme, sind oft schlecht konzipiert und optimiert, insbesondere in älteren Anlagen.
	Direkte Flüssigkeitskühlung: Direkte Flüssigkeitskühlung kann besonders bei hoher Leistungsdichte und der Nutzung der im Rechenzentrum erzeugten Wärme Vorteile gegenüber der Luftkühlung bieten. Dieses System ermöglicht höhere Rücklauftemperaturen des Kühlmittels im Vergleich zur Luftkühlung.
	Wiederverwendung der Abwärme von Rechenzentren: Rechenzentren produzieren beträchtliche Mengen an Abwärme, die trotz ihrer oft niedrigen Temperatur für verschiedene Anwendungen wiederverwendet werden können. Die Konsolidierung und Virtualisierung von IT-Geräten können die Temperatur dieser Abwärme erhöhen, was zusätzliche Möglichkeiten für ihre Wiederverwendung schafft. Die direkte Flüssigkeitskühlung von IT-Geräten kann die Rücklauftemperatur des Kühlmittels weiter verbessern. Rechenzentren sollten das Potenzial für die Wiederverwendung dieser Abwärme sorgfältig prüfen.
Stromversorgungsanlagen für Rechenzentren: Das Stromversorgungs- und -aufbereitungssystem eines Rechenzentrums, einschließlich unterbrechungsfreier Stromversorgungen, Stromverteilungseinheiten und Verkabelung sowie möglicherweise Generatoren, stellt einen entscheidenden Teil der Einrichtung dar.	**Auswahl und Einsatz von neuen Stromversorgungsanlagen:** Die Auswahl der Stromversorgungsanlagen während der Planungsphase eines Rechenzentrums hat einen langfristigen Einfluss auf die Effizienz und kann über die gesamte Lebensdauer der Einrichtung erhebliche Einsparungen ermöglichen.
	Verwaltung bestehender Stromerzeugungsanlagen
Andere Ausrüstung des Rechenzentrums:	**Allgemeine Praktiken** Diese allgemeinen Praktiken gelten für die Datenetage und können

In den Bereichen außerhalb des Rechenzentrums, wie Büros und Lagerräumen, sollte die Energieeffizienz gemäß relevanten Gebäudestandards wie EU-Standards, LEED und BREEAM optimiert werden.	auf den Rest des Gebäudes ausgeweitet werden, wenn kein Standard für nachhaltiges Bauen verwendet wird.
Gebäude des Rechenzentrums: Der Standort und das physische Layout des Rechenzentrumsgebäudes sind entscheidend für Flexibilität und Effizienz. Technologien wie Frischluftkühlung erfordern ausreichend Platz für Anlagen und Luftkanäle, der möglicherweise in bestehenden Gebäuden nicht vorhanden ist.	**Physikalischer Aufbau des Gebäudes:** Die physische Anordnung des Gebäudes kann grundlegende Einschränkungen für die anwendbaren Technologien und erreichbaren Wirkungsgraden
	Geografischer Standort des Gebäudes: Auch wenn Betreiber oft keinen Einfluss auf den geografischen Standort eines Rechenzentrums haben, beeinflusst dieser dennoch die erreichbare Effizienz, insbesondere durch das äußere Klima.
	Wasserquellen: Rechenzentren verbrauchen eine beträchtliche Menge an Wasser für Kühlung und Feuchtigkeitsregelung. Die Nutzung von Wasserquellen mit niedriger Energieintensität kann den effektiven Energieverbrauch des Rechenzentrums senken.
Monitoring: Die Entwicklung und Umsetzung einer Strategie zur Energieüberwachung und -berichterstattung sind entscheidend für den effizienten Betrieb eines Rechenzentrums.	**Messung des Energieverbrauchs und der Umweltbelastung:** Die meisten Rechenzentren haben derzeit begrenzte Möglichkeiten zur Messung des Energieverbrauchs und der Umweltbelastung, oft fehlen sogar separate Zähler oder Rechnungen. Die Fähigkeit zur Messung dieser Faktoren ist entscheidend, um Verbesserungen zu identifizieren und zu rechtfertigen, und kann auch Alarme auslösen, wenn Parameter außerhalb des erwarteten Bereichs liegen.
	Erfassung und Protokollierung des Energieverbrauchs und der Umweltbedingungen: Nachdem Daten über den Energieverbrauch und die Umweltbedingungen (Temperatur und Feuchtigkeit) durch die Messgeräte verfügbar sind, müssen sie gesammelt, aufgezeichnet und für die Analyse gespeichert werden.
	Energieverbrauch und Umweltberichte: Energieverbrauchs- und Umweltdaten (Temperatur und Luftfeuchtigkeit) müssen gemeldet werden, um die Verwaltung der Energieeffizienz der Einrichtung zu unterstützen.
	IT-Berichterstattung: Die Auslastung der IT-Ausrüstung ist entscheidend für die Energieeffizienz des Rechenzentrums. Die Meldung aggregierter Daten, die für spezifische interne Geschäftsanforderungen relevant sind, ist optional, solange effektive offene Metriken und Berichtsmechanismen noch in der Entwicklung sind.

ANHANG D - Software Patterns – Green Software Foundation

Kategorie	Software-Pattern	Begründung
Artificial Intelligence (AI)	Optimierung der Größe von AI-/ML-Modellen.	Groß angelegte AI-/ML-Modelle benötigen erheblichen Speicherplatz und verbrauchen im Vergleich zu optimierten Modellen mehr Ressourcen, um ausgeführt zu werden.
	Verwendung effizienter Dateiformate für die Entwicklung von AI-/ML-Anwendungen	Die Datenverarbeitung und -speicherung nehmen einen erheblichen Teil der AI-/ML-Entwicklung ein und beeinflussen den CO^2-Fußabdruck der Anwendung. Die Vielfalt und Menge der Daten müssen möglicherweise erfasst und vorverarbeitet werden, um das ML-Modell zu erstellen. Eine effiziente Speicherung des Modells wird äußerst wichtig, um die für die ML-Modellentwicklung verwendeten Daten zu verwalten.
	Führen Sie AI-Modelle nahe an der Datenquelle aus (Edge Computing)	Die Datenberechnung für ML-Arbeitslasten und ML-Inferenz trägt erheblich zum CO2-Fußabdruck der ML-Anwendung bei. Wenn das ML-Modell auch in der Cloud ausgeführt wird, müssen die Daten in das erforderliche Format übertragen und auf der Cloud verarbeitet werden, damit es vom ML-Modell für die Inferenz verwendet werden kann.
	Auswahl eines energieeffizientern AI-/ML- Framework	Das Training eines AI-Modells verursacht einen erheblichen CO2-Fußabdruck. Das zugrunde liegende Framework, das für die Entwicklung, das Training und den Einsatz von KI/ML verwendet wird, muss bewertet und berücksichtigt werden, um sicherzustellen, dass der Prozess so energieeffizient wie möglich ist. Normalerweise sind AI/ML-Frameworks, die auf Sprachen wie C/C++ basieren, energieeffizienter als solche, die auf anderen Programmiersprachen aufbauen.
	Verwendung energieeffizienter AI/ML-Modelle	Große AI/ML- und Deep-Learning-Netzmodelle haben einen erheblichen CO2-Fußabdruck. Evaluieren und verwenden Sie alternative, energieeffizientere Modelle, die ähnliche Funktionen bieten.
	Nutzung nachhaltiger Regionen für das AI/ML-Modell Training	Das Training eines AI-Modells hat einen erheblichen CO^2-Fußabdruck. Abhängig von den Modellparametern und den Trainingsiterationen verbraucht das Training eines AI/ML-Modells viel Strom und erfordert viele Server, die zu den verkörperten Emissionen beitragen. Eine Durchführung des Trainings auf Cloudregionen mit besseren CO^2 Werten erlaubt damit eine Verringerung des CO^2-Fußabdruck.
	Nutzung von vortrainierten Modellen und Transfer Learning für die AI/ML-Entwicklung	Das Training eines AI-Modells hat einen erheblichen ökologischen Fußabdruck. Als Teil Ihres AI/ML-Prozesses sollten Sie die Verwendung eines vorab trainierten Modells prüfen und Transfer Learning einsetzen, um das Training eines neuen Modells von Grund auf zu vermeiden.
	Auswahl der richtigen Hardware/VM-Instanztypen für AI/ML-Training	Das Training eines AI-Modells hat einen beträchtlichen CO2-Fußabdruck. Die Auswahl der richtigen Hardware-/VM-Instanztypen für das Training ist eine der Entscheidungen, die Sie im Rahmen Ihres energieeffizienten AI/ML-Prozesses treffen sollten. So werden beispielsweise kundenspezifische anwendungsspezifische integrierte

		Schaltungen (ASICs) und feldprogrammierbare Gate-Arrays (FPGAs) von Cloud-Anbietern bereitgestellt oder unterstützt, die eine bessere Energieeffizienz und Inferenz für KI-Modelle bieten als herkömmliche Chips.
	Einführung einer serverlosen Architektur für AI/ML-Workload-Prozesse	Die Erstellung eines ML-Modells erfordert eine Reihe von Schritten, z. B. den Aufbau einer Datenpipeline für die Datenerfassung, die Datenbereinigung, die Feature-Generierung und die Durchführung mehrerer Trainingsiterationen und Experimente, um die gewünschte Genauigkeit zu erzielen. All diese Schritte erfordern erhebliche Rechenressourcen, die für eine effiziente Nutzung optimiert werden müssen.
Cloud	Statische Daten zwischenspeichern	Unter dem Gesichtspunkt der Energieeffizienz ist es besser, den Netzwerkverkehr zu reduzieren, indem die Daten lokal über einen Cache gelesen werden, anstatt sie über das Netzwerk abzurufen. Die Verkürzung der Strecke, die ein Netzwerkpaket zurücklegt, bedeutet, dass weniger Energie für seine Übertragung benötigt wird. Auch unter dem Gesichtspunkt des "embodied carbon" sind wir mit der Hardware effizienter, wenn ein Netzwerkpaket weniger Rechenanlagen durchläuft.
	Wählen Sie die Region, die den Nutzern am nächsten ist.	Unter dem Gesichtspunkt der Energieeffizienz ist es besser, die Strecke, die ein Netzpaket zurücklegt, zu verkürzen, damit weniger Energie für seine Übertragung benötigt wird. Ähnlich verhält es sich unter dem Gesichtspunkt des verkörperten Kohlenstoffs: Wenn ein Netzwerkpaket weniger Computerausrüstung durchläuft, sind wir mit der Hardware effizienter.
	Übertragene Daten komprimieren	Unter dem Gesichtspunkt der Energieeffizienz ist es besser, die Größe der übertragenen Daten zu minimieren, so dass weniger Energie benötigt wird, weil der Netzverkehr reduziert wird.
	Ungenutzte Speicherressourcen löschen	Aus der Sicht des gebundenen Kohlenstoffs ist es besser, ungenutzte Speicherressourcen zu löschen, um die Hardware effizient zu nutzen und die Speicherschicht für die Aufgabe zu optimieren.
	Beenden von TLS am Grenzübergang	Transport Layer Security (TLS) stellt sicher, dass alle zwischen dem Webserver und den Webbrowsern übertragenen Daten privat und verschlüsselt bleiben. Das Beenden und Wiederherstellen von TLS erhöht jedoch die CPU-Auslastung und kann in bestimmten Architekturen unnötig sein.
	Implementierung eines stateless Designs	Der Dienststatus bezieht sich auf die Daten im Speicher oder auf der Festplatte, die ein Dienst zum Funktionieren benötigt. Der Zustand umfasst die Datenstrukturen und Mitgliedsvariablen, die der Dienst liest und schreibt. Je nach Architektur des Dienstes kann der Zustand auch Dateien oder andere Ressourcen umfassen, die auf der Festplatte gespeichert sind. Anwendungen, die viel Arbeitsspeicher oder Festplattendaten verbrauchen, erfordern größere VM-Größen, insbesondere beim Cloud Computing, wo Sie größere VM-SKUs benötigen, um eine hohe RAM-Kapazität und mehrere Datenfestplatten zu unterstützen.
	Passen Sie Ihre SLA-Ziele an die Geschäftsanforderungen an	Wenn Service-Ausfallzeiten akzeptabel sind, ist es besser, nicht die höchste Verfügbarkeit anzustreben, sondern die Lösung entsprechend den tatsächlichen Geschäftsanforderungen zu gestalten. Geringere Verfügbarkeitsgarantien können dazu beitragen, den

		Energieverbrauch zu senken, indem weniger Infrastrukturkomponenten verwendet werden.
	Anpassen der Nutzungsanforderungen von virtuellen Maschinen (VMs)	Es ist besser, eine virtuelle Maschine mit einer höheren Auslastung laufen zu lassen als zwei mit einer niedrigen Auslastung, und zwar nicht nur im Hinblick auf die Verhältnismäßigkeit der Energie, sondern auch im Hinblick auf den gebundenen Kohlenstoff. Zwei Server mit geringer Auslastung verbrauchen mehr Energie als ein Server mit hoher Auslastung. Darüber hinaus könnte die ungenutzte Kapazität des nicht ausgelasteten Servers effizienter für eine andere Aufgabe oder einen anderen Prozess genutzt werden.
	Minimierung der eingerichteten Cloud Umgebungen	Bei einer bestimmten Anwendung kann es erforderlich sein, mehrere Umgebungen im Anwendungsworkflow zu verwenden. In der Regel wird eine Entwicklungsumgebung für regelmäßige Aktualisierungen verwendet, während Staging- oder Testumgebungen dazu dienen, sicherzustellen, dass es keine Probleme gibt, bevor der Code in die Produktionsumgebung gelangt, auf die die Benutzer Zugriff haben könnten. Jede hinzugefügte Umgebung hat einen steigenden Energieaufwand zur Folge, der wiederum mehr Emissionen verursacht. Daher ist es wichtig, die Notwendigkeit jeder Umgebung und ihre Umweltauswirkungen zu verstehen.
	Optimierung der Speichernutzung	Es ist besser, die Speicherauslastung zu maximieren, so dass die Speicherschicht für die Aufgabe optimiert ist, nicht nur im Hinblick auf die Energieproportionalität, sondern auch auf den verkörperten Kohlenstoff. Zwei Speicher, die mit geringer Auslastung laufen, verbrauchen mehr Energie als einer mit hoher Auslastung. Darüber hinaus könnte die ungenutzte Kapazität der nicht ausgelasteten Speichereinheit effizienter für eine andere Aufgabe oder einen anderen Prozess genutzt werden.
	Optimierung der durchschnittlichen CPU-Auslastung	Die CPU-Nutzung und -Auslastung schwankt im Laufe des Tages und kann bei unterschiedlichen Rechenanforderungen stark variieren. Je größer die Abweichung zwischen den Durchschnitts- und Spitzenwerten der CPU-Auslastung ist, desto mehr Ressourcen müssen im Stand-by-Modus bereitgestellt werden, um diese Verkehrsspitzen aufzufangen.
	Optimierung der Auswirkungen auf Kundengeräten und -ausrüstung	Anwendungen laufen auf der Hardware des Kunden oder werden auf ihr angezeigt. Die vom Kunden verwendete Hardware hat durch die Produktion und den Stromverbrauch während des Betriebs einen CO2-Fußabdruck. Wenn Sie Ihr Softwaredesign und Ihre Architektur so optimieren, dass die Lebensdauer der Kundengeräte verlängert wird, verringert sich die Kohlenstoffintensität der Anwendung. Im Idealfall kann der Kunde die Hardware bis zu ihrem Ausfall oder bis sie veraltet ist nutzen.
	Optimieren der CPU-Spitzenauslastung	Die CPU-Nutzung und -Auslastung schwankt im Laufe des Tages, manchmal sogar stark, je nach den verschiedenen Berechnungsanforderungen. Je größer die Abweichung zwischen den Durchschnitts- und Spitzenwerten der CPU-Auslastung ist, desto mehr Ressourcen müssen im Stand-by-Modus bereitgestellt werden, um diese Spitzen im Datenverkehr aufzufangen.
	Nicht dringende Verarbeitungsanfragen in eine	Alle Systeme haben Zeiten mit hoher und niedriger Last. Unter dem Gesichtspunkt der Hardware-Effizienz ist es effizienter, wenn die

	Warteschlange stellen (Queue)	Auswirkungen von Anfragespitzen durch eine Implementierung minimiert werden, die eine gleichmäßige Auslastung der Komponenten ermöglicht. Unter dem Gesichtspunkt der Energieeffizienz ist ein effizienter Umgang mit Energie möglich, wenn sichergestellt wird, dass ungenutzte Ressourcen auf ein Minimum reduziert werden.
	Übertragene Daten reduzieren	Unter dem Gesichtspunkt der Energieeffizienz ist es besser, die Größe der übertragenen Daten zu minimieren, so dass weniger Energie benötigt wird, weil der Netzwerkverkehr reduziert wird.
	Ungenutzte Assets entfernen	Überwachen und analysieren Sie die Anwendung und die Cloud-Rechnung, um Ressourcen zu identifizieren, die nicht mehr genutzt werden oder reduziert werden können.
	Verkleinern von Kubernetes-Anwendungen bei Nichtgebrauch	Um den Kohlendioxidausstoß und die Kosten zu senken, können Dev&Test-Kubernetes-Cluster Knoten (VMs) außerhalb der Geschäftszeiten (z. B. nachts und an Wochenenden) abschalten. => dadurch wird die Optimierung auf Clusterebene implementiert. Für Produktionscluster, bei denen die Knoten in Betrieb bleiben müssen, muss die Optimierung auf der Anwendungsebene (Deployment, StatefulSet) implementiert werden.
	Skalierung von Kubernetes-Workloads auf der Grundlage relevanter Bedarfsmetriken	Standardmäßig skaliert Kubernetes Arbeitslasten auf Basis der CPU- und RAM-Auslastung. In der Praxis ist es jedoch schwierig, die Bedarfstreiber Ihrer Anwendung mit der CPU- und RAM-Auslastung zu korrelieren. Die Skalierung Ihrer Arbeitslast auf der Grundlage relevanter Bedarfsmetriken, die die Skalierung Ihrer Anwendungen vorantreiben, wie z. B. HTTP-Anfragen, Warteschlangenlänge und Cloud-Alarmierungsereignisse, kann dazu beitragen, die Ressourcennutzung und damit auch Ihre CO2-Emissionen zu reduzieren.
	Nach Schwachstellen suchen	Viele Angriffe auf Cloud-Infrastrukturen zielen darauf ab, die bereitgestellten Ressourcen zu missbrauchen, was zu einem unnötigen Anstieg der Nutzung und der Kosten führt. Schwachstellen-Scans und EDR-Tools (Endpoint Detection and Response) helfen dabei, das Zeitfenster für Angreifer zu minimieren und die potenzielle böswillige Nutzung von Ressourcen einzudämmen.
	Richtlinien zur Speicheraufbewahrung festlegen	Unter dem Gesichtspunkt des verkörperten Kohlenstoffs ist es besser, einen automatischen Mechanismus zum Löschen ungenutzter Speicherressourcen zu haben, damit wir die Hardware effizient nutzen und die Speicherebene für die Aufgabe optimiert ist.
	Datenverkehr mit niedrigerer Priorität auslagern	Wenn die Ressourcen bei hohem Datenverkehr oder bei hoher Kohlenstoffintensität begrenzt sind, werden mehr Kohlenstoffemissionen von Ihrem System erzeugt. Die Aufstockung der Ressourcen zur Bewältigung des erhöhten Datenverkehrs führt zu mehr gebundenem Kohlenstoff und einer höheren Nachfrage nach Strom. Wenn Sie bei hoher Kohlenstoffintensität weiterhin alle Anfragen bearbeiten, steigen die Gesamtemissionen Ihres Systems. Der Verzicht auf Datenverkehr mit geringerer Priorität während dieser Szenarien spart Ressourcen und Kohlenstoffemissionen. Dieser Ansatz erfordert ein Verständnis Ihres Datenverkehrs, einschließlich der Frage, welche Anrufe kritisch sind und welche Wiederholungsversuche und Ausfälle am besten verkraften können.

	Zeitversetzte Kubernetes-Cron-Jobs	Die Kohlenstoffemissionen eines Softwaresystems hängen nicht nur vom Stromverbrauch dieser Software ab, sondern auch von der Kohlenstoffintensität des Stroms, mit dem sie betrieben wird. Aus diesem Grund kann es ineffizient sein, energieeffiziente Software auf einem kohlenstoffintensiven Stromnetz zu betreiben, um die globalen Kohlenstoffemissionen zu reduzieren. Bei der kohlenstoffbewussten Zeitplanung geht es darum, Arbeitslasten so zu planen, dass sie ausgeführt werden, wenn die Kohlenstoffintensität des Stroms niedrig ist.
	Schutzschaltermuster verwenden	Moderne Anwendungen müssen in regelmäßigen Abständen mit anderen Anwendungen kommunizieren. Da diese anderen Anwendungen ihren eigenen Einsatzplan, ihre eigenen Ausfallzeiten und ihre eigene Verfügbarkeit haben, kann es bei der Netzwerkverbindung zu diesen Anwendungen zu Problemen kommen. Wenn die andere Anwendung nicht erreichbar ist, schlagen alle Netzwerkanfragen an diese andere Anwendung fehl und zukünftige Netzwerkanfragen sind sinnlos.
	Verwendung von cloudbasierten Netzwerksicherheitstools und -kontrollen	Netzwerk- und Webanwendungs-Firewalls bieten Schutz vor den gängigsten Angriffen und lastverteilenden Bad Bots. Diese Tools tragen dazu bei, unnötige Datenübertragungen zu vermeiden und die Belastung der Cloud-Infrastruktur zu verringern, während gleichzeitig weniger Bandbreite und Infrastruktur benötigt wird.
	Serverlose Cloud-Dienste nutzen	Serverlose Cloud-Dienste sind Dienste, die der Cloud-Anbieter für die Anwendung verwaltet. Sie skalieren dynamisch mit der Arbeitslast, die zur Erfüllung der Serviceaufgabe erforderlich ist, und wenden bewährte Verfahren an, um die Ressourcennutzung minimal zu halten.
Web	Vermeiden Sie die Verkettung kritischer Anfragen	Die meisten Web-Erlebnisse erfordern vom Browser des Benutzers eine Menge Arbeit. Die Zwischenschritte zwischen dem Empfang der HTML-, CSS- und JavaScript-Bytes und der Verarbeitung der Anforderungen, um sie in gerenderte Pixel umzuwandeln, werden als kritischer Rendering-Pfad bezeichnet. Kritische Anforderungsketten sind eine Reihe von abhängigen Netzwerkanforderungen, die das Rendern der Seite blockieren, bis sie abgeschlossen sind. Je länger die Ketten sind und je größer die Download-Größen sind, desto größer sind die Auswirkungen auf die Seitenladeleistung und die zum Rendern einer Seite erforderliche Energie.
	Vermeiden Sie eine übermäßige DOM-Größe	Webbrowser wandeln das HTML vom Server in ein Document Object Model (DOM) um, um die Webseite weiter zu verarbeiten. Jedes HTML-Element, z. B. ein div, ist dann ein Knoten im DOM. Die Anzahl der Knoten bestimmt den Speicherbedarf des Browsers und die für die Anzeige und Aktualisierung der Seite benötigte Zeit. Je größer die Anzahl der in HTML definierten Knoten ist, desto mehr Zeit wird für die Verarbeitung und Darstellung der einzelnen Elemente benötigt. Außerdem benötigt jede Interaktion mit dem DOM aus Javascript mehr Verarbeitungszeit und mehr Speicher, um die DOM-Elemente zu durchlaufen.
	Vermeiden Sie die Erfassung unnötiger Daten	Die Nachverfolgung von Nutzern, die Sammlung von Nutzerdaten und die gezielte Ausrichtung von Werbung sind bei vielen digitalen Produkten und Diensten für einen erheblichen Energieverbrauch

		verantwortlich. Dies ist in erster Linie auf den großen Umfang von Tracking- und Werbeskripten, den Energieaufwand für die Verarbeitung und Verfolgung des Nutzerverhaltens sowie auf Datenbanken zurückzuführen, die große Mengen an Nutzerdaten sammeln. Darüber hinaus kann dies eine erhebliche Verletzung der Privatsphäre der Nutzer darstellen und das Nutzererlebnis spürbar beeinträchtigen.
	Offscreen-Bilder verschieben	Webseiten bieten eine Vielzahl von Bildern, die nicht auf dem ersten geladenen Bildschirm angezeigt werden. Sie können diese Bilder auch hinter anderen Interaktionen verstecken, z. B. hinter Registerkarten und Akkordeons. Diese Inhalte werden dynamisch angezeigt und müssen daher nicht geladen werden, wenn sie nicht angezeigt werden. Die Tatsache, dass Bilder erst bei Bedarf geladen werden, wenn sie angezeigt werden sollen, wird oft als "Lazy-Loading" bezeichnet.
	GIFs für animierte Inhalte abschaffen	GIFs wurden in den frühen 80er Jahren erfunden und dieses beliebte Format wurde verwendet, um animierte Inhalte in Webbrowsern bereitzustellen. Neuere Technologien haben GIFs technisch überholt, aber sie sind immer noch weithin als animiertes Bildformat bekannt. Ein direkter Ersatz für GIFs ist das MP4-Videoformat. MP4 bietet viel kleinere Dateigrößen und gleichzeitig eine höhere Qualität.
	Textkomprimierung einschalten	Webbrowser kommunizieren mit Webservern oft in einem für Menschen lesbaren Format. Dabei kann es sich um HTML-, JavaScript- und/oder CSS-Dateien und auch um REST-Anfragen handeln, die eine Antwort in JSON zurückgeben können. Diese Kommunikation ist für den Menschen lesbar und daher in hohem Maße redundant, so dass sie stark komprimiert werden kann, was eine Menge Bandbreite spart. Webbrowser und Server können das Komprimierungsformat dynamisch über die HTTP-Header "Accept-Encoding"/"Content-Encoding" mitteilen. Dadurch kann die Kommunikation dynamisch auf Komprimierungsformate umgestellt werden, die beide Seiten unterstützen.
	Halten Sie die Anzahl der Anfragen niedrig	Beim Zugriff auf eine Webseite wird normalerweise eine HTML-Datei vom Webserver abgerufen. Die HTML-Datei kann dann auf zusätzliche Ressourcen verweisen, die der Browser herunterladen muss. Um möglichst wenig CO2 zu verbrauchen, sollten Sie die Anzahl der Dateien reduzieren, die für die Anzeige einer Seite im Browser benötigt werden.
	Web-Assets verkleinern	Eine Webseite besteht aus verschiedenen Bestandteilen, wie HTML, CSS, JavaScript und Bibliotheken von Drittanbietern wie jQuery, Bootstrap usw. Bei der Verkleinerung werden unnötige oder überflüssige Daten entfernt, ohne die Verarbeitung der Ressource durch den Webbrowser zu beeinträchtigen.
	Arbeit des Hauptthreads minimieren	Webbrowser bestehen traditionell aus einem Haupt-Rendering-Thread, der die meisten Aktualisierungen auf der Webseite und die Ausführung von JavaScript übernimmt. JavaScript wird auf dem Hauptthread ausgeführt, um die JavaScript-Implementierung zu vereinfachen, so dass der JavaScript-Programmierer sich nicht mit Multi-Threading-Programmiermustern befassen muss. Bei langwierigen JavaScript-Berechnungen wird es im Single-Thread-

		Verfahren ausgeführt. Im Gegensatz dazu verfügen heutzutage alle CPUs über mehrere Kerne, die eingeschaltet werden müssen, während sie nicht voll ausgelastet sind.
	Optimieren der Bildgröße	Bilder werden mit festen Pixelabmessungen auf der Festplatte gespeichert. Dies bestimmt die Dateigröße und die Qualität, die bei der Anzeige des Bildes auf dem Bildschirm erreicht werden kann. Auf Webseiten können wir die Größe der Bilder dynamisch von der gespeicherten Größe auf eine bestimmte Anzeigegröße anpassen. Im Idealfall sind die gespeicherten Pixelmaße genau so groß oder kleiner als die Anzeigegröße in Pixeln, damit keine Bandbreite oder Speicherplatz verschwendet wird. Die Anzeigegröße von Bildern variiert von Gerät zu Gerät und kann sich sogar ändern, wenn das Fenster vergrößert wird. Für diesen Anwendungsfall bieten Webbrowser die Funktion der "responsiven Bilder". In der Praxis speichert der Webserver mehrere Versionen desselben Bildes und entscheidet dann je nach Bildschirm- und Fenstergröße, welche Bildgröße geladen werden soll.
	Ungenutzte CSS-Definitionen entfernen	Mit Cascading Style Sheets (CSS) können HTML-Inhalte sehr genau gestaltet werden. Um diese Flexibilität zu erreichen, sind die CSS-Dateien sehr komplex und müssen energieintensiv analysiert und verarbeitet werden. Der Browser muss alle angegebenen CSS-Dateien herunterladen, alle Definitionen in diesen Dateien verarbeiten, sie auf den DOM anwenden und das Layout für die Darstellung berechnen. Jede hinzugefügte CSS-Definition erhöht die für diesen Prozess benötigte Zeit und Rechenleistung.
	Bilder in modernen Formaten bereitstellen	Bilder sind ein Schlüsselelement in modernen Websites und werden häufig verwendet. Moderne Bildformate können dazu beitragen, die Anforderungen an Bandbreite, Speicherplatz und Rechenleistung des anzeigenden Geräts zu verringern. Es gibt mehrere neue Bildformate zur Auswahl, zum Beispiel WebP und AVIF. Alle neuen Formate bieten eine bessere Komprimierung, eine höhere Qualität und mehr Funktionen als herkömmliche Formate. So bietet WebP etwa 30 % kleinere Dateigrößen als JPEG, ohne dass die Qualität darunter leidet.

ANHANG E - Bestpractices Microsoft

Bereich	Praxis
Applications Design	Chatty I/O Antipattern
	Microservices statt Monolith
	Cloud Native Design Patterns
	Backward software compatibility
	Circuit Breaker Pattern
	Efficient Ressource Usage
	Asyn access patterns
	Server-side vs client-side rendering
	UX-Design for Sustainability
	Update legacy code
Platform Design	Platform and service updates
	Deploy to low-carbon regions
	Process when carbon intensity is low
	Batch workloads during low-carbon intensity
	Containerize workloads where applicable
	Sizing
	Delete Zombie workloads
	Autoscaling and Bursting
	Serverless / Workloads
Testing Efficency	Automate CI/CD to scale worker agents as needed
	Profiling and measuring
	Consider caching when using CI/CD agents
	Split large code repositories
Profiling and measuring	Assess where parallelization is possible
	Assess with chaos engineering
	Establish CPU and Memory thresholds in testing
Measure and track carbon impact in operational procedure for workloads on Azure	The Emissions Impact Dashboard
	Define emissions target
	Identify the metrics and set improvement goals
	Cost optimization as a proxy
	Defining policies
Community and knowledge	Create a sustainability community

sharing	Plan for learning
	Share best practices across teams
	Plan for incentives
Network efficiency	Make use of a CDN
	Follow caching best practices
	Select Azure regions based on where the customer resides
	Use managed audio and video streaming services with built-in compression
	Enable network file compression
	Maximize network utilization within the same cloud and region
Storage efficiency	Enable storage compression
	Optimize database query performance
	Use the best suited storage access tier
	Only store what is relevant
	Determine the most suitable access tier for blob data
	Reduce the number of recovery points for VM backups
	Revise backup and retention policies
	Optimize the collection of logs
Security monitoring	Use cloud native log collection methods where applicable
	Avoid transferring large unfiltered data sets from one cloud service provider to another
	Filter or exclude log sources before transmission or ingestion into a SIEM
	Archive log data to long-term storage
Network architecture	Use cloud native network security controls to eliminate unnecessary network traffic
	Minimize routing from endpoints to the destination
	Use network security tools with auto-scaling capabilities
	Evaluate whether to use TLS termination
	Use DDoS protection
Endpoint security	Integrate Microsoft Defender for Endpoint
Security-Reporting	Tag security resources

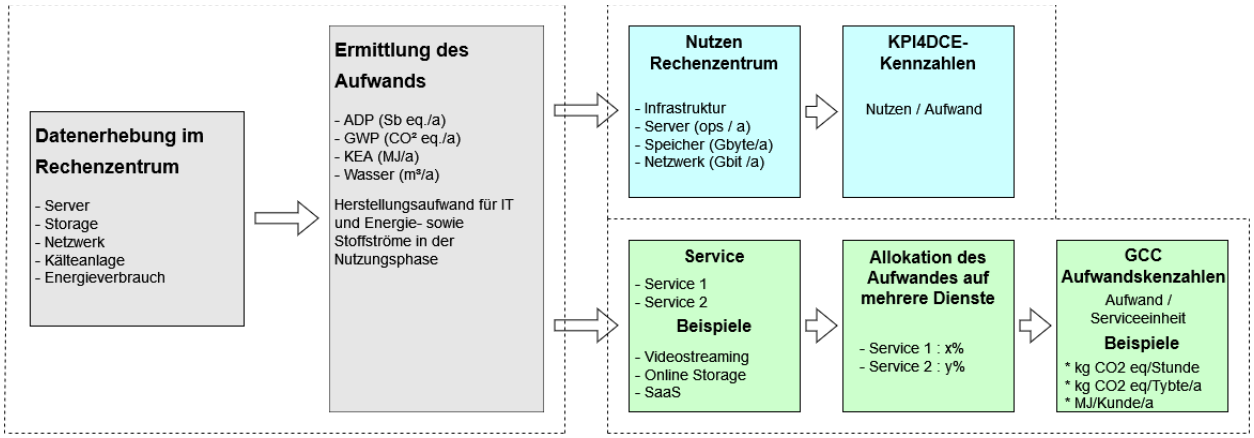
ANHANG F - Anforderungen in den Anhängen der Verordnung 2019/424

Anforderung	Details zur Anforderung
Mindesteffizienz der Stromversorgungseinheit (PSU)	Die Verordnung legt eine Mindesteffizienz fest, die eine Stromversorgungseinheit (PSU) bei einem bestimmten Prozentsatz ihrer Nennlast aufweisen muss. Beispielsweise muss ab dem 1. Januar 2023 eine PSU bei 20 % ihrer Nennlast mindestens: 90 % effizient für eine mehrfache Ausgangsversorgung; 94 % effizient für eine einzelne Ausgangsversorgung sein.
Maximale Leistungsaufnahme im Leerlaufzustand	Die Leistungsaufnahme im Leerlaufzustand ist die benötigte Leistung (in Watt), wenn ein Server betriebsbereit ist, jedoch keine Arbeit verrichtet. Hierbei handelt es sich um die Summe aus dem Grundbetriebsleistungsbedarf im Leerlaufzustand und den Leerlaufzustandsbedarfen für zusätzliche Komponenten. Die Verordnung 2019/424 gibt die maximale Leistungsaufnahme im Leerlaufzustand für verschiedene Arten von Servern vor. Beispielsweise beträgt der Grundbetriebsleistungsbedarf im Leerlaufzustand für 1-Sockel-Server 25 Watt. Zusätzlich beträgt der zusätzliche Leerlaufleistungsbedarf für mehr Speicher 0,18 Watt pro Gigabyte (GB).
Anweisungen für Hersteller und Endbenutzer	Gemäß 2019/424 sind die Hersteller verpflichtet, in den Bedienungsanleitungen für Benutzer unter anderem folgende Produktinformationen anzugeben: • Produkttyp • Herstellername und Adresse • Herstellungsjahr • PSU-Effizienz • Leistungsaufnahme im Leerlaufzustand • Maximale Leistung Erklärte Betriebszustandsklasse
Konformitätsbewertung anhand interner technischer Dokumentation	Die technische Dokumentation für die Konformitätsbewertung muss die Informationen aus dem vorherigen Abschnitt „*Anweisungen für Hersteller und Endbenutzer*“ sowie Folgendes enthalten:

	• Das Gewichtsspektrum auf Bauteilebene von:
	  ○ Kobalt in den Batterien
	  ○ Neodym in den Festplattenlaufwerken (HDD)
	• Anweisungen für Demontagevorgänge, einschließlich:
	  ○ Art des Vorgangs
	  ○ Art und Anzahl der Befestigungsmethoden
	  ○ Erforderliche Werkzeuge

Überlegungen zur Reparatur, Wiederverwendung und Aufarbeitung	Schließlich müssen die Hersteller sicherstellen, dass ihre Versiegelungs-, Befestigungs- oder Verbindungsmethoden die Zerlegung nicht behindern. Das Design soll somit Reparatur oder Wiederverwendung der Komponente ermöglichen. Diese Bedingung gilt für: • Datenspeichergeräte • Prozessoren (CPU) • Stromversorgungseinheiten (PSUs) • Batterien • Gehäuse • Hauptplatinen • Arbeitsspeicher • Grafik

ANHANG G - Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen KPI4CDE und GCC-Kennzahlen



ANHANG H - EU DC CoC - Practices to become minimum expected – 2020 bis 2023.

No	Name	Beschreibung	Bereich	Jahr
4.2.9	Netzwerk Energie Nutzung	Bei der Anschaffung neuer Cloud-Dienste oder der Bewertung einer Cloud-Strategie sollte der Einfluss auf die Nutzung von Netzwerkausrüstung und die potenzielle Steigerung oder Verringerung des Energieverbrauchs bewertet werden, um informierte Kaufentscheidungen zu treffen. Die Mindestanforderungen sollten Elemente innerhalb des Rechenzentrums umfassen. Die Ambition besteht darin, den Gesamtenergieverbrauch und die Energieeffizienz zu berücksichtigen, einschließlich der Aspekte, die mit dem Betrieb mehrerer Standorte und dem Energieverbrauch des Netzwerks zwischen diesen Standorten zusammenhängen.	Optional	2023 (Acton et al., 2022)
9.3.1	Partielles PUE Berichte	Berichten Sie den teilweisen PUE gemäß EN 50600-4-2. Wenn der teilweise PUE berichtet wird, sollte der standardisierte KPI (Key Performance Indicator) verwendet werden.	Optional	2022 (Acton et al., 2021)
9.3.1	CER Berichte	Berichten Sie den CER gemäß EN 50600-4-7. Wenn der CER berichtet wird, sollte der standardisierte KPI (Key Performance Indicator) verwendet werden.	Optional	2022 (Acton et al., 2021)
9.3.1	REF Berichte	Berichten Sie den REF gemäß EN 50600-4-3. Wenn der REF berichtet wird, sollte der standardisierte KPI (Key Performance Indicator) verwendet werden.	Optional	2022 (Acton et al., 2021)
9.3.1	ITEEsv Berichte	Berichten Sie den ITEEsv gemäß ISO/IEC30134-4-4. Wenn der ITEEsv berichtet wird, sollte der standardisierte KPI (Key Performance Indicator) verwendet werden.	Optional	2022 (Acton et al., 2021)
9.31	ITEUsv Berichte	Berichten Sie den ITEUsv gemäß ISO/IEC 30134-4-5. Wenn der ITEUsv berichtet wird, sollte der standardisierte KPI (Key Performance Indicator) verwendet werden.	Optional	2022 (Acton et al., 2021)
9.3.1	Schritfliche Berichte	Wenn berichtet wird, sollte der standardisierte KPI (Key Performance Indicator) in schriftlichen Berichten für das Energiemanagement verwendet werden. Dies gilt für PUE, pPUE, ERF, CER, REF, ITEESV, ITEUSV.	Optional	2022 (Acton et al., 2021)
4.1.10,	EU Eco Design	Aktualisierung der Praxis 4.1.10 im Einklang mit		2022

4.1.6, 4.4.4, 6.1.4	Directive / LOT 9 Updates	europäischen Initiativen wie der EU-Richtlinie für EU Eco Design / LOT 9 anstelle der Bezugnahme auf das US Energy Star-Programm. Überprüfen Sie auch die Praktiken 4.1.6, 4.4.4 und 6.1.4 aus der gleichen Perspektive.		(Acton et al., 2021)
3.2.4	Lebenszyklus Assement	Lebenszyklusanalyse Einführung eines Plans für die Lebenszyklusanalyse (LCA) gemäß den EU-Richtlinien und international standardisierten Methodologien. Beispiele hierfür sind die ISO 14040 und ISO 14044. Die Norm EN 15978 "Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der Umweltleistung von Gebäuden - Berechnungsmethode" wird ebenfalls als relevant für diese Praxis betrachtet. Hinweis: Diese Praxis zielt darauf ab, die Gesamtkohlendioxidbilanz zu reduzieren und die Nachhaltigkeit zu verbessern, anstatt die Energieeffizienz direkt zu verbessern.	Gesamtes Rechenzentrum	2022 (Acton et al., 2021)
4.3.4	Konsolidierung der vorhandenen Dienste	Bestehende Dienste, die keine hohe Auslastung ihrer Hardware erreichen, sollten durch den Einsatz von Ressourcenaustauschtechnologien konsolidiert werden, um die Nutzung physischer Ressourcen zu verbessern. Dies gilt für Server, Speicher und Netzwerkgeräte.	Gesamtes Rechenzentrum	2022 (Acton et al., 2021)
4.3.5	Dekommissionierung von Diensten mit geringer Kritikalität	Identifizieren Sie Dienste, deren Geschäftswert oder Kritikalität gering ist und die den finanziellen oder umweltbedingten Aufwand nicht rechtfertigen. Erwägen Sie, diese Dienste außer Betrieb zu setzen oder zu archivieren oder an Standorte mit geringerer Zuverlässigkeit/Resilienz zu verschieben, um den Energie- und Finanzaufwand zu reduzieren.	Gesamtes Rechenzentrum	2022 (Acton et al., 2021)
4.3.6	Deaktivierung und Entfernung von ungenützter Ausrüstung	Server, Netzwerk- und Speicherausrüstung, die für längere Zeit ungenutzt ist und nicht virtualisiert oder archiviert werden kann, sollte heruntergefahren oder in einen energiesparenden "Schlafzustand" versetzt werden. Eine vollständige Entfernung sollte ebenfalls in Betracht gezogen werden. Hinweis: Es wird notwendig sein, die Fähigkeit von Legacy-Anwendungen und Hardware zu validieren, diese Zustandsänderungen ohne Funktions- oder Zuverlässigkeitsverlust zu überstehen.	Gesamtes Rechenzentrum	2022 (Acton et al., 2021)
5.7.5	„Capture Ready" - Infrastruktur	Erwägen Sie die Installation einer "Capture Ready" - Infrastruktur, um von verfügbaren Abwärmequellen während Neubau- und Modernisierungsprojekten zu profitieren und diese zu verteilen.	Optional	2021 (Acton et al., 2020)

ANHANG I - Energieeffizienz Technik – Softwarelevel

Referenz - Literaturanalyse	Taxonomie	Technologie	Ergebnisse	Beschreibung
Shojaei et al., 2018 Publikation im Rahmen der eigenen systematischen Literaturanalyse gefunden	Hardware Level Virtualisierung	VMDFS steht für "Virtual Machine Dynamic Frequency Scaling Framework"	Die Ergebnisse der Experimente mit VMDFS zeigen, dass neben der Reduzierung von Verstößen gegen Service Level Agreements um bis zu 43,22% auch der Gesamtenergieverbrauch um 40,16% reduziert wird. Darüber hinaus stieg die Gesamtbetriebszeit vor einem Host-Shutdown im Durchschnitt um 17,44%, während die Betriebszeit vor einer Virtual-Machine-Migration um 7,2% zunahm. Dies zeigt auch insgesamt eine Verringerung der Anzahl von Migrationen.	VMDFS (Virtual Machine Dynamic Frequency Scaling) ist ein adaptives Modell zur Energieoptimierung von virtuellen Maschinen. Es überwacht die Schwankungen in der Arbeitslast und passt dynamisch die CPU-Frequenz der virtuellen Maschinen an. Das Framework nutzt einen verbesserten Ansatz namens Enhanced Exponential Moving Average (EEMA) für die Vorhersage der zukünftigen Arbeitslasten. Durch diese adaptive Steuerung wird der Energieverbrauch im Rechenzentrum reduziert.
Liao et al., 2020 Publikation im Rahmen der eigenen systematischen Literaturanalyse gefunden	Applikation Level	Kosteneffiziente ausgelagerte Entschlüsselung von attributbasierten Verschlüsselungsschemata sowohl für Nutzer als auch für Cloud Server im Green Cloud Computing	Die neue und sichere Methode für die ABE-OD-Schemata kann den Aufwand sowohl für Benutzer als auch für den Cloud-Server reduzieren. Das bedeutet, dass der Aufwand des Cloud-Servers nur konstante Rechenkosten für alle ausgelagerten Entschlüsselungen desselben Geheimtexts erfordert, zusätzlich zur Reduzierung der Rechenkosten für den Benutzer	Die GHW-Methode wird für die ausgelagerte Entschlüsselung (ABE-OD) angewandt. Diese Methode ermöglicht es dem Cloud-Server, die transformierte Geheimtext nur einmal zu berechnen und bei Bedarf wiederzuverwenden. Sie umfasst sieben Algorithmen, darunter Setup, Encrypt, KeyGen, GenTKout, Transformout, Decrypt und Decryptout. Der Fokus liegt auf der Reduzierung der Rechenkosten für den

				Benutzer und konstanten Berechnungskosten für den Cloud-Server bei allen ausgelagerten Entschlüsselungen desselben Geheimtexts. Das System wurde auch auf eine RCCA-sichere ABE-OD-Erweiterung übertragen.
Beloglazov & Buyya, 2010 Publikation aus der systematischen Literturanalyse von Bharany et al. (2022)	Voller Virtualisierung Level	Reallocation algorithm and Modified Best-Fit Decreasing (MBFD) algorithm	Führt zu einem starken Rückgang des Energieverbrauchs in der Cloud Verglichen mit Techniken der statischen Zuweisung von Ressourcen in Rechenzentren	Methode für die dynamische Konsolidierung von virtuellen Maschinen (VMs) vor. Diese basiert auf adaptiven Nutzungsschwellen, um hohe Service Level Agreements (SLA) sicherzustellen.
Shailesh S. Deore & Ashok Narayan Patil, 2012 Publikation aus der systematischen Literturanalyse von Bharany et al. (2022)	Betriebssystem Level	Energy-Efficient Scheduling Scheme for Virtual Machines in Cloud Computing	-Enthält weniger VMs als Bull-Methode, hybride Algorithmen und RR -spart etwa 21% der Energie, mehr als die Menge, die von RR	Die Technik beschreibt ein energieeffizientes Terminierungsschema namens EESS für virtuelle Maschinen. Das Schema zielt darauf ab, die Workload auf einer minimalen Anzahl von virtuellen Maschinen zu verteilen, um den Energieverbrauch zu minimieren.
Mandal et al., 2023 Publikation im Rahmen der eigenen systematischen Literaturanalyse gefunden	VM-Migration	Maximum energy consumption per unit VM size (MECpVmS) VM selection policy	Der vorgeschlagene Algorithmus ist nachweislich energieeffizienter als bestehende Lösungen. Außerdem hat die MECpVmS VM-Auswahl Politik weniger SLA Vertletzung im Vergleich zu seinen Vorgängern.	Eine neuen VM-Auswahlrichtlinie namens MECpVmS, die sich auf VMs mit hohem Energieverbrauch und geringer Größe konzentriert. Ziel ist es, einen Ausgleich zwischen Energieverbrauch und Verletzungen der Service-Level-Vereinbarung (SLAV) zu finden.
Mustafa et al.,	Ressourcenlev	Minimum Power	Die energiebewusste	Ein energieeffizienter

2019 Publikation im Rahmen der eigenen systematischen Literaturanalyse gefunden	el Migration	Best Fit Decreasing (MPBFD)	MCBFD verbraucht 46 % weniger Energie als der MBFD-Algorithmus und 14 % weniger als die SMCBFD. Im Vergleich zur zweitbesten Technik, ECTC, zeigt die MCBFD eine Energieeinsparung von 8 %. Der MBFD weist 9 % weniger SLA-Verstöße auf als SEMaxUtil und 10 % weniger als SMPBFD. Im Vergleich zur schlechtesten Technik hat der MBFD 19 % weniger Verstöße als die MCBFD. Der MBFD ist führend in Bezug auf SLA-Verstöße und Leistungsverschlechterung, mit 20 % weniger Verschlechterung als SMaxUtil, 27 % weniger als SMPBFD und 55 % weniger als die energiebewusste MCBFD	Ansatz für die Konsolidierung von Workloads in Rechenzentren. Die Methode, MPBFD, wählt Server mit niedrigstem Spitzenenergieverbrauch für maximale VM-Unterbringung. Schwellenwerte werden genutzt, um Unterlastung zu erkennen und SLA-Verletzungen zu minimieren. Eine Mindestmigrationszeitpolitik reduziert Leistungseinbußen durch Migration.
Gholipour et al., 2020 Publikation im Rahmen der eigenen systematischen Literaturanalyse gefunden	VM-Konsolidierung	Joint VM and Container Multi-Criteria Migration Decision (JVCMMD)	Die vorgeschlagene Lösung zeigt in den untersuchten Metriken (Anzahl der VM-Migrationen, Anzahl der Container-Migrationen, SLA-Verletzungen, ESV-Metrik, ESM-Metrik und ESCM-Metrik) eine bessere Leistung im Vergleich zu anderen Szenarien. Es ergibt sich eine signifikante Reduzierung von 9,9% bis 99,99% in Energieverbrauch, SLA-Verletzungen, ESV-Metrik, Anzahl der VM-	Technik mit der die Konsolidierung von virtuellen Maschinen (VM) und Containern in Cloud-Rechenzentren durchgeführt werden kann. Das Verfahren, JVCMMD optimiert gleichzeitig Energieverbrauch, Migrationsanzahl und SLA-Verletzungen.

			Migrationen und ESM-Metrik im Vergleich zu den besten vorherigen Szenarien, die auf nur VM- oder nur Container-Migrationen basieren.	
Thayananthan et al., 2017 Publikation im Rahmen der eigenen systematischen Literaturanalyse gefunden	Speicher Level	Li-Fi	Die vorgeschlagene Methode zur Nutzung von Li-Fi-Technologie und effizientem Wissensmanagement reduziert die Komplexität und ermöglicht eine bessere Kontrolle über die Sicherheitsstufen und Verfügbarkeit von Diensten. Grünes Cloud Computing bietet notwendigen Zugang zu Dienstleistern und Benutzern, aber die Sicherheit bleibt anfällig für externe Angriffe. Die Forschung zeigt, dass grünes Cloud Computing ein sicheres und umweltfreundliches System ermöglicht, ohne zusätzliche Kosten, dank der Optimierung der Schlüsselsuche im Wissensmanagement durch den Grover-Algorithmus.	Li-Fi, eine energieeffiziente Technologie, ermöglicht Datenübertragung durch Licht und kann mit Wi-Fi fusioniert werden. Diese Technologie bietet hohe Geschwindigkeiten und grüne Energie durch die Nutzung von Licht für Beleuchtung und Datenübertragung. Kryptografie auf Li-Fi-Basis wird für eine grüne Datenspeicherung mit hoher Kapazität und geringer Komplexität eingesetzt.Die Schichten der Datenübertragung reichen von der Cloud bis zur Anwendung und umfassen Authentifizierung, Schlüsselverteilung und Cybersecurity-Lösungen.

ANHANG J - Energieeffizienz Technik – Hardwarelevel

Referenz - Literaturanalyse	Taxonomie	Technologie	Ergebnis	Beschreibung
Sohaib Ajmal et al., 2021 Publikation im Rahmen der eigenen systematischen Literaturanalyse gefunden	Chipset Level	Cost-based Energy Efficient Scheduling Technique for Dynamic Volage Frequency Scaling (DVFS) Systems (CEEST)	Der vorgeschlagene Algorithmus spart bis zu 30 % Energie im Vergleich zu bestehenden Algorithmen. Auch die Auslastung der Ressourcen wird deutlich um 30 % erhöht. Was die SLA-Verletzungen angeht, so hat der vorgeschlagene Algorithmus die SLA-Verletzungen um bis zu 50 % reduziert.	Der Algorithmus "Cost-based Energy Efficient Scheduling Technique for Dynamic Voltage Frequency Scaling (DVFS) Systems (CEEST)" dient als eine mögliche Antwort auf den steigenden Energieverbrauch von Cloud-Rechenzentren. CEEST optimiert die Servernutzung durch Skalierung virtueller Maschinen, das Abschalten unterausgelasteter Server und die Einhaltung von Service Level Agreements (SLA).
Safari & Khorsand, 2018 Publikation im Rahmen der eigenen systematischen Literaturanalyse gefunden	Schaltkreis Level	Energy-aware scheduling algorithm for time-constrained workflow tasks	Die Ausführungszeit waren niedriger als bei anderen Methoden, insbesondere bei einer hohen Anzahl von Aufgaben, da diese mit einer geringeren Anzahl von Prozessoren bearbeitet wurden. Prozessoren bearbeitet werden. Um die Ressourcennutzung zu verbessern, wenn es viele Prozessoren gibt, wählt der Algorithmus die besten aus und eliminiert die ineffizient sind. Die Energieeinsparungen des vorgeschlagenen Algorithmus waren etwa 38 % höher als bei DEWTS. Außerdem war seine Leistung um 20,93 % besser	Ein energiebewussten Zeitplanalgorithmus für zeitlich begrenzte Workflow-Aufgaben vor, der die Methode Dynamic Voltage and Frequency Scaling (DVFS) verwendet. Ziel ist es, den Energieverbrauch und SLA-Verletzungen zu reduzieren und die Ressourcennutzung zu verbessern. Der Algorithmus umfasst einen energiebewussten Zeitplan und die Berücksichtigung von QoS-Parametern.

			als EES in Bezug auf die Auslastung	
Stavrinides & Karatza, 2019 Publikation im Rahmen der eigenen systematischen Literaturanalyse gefunden	Kontext Level	Earliest Deadline First with DVFS and Approximate Computations (EDF_DVFS_AC)	Die durchschnittliche Energieeinsparung im Fall von EDF_DVFS_AC betrug 11,01 % im Vergleich zur nicht energiebewussten Strategie EDF und 9,20 % im Vergleich zur anderen energiebewussten Planungsmethode EDF_DVFS. Die durchschnittliche Verbesserung bei SLA-Verletzungen betrug 33,98 % bzw. 27,90 % im Vergleich zu EDF bzw. EDF_DVFS. Bei der Ergebnisgenauigkeit betrug der durchschnittliche Rückgang 0,21 % im Vergleich zu den beiden Basisstrategien. Darüber hinaus erbrachte EDF_DVFS_AC durchschnittliche monetäre Kosteneinsparungen von 7,82 % im Vergleich zu EDF und 5,70 % im Vergleich zu EDF_DVFS. Im Durchschnitt waren die Energie- und Geldkosteneinsparungen bei rechenintensiven Workflows, die im Allgemeinen längere Ausführungszeiten und damit einen höheren Energieverbrauch und höhere Geldkosten erfordern, bedeutender.	Diese Technik befasst sich mit energieeffizientem, QoS-bewusstem und kosteneffektivem Scheduling für Echtzeit-Workflow-Anwendungen in Cloud-Computing-Systemen. Der Ansatz nutzt pro-Core Dynamic Voltage and Frequency Scaling (DVFS) auf heterogenen Multi-Core-Prozessoren und approximative Berechnungen, um Zeitplangaps zu füllen. Dabei werden die Auswirkungen von Eingabefehlern auf die Verarbeitungszeit der Aufgaben berücksichtigt. Ziel ist es, Pünktlichkeit und Energieeffizienz durch den Ausgleich von Ergebnispräzision zu bieten, während die Qualität der abgeschlossenen Jobs und die Kosten auf einem akzeptablen Niveau gehalten werden.

ANHANG K - Energieeffizienz Technik – VM Konsolidierung Level

Referenz - Literaturanalyse	Taxonomie	Technologie	Ergebnisse	Beschreibung
Shu et al., 2021 Publikation im Rahmen der eigenen systematischen Literaturanalyse gefunden	Task Level	Strong agile response optimization (SARO) für Task scheduling und Immune clonal selection algorithm (ICSA)	Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass unser SARO-Algorithmus eine gute Leistung in Bezug auf Konvergenzgeschwindigkeit, Ausführungszeit Ausführungszeit, Zuverlässigkeit, Stabilität, Optimierung des Energieverbrauchs, CPU Auslastung im Vergleich zu den Testalgorithmen	Aufgabenplanung in Cloud-Computing-Systemen wird mit dem Algorithmus namens Strong Agile Response Optimization (SARO) umgesetzt. SARO nutzt das Spitzenenergieverbrauchsmodell von Rechenzentren und die Zeitplanung von Aufgaben, um eine effiziente und stabile Aufgabenplanung zu gewährleisten. Durch die Anwendung agiler Optimierungstechniken wird die Reaktion auf Aufgabenfehler verbessert, indem die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion von Überlaufereignissen in der Aufgabenwarteschlange analysiert wird. Die Kombination von SARO mit dem Immunklonselektionsalgorithmus (ICSA) ermöglicht eine ausgewogene lokale und globale Suche, adaptive Verteilung und nahtlose Integration in grüne Cloud-Computing-Plattformen.
Surendran & Tamilvizhi, 2018 Publikation im Rahmen der eigenen	Virtual Machine Level	Green Resource Management Techniques (GRMT).	Die vorgeschlagene Forschungsarbeit konzentrierte sich nur auf grün basierte adaptive Fehlertoleranz	GRMT im Bereich Cloud-Computing, dienen sowohl die Ressourcennutzung zu optimieren und Umweltauswirkungen zu

systematischen Literaturanalyse gefunden			Ressourcenauswahl und grüner Virtualisierung der Ressourcenzuweisung Zuweisung. Die vorgeschlagene Arbeit nutzt eine größere Anzahl von QoS Parameter, wie z.B. dynamische Kosten, Nutzungszeit, Priorität, GSLA-Politiken für Aufträge und Ressourcen, Fehlertoleranz und ausgeglichene Arbeitslast.	minimieren. In dieser Technik gibt es zwei Hauptkomponenten, nämlich das adaptive Fehler-Toleranz-Ressourcen-auswahlverfahren und die Virtualisierung der Ressourcenzuweisung auf Basis grüner Prinzipien. Die adaptive Fehler-Toleranz-Auswahl optimiert die Auswahl von Cloud-Ressourcen basierend auf Workload und Aufgabengröße. Die Virtualisierung von Ressourcenzuweisungen verwendet vermehrt virtuelle Maschinen zur Reduzierung des Energieverbrauchs und der CO2-Emissionen.
S. Supreeth, 2022 Publikation im Rahmen der eigenen systematischen Literaturanalyse gefunden	Prozessor-kapazität Level	VM Scheduling for Efficient Dynamically Migrated VM (VMS-EDMVM) unter Anwendung Modified Weighted Local Regression (MWLR) Over-utilized host detection Algorithm	VMS-EDMVM-Methode eine bemerkenswerte Simulation mit einer SLA-Verletzungsrate von 0,1%, einem Energieverbrauch von 104,45 KWH und lediglich 2202 VM-Migrationen. Die VMS-EDMVM-Methode führt auch zu signifikanten Verbesserungen gegenüber den Vergleichsalgorithmen in Bezug auf den Energieverbrauch. Des Weiteren erzielt sie Verbesserungen von 41,18% bis 93,75% in Bezug auf SLA-Verletzungen sowie zu Verbesserungen von 4,36% bis 90,43% hinsichtlich der VM-Migrationsanzahl.	Ziel dieser Methode ist es Service Level Agreement (SLA) Verletzungen zu minimieren, VM-Migrationen zu verwalten und den Energieverbrauch effektiv zu senken. Dabei wird eine Kombination aus dem MWLR-Algorithmus und dem "Best-Fit CPU, BW (BFCB)" VM-Scheduling-Mechanismus verwendet. Die Kernschritte umfassen die Erkennung überlasteter und unterausgelasteter Hosts, die Auswahl der zu migrierenden VMs und die zielgerichtete Zuweisung von VMs auf Basis einer adaptiven Nutzungsschwellenwertmeth ode.
Lin et al., 2011 Publikation aus	Speicher Level	„Dynamic Round-Robin" (DRR)	Energieeinsparung von 43,7% und im Rahmen	DDR soll eine energiebewusste Zuweisung

der systematischen Literturanalyse von Bharany et al. (2022)			physischer Server 60% weniger Verbrauch im Vergleich zu anderen Planungsalgorithmen	und Konsolidierung von virtuellen Maschinen (VMs) durchführen. Ziel ist es, den Energieverbrauch zu reduzieren, indem Workloads konsolidiert und inaktive physische Maschinen heruntergefahren werden. DRR erweitert den klassischen Round-Robin-Algorithmus und nutzt zwei Regeln für die effiziente Konsolidierung von VMs. Die erste Regel verhindert die Zuweisung neuer VMs an eine physische Maschine, die sich im "Ruhestandszustand" befindet, was bedeutet, dass sie heruntergefahren werden kann, sobald die verbleibenden VMs abgeschlossen sind. Die zweite Regel erzwingt die Migration von VMs und das Herunterfahren von Maschinen, die sich für eine ausreichend lange Zeit im "Ruhestandszustand" befinden, um den Konsolidierungsprozess zu beschleunigen.
Shojafar et al., 2020 Publikation im Rahmen der eigenen systematischen Literaturanalyse gefunden	Kommunikationspotential Level	Joint computing-plus-communication optimization framework exploiting virtualization technologies, called MMGreen	Die Experimente mit synthetischen und realistischen Workloads bestätigen, dass MMGreen alle anderen geprüften Alternativen für ein DVFS-fähiges Rechenzentrum übertrifft. Es erzielt eine Energieeinsparung von mehr als 60 Prozent im Vergleich zu statischen Lösungen, bei denen die CPU-Frequenz	MMGreen basiert auf Virtualisierungstechnologien und nutzt dynamische Spannungs- und Frequenzskalierung (DVFS) für CPU-Frequenzen, um den Energieverbrauch zu minimieren. Das Framework verfolgt das Ziel, sowohl die Service Level Agreements (SLAs) für die Qualität der Dienstleistung als auch

			nicht an die Arbeitslast angepasst wird. Die Leistungsanalyse bietet zudem detaillierte Einblicke in die Auswirkungen der Algorithmus- und Modellparameter auf die Gesamtleistung des vorgeschlagenen Frameworks.	maximale Energieeinsparungen zu gewährleisten. MMGreen ist darauf ausgerichtet, Multimedia-Daten mit rechenintensiven Aufgaben und einem hohen Datenaustausch effizient zu verarbeiten.

ANHANG L - Energieeffizienz Technik – Natur inspirierte Algorithmen

Referenz - Literaturanalyse	Taxonomie	Technologie	Ergebnisse	Beschreibung
Mansour et al., 2023 Publikation im Rahmen der eigenen systematischen Literaturanalyse gefunden	Kaiserpinguin Optimierung	Energy efficient resource scheduling using Cultural emperor penguin optimizer (CEPO) algorithm, EERS-CEPO	Die EERS-CEPO-Technik zeigt in simulierten Experimenten in einer GCC-Umgebung mit 6 physikalischen Maschinen signifikante Vorteile. Im Vergleich zu bestehenden Techniken erreicht sie bei 50 Aufgaben eine um 236 ms reduzierte Reaktionszeit, bei 200 Aufgaben eine um 597 ms verringerte Reaktionszeit und bei 400 Aufgaben eine um 12.646 ms verringerte Reaktionszeit. Zusätzlich zeigt die Technik niedrigere Ausführungszeiten, geringeren Energieverbrauch und niedrigeren durchschnittlichen Energieverbrauch über verschiedene Aufgaben. Insgesamt übertrifft die EERS-CEPO-Technik bestehende Zeitplanungsmethoden in einer GCC-Umgebung.	Der EERS-CEPO soll die Last gleichmäßig auf verschiedene Rechenzentren oder Ressourcen verteilt wird, um eine Überlastung einzelner Ressourcen zu vermeiden. Der CEPO-Algorithmus, eine Kombination aus dem Cultural Algorithm (CA) und dem Emperor Penguin Optimizer (EPO), wird verwendet, um die Ausbeutungsfähigkeiten des EPO-Algorithmus zu verbessern. Der EERS-CEPO-Algorithmus nutzt eine abgeleitete Fitnessfunktion, um Ressourcen in Rechenzentren optimal zu planen, Betriebs- und Wartungskosten zu minimieren sowie Energieverbrauch und Wärmeerzeugung zu reduzieren
Mohammadzadeh et al., 2021 Publikation im Rahmen der eigenen systematischen Literaturanalyse	Graue Wolf Optimierung	Improved chaotic binary grey wolf optimization algorithm	Der vorgeschlagene Algorithmus zeigt im Vergleich zu grundlegenden Algorithmen relativ geringe Aufgabenabschlusszeiten	Verbesserte Version des Grey Wolf Optimization (GWO)-Algorithmus, bekannt als Improved GWO (IGWO). Der verbesserte Algorithmus verwendet Methoden wie das Hill-

gefunden			, Kosten und Energieverbrauch. Insbesondere zeigte der Algorithmus eine effiziente Zeitnutzung bei verschiedenen Workflows. Bei mittelgroßen Workflows übertrifft der Algorithmus die anderen Algorithmen in Bezug auf die Kostenplanung. In großen Workflows sind die Ergebnisse im Energieverbrauch aufgrund von Optimierungen am Algorithmus vielversprechend, obwohl die Performance im Vergleich zu bestimmten Algorithmen variieren kann.	Climbing-Verfahren und Chaos-Theorie, um die Konvergenzgeschwindigkeit zu erhöhen und das Feststecken in lokalen Optima zu verhindern. Eine binäre Version des IGWO-Algorithmus wird dann vorgestellt, um das Problem der Workflowscheduling in Cloud-Computing-Rechenzentren zu lösen. Dabei werden verschiedene S-Funktionen und V-Funktionen verwendet, um die Ausführungskosten, die Gesamtdauer (makespan) und den Energieverbrauch zu minimieren.
Alyouzbaki & Al-Rawi, 2021 Publikation im Rahmen der eigenen systematischen Literaturanalyse gefunden	Ameisenkolonie Optimierung	Novel load balancing approach based on ant colony optimization technique	Die vorgeschlagene Technik übertrifft die TESA-Technik in Ausführungszeit und Energieverbrauch bei Cloud-basierten Lastenausgleichstests. Virtual Machine-Migration verbessert die Energieeffizienz und reduziert Ausführungszeit und Ressourcennutzung.	Methode zur Lastenverteilung im Cloud-Computing, die auf der Ameisenkolonie-Optimierungstechnik (ACO) basiert. Diese Methode zielt darauf ab, die Ausfallsicherheit des Cloud-Frameworks zu verbessern. Sie besteht aus drei Phasen: 1.) Definition der Anfangspopulation: Die Ausführungszeit und Ausfallrate jeder Maschine bilden die Anfangspopulation. Diese wird verwendet, um die effizienteste Maschine für die Ausführung von Cloudlets auszuwählen. 2.) Aktualisierung des Pheromons: Die

				Wahrscheinlichkeit des Versagens jeder Maschine wird basierend auf der Anfangspopulation berechnet. Hierbei fließen Pheromonspuren und heuristische Werte ein. 3.) Auswahl des besten Pheromons: Die Maschine mit der geringsten Ausfallwahrscheinlichkeit wird als beste Maschine für die Aufgabenmigration ausgewählt.
Usha Kirana & D'Mello, 2021 Publikation im Rahmen der eigenen systematischen Literaturanalyse gefunden	Schwarm basierte Optimierungen	Enhanced Particle Swarm Optimization (PSO)	Die vorgeschlagene EPSO-Technik zeigte geringeren Energieverbrauch und verbesserte Leistung im Vergleich zu bestehenden Methoden. Bei der Nutzung von HP ProLiant ML110 G4 und G5 erreichte EPSO eine optimale VM-Platzierung. Die Ergebnisse zeigen, dass mit 5400 VM-Migrationen der Energieverbrauch bei 38 kWh liegt. Bei 11,000 VM-Migrationen steigt der Verbrauch auf 90 kWh. Eine Abnahme der Migrationen senkt den Energieverbrauch. Bei 6000 Migrationen beträgt der Verbrauch 49 kWh. EPSO übertrifft bestehende Ansätze in Energieeffizienz und senkt den SLA-Verletzungsgrad.	Enhanced Particle Swarm Optimization (EPSO), zur Energieoptimierung in Cloud-Computing-Datenzentren. EPSO basiert auf Particle Swarm Optimization (PSO) und wurde durch die Anpassung von Operatoren und Parametern sowie die Integration eines energiebewussten Fitnesswerts optimiert. Zusätzlich wird eine Architektur mit Fokus auf: Host- und VM-Initialisierung, Erstellung von VM-Prioritäten sowie Auswahl der besten VM-Allokation basierend auf verbesserter Energieeffizienz erstellt
Y. Xu & Abnoosian, 2022 Publikation im	Genetischer Algorithmus	Hybrid algorithm aus Genetic Algorithm (GA)	Die vorgeschlagene Methode übertrifft die Vergleichsalgorithmen E-	Methode zur Verbesserung der Energieeffizienz und Ausführungszeit von

Rahmen der eigenen systematischen Literaturanalyse gefunden		und PSO als metaheuristischer Ansatz	ABC, SE-PSO, ACO und Firefly-Optimierung hinsichtlich Fitness, Ausführungszeit, CPU- und Speicherauslastung. Die Fitness der vorgeschlagenen Methode ist niedriger, was auf eine optimierte Auswahl und Migration von VMs hinweist. Die Ausführungszeit ist im Vergleich zu den anderen Methoden um durchschnittlich 29.01% verbessert. Die CPU- und Speichernutzung sind ebenfalls geringer, was auf eine bessere Leistung hindeutet. Insgesamt zeigt die vorgeschlagene Methode eine deutliche Verbesserung bei der Reduzierung des Energieverbrauchs und der Ausführungszeit.	virtuellen Maschinen (VM) im Kontext von VM-Migration in Cloud-Umgebungen. Dabei wird ein hybrider Optimierungsalgorithmus vorgeschlagen, der auf einer Kombination von genetischem Algorithmus (GA) und Partikelschwarmoptimierung (PSO) basiert. Dieser hybride Ansatz überwindet die Schwächen von PSO, wie schwache Konvergenz und Hindernisse bei der globalen Optimierung. Die Schlüsselbeiträge der Arbeit umfassen die Vorstellung dieses hybriden Algorithmus zur Bewältigung von VM-Migrationsproblemen in der Cloud und die Effizienzsteigerung hinsichtlich Energieverbrauch und Ausführungszeit.

ANHANG M - Zuschreibung genutzter Flaticon Graphiken

- Manufacturing icons created by Inna Mikheeva – Flaticon
- Mining icons created by Freepik – Flaticon
- Transport icons created by GOWI – Flaticon
- Warehouse icons created by toempong – Flaticon
- Data center icons created by Eucalyp – Flaticon
- Generator icons created by smalllikeart – Flaticon
- Landfill icons created by Uniconlabs – Flaticon
- Power plant icons created by Freepik – Flaticon
- Assembly icons created by Uniconlabs – Flaticon
- Fuel icons created by Smashicons – Flaticon
- Trash icons created by Good Ware – Flaticon
- Incineration icons created by monkik – Flaticon
- Automation icons created by Parzival' 1997 – Flaticon
- Data virtualization icons created by phatplus – Flaticon
- People icons created by ultimatearm – Flaticon
- Energy icons created by Kalashnyk – Flaticon
- CO2 cloud icons created by DinosoftLabs – Flaticon
- Electronics icons created by Freepik – Flaticon
- Multi icons created by Dewi Sari – Flaticon
- Consolidate icons created by Freepik – Flaticon
- Eco friendly icons created by kmg design – Flaticon
- Focus icons created by Freepik – Flaticon
- Idea icons created by Freepik – Flaticon
- Literature icons created by Freepik – Flaticon
- Synthesis icons created by Freepik – Flaticon
- Survey icons created by Freepik – Flaticon
- Paper icons created by Freepik – Flaticon
- Database icons created by Freepik – Flaticon
- Keyword icons created by Freepik – Flaticon
- Search icons created by srip - Flaticon

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AI *Artifical Intelligence*
API *Application Programming Interface*
CC *Cloud Computing*
CRM *Customer Relationship Management*
CSP *Cloud Service Provider*
GCC *Green Cloud Computing*
IaaS *Infrastructure-as-a-Service*
IoT *Internet of Things*
IT *Informationstechnik*
KPI4DCE *Key Performance Indicators for Data Centre Efficiency*
NIST *National Institute of Standards and Technology*
PaaS *Plattform-as-a-Service*
RAM *Random-Access Memory*
SaaS *Software-as-a-Service*
SCER *Software Carbon Efficeny Rating*
SCI *Software Carbon Intensity*
SDIA *Sustainable Digital Infrastructure Alliance*
VM *Virtuelle Maschine*

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Eigene Darstellung Fundamentale Charakteristika des Cloud Computing, Servicemodelle und Bereitstellungsmodelle basierend auf (Jayachander Surbiryala & Chunming Rong, 2019) 8
Abbildung 2: Eigene Darstellung der Servicemodelle basierend auf (Jayachander Surbiryala & Chunming Rong, 2019) 10
Abbildung 3: Eigene Darstellung Zeitstrahl Historie Cloud Computing basierend auf (Jayachander Surbiryala & Chunming Rong, 2019) 17
Abbildung 4: Eigene Darstellung der Lieferkette digitale Wirtschaft basierend auf (Max Schulze, 2023b) 19
Abbildung 5: Eigene Darstellung Einfluss von Cloud Computing auf die Umwelt basierend auf (Radu, 2017) 20
Abbildung 6: Eigene Darstellung Green Cloud Charakteristika basierend auf (Patil & Patil, 2019) 21
Abbildung 7: Eigene Darstellung mit Icons von Flaticon.com der Scopes entlang der Wertschöpfungskette basierend auf (Walsh, S. 12) 34
Abbildung 8: Eigene Darstellung mit Icons von Flaticon.com der Systemabgrenzung basierend auf (Björn Schödwell et al., 2017, S. 113) 37
Abbildung 9: Eigene Darstellung Ablauf einer systematischen Literaturrecherche basierend auf (Brocke et al., 2009, S. 8) 47
Abbildung 10: Eigene Darstellung Literatursuche nach Brocke et al. (2009, S. 9) 49
Abbildung 11: Eigene Darstellung Konzeptmatrix erweitert um Analysebereichen basierend auf Jane Webster und Richard T. Watson (2002, S. 17) 50
Abbildung 12: Eigene Darstellung einer Concept Map nach (Krüger et al., 2014) 52
Abbildung 13: Eigene Darstellung PRISMA Flow Diagramm basierend auf Page et al. (2021, 5) 55
Abbildung 14: Exemplarischer Screenshot Tabelle Analyse Suchmaschine Google Scholar 56
Abbildung 15: Exemplarischer Screenshot Tabelle Analyse Suchmaschine Scopus 57
Abbildung 16: Exemplarischer Screenshot Tabelle Analyse Suchmaschine Semantic Scholar 57
Abbildung 17: Exemplarischer Screenshot Tabellenblatt Gesamtliste unbereinigt 58
Abbildung 18: Exemplarischer Screenshot Tabellenblatt Gesamtliste bereinigt 58
Abbildung 19: Exemplarischer Screenshot Tabellenblatt Gesamtliste bereinigt ohne Duplikate 59
Abbildung 20: Schematische Darstellung der Literatursuche 60
Abbildung 21: Ausschnitt aus der Auswertungsmatrix der Literaturanalyse 63
Abbildung 22: Prozentuelle Verteilung der Publikationen nach Suchmaschinen 64
Abbildung 23: Prozentuelle Verteilung der Publikationen pro Jahr 65
Abbildung 24: Prozentuelle Verteilung der Publikationen nach Publisher bzw. Datenbank 65
Abbildung 25: Prozentuelle Verteilung der Publikationen die sich mit einem oder mehreren Green Cloud Charakteristika beschäftigen 66
Abbildung 26: Prozentuelle Verteilung der Publikationen nach Auswirkung auf die Bereiche laut KPI4CDE 66
Abbildung 27: Prozentuelle Verteilung der Publikationen die sich mit Lebensphase laut KPI4CDE beschäftigen 67

Abbildung 28: Prozentuelle Verteilung der Publikationen in der Nutzungsphase nach KPI4CDE 67
Abbildung 29: Prozentuelle Verteilung der Publikationen nach Bereichen der digitalen Infrastruktur nach SDIA 68
Abbildung 30: Prozentuelle Verteilung der Publikationen nach ISO Normen ISO/IEC 30134 und ISO/IEC 2237 69
Abbildung 31: Prozentuelle Verteilung der Publikationen entsprechend der Verantwortungsbereichen nach EU DC CoC 69
Abbildung 32: Prozentuelle Verteilung Publikationen nach Assementsbereiche nach EU DC CoC 70
Abbildung 33: Prozentuelle Verteilung der Publikationen nach Unterbereichen im Assementframework nach EU DC CoC 71
Abbildung 34: Screenshot 01.12.2023 von European Energy Efficiency Plattform [E3P], 2023 78
Abbildung 35: Eigene Darstellung basierend auf (Bharany et al., 2022, S. 23) 79
Abbildung 36: Eigene Darstellung Taxonomie der Energieeffizienz-Techniken auf Software-Ebene basierend auf Bharany et al., 2022, S. 39 80
Abbildung 37: Eigene Darstellung Taxonomie der Energieeffizienz-Techniken auf Hardwareebene basierend auf Bharany et al., 2022, S. 27 82
Abbildung 38: Eigene Darstellung Taxonomie VM Konsolidierungstechniken basierend auf Bharany et al., 2022, S. 48 83
Abbildung 39: Eigene Darstellung Taxonomie durch die Biologie inspirierte Algorithmen basierend auf Bharany et al., 2022, S. 58 84

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Eigene Zusammenfassung basierend auf (M. U. Bokhari et al., 2016) 13
Tabelle 2: Eigene Darstellung Vergleich zwischen Public, Private und Hybrider Cloud basierend auf (Karandeep Kaur, 2016) 16
Tabelle 3: Eigene Darstellung basierend auf (Joint Development Foundation Projects, LLC, Green Software Foundation Series, 2023) 25
Tabelle 4: Eigene Darstellung Green Cloud Computing Kennzahlen für unterschiedliche Umweltwirkungen basierend auf (Jens Gröger et al., 2021, S. 53) 27
Tabelle 5: Eigene Gegenüberstellung ISO 22237 und EN50600 Norm 30
Tabelle 6: Eigene Darstellung Größen KPI4DCE Bewertung der IT-Leistung basierend auf (Björn Schödwell et al., 2017, S. 113) 38
Tabelle 7: Eigene Darstellung Betriebsmodelle von Rechenzentren basierend auf (Acton et al., 2023, S. 3–4) 42
Tabelle 8: Eigene Darstellung Verantwortungsbereiche in Rechenzentren basierend auf (Acton et al., 2023, S. 4–5) 42
Tabelle 9: Eigene Darstellung der Optimierungsbereiche von Rechenzentren laut EU DC CoC basierend auf (Acton et al., 2023) 44
Tabelle 10: Eigene Darstellung Anwendungsbereich Literaturrecherche nach Brocke et al. (2009) 48
Tabelle 11: Eigene Darstellung Auswahl der Kategorien nach Brocke et al. (2009) 51
Tabelle 12: Handlundsempfehlungen für den Software Level der Energieeffizienz Techniken 81
Tabelle 13: Handlungsempfehlungen für den Hardwarelevel 82
Tabelle 14: Handlungsempfehlungen für VM Konsoldierungs Techniken 84
Tabelle 15: Handlungsempfehlungen Natur inspirierte Algorithmen 85

LITERATURVERZEICHNIS FÜR RECHERCHE

Abdul Majid Farooqi, Md. Tabrez Nafis & Kafiyah Usvub (2017). Comparative Analysis of Green Cloud Computing. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, *8*(2). https://doi.org/10.26483/ijarcs.v8i2.2929

Ahmad, A., Khan, S. U., Khan, H. U., Khan, G. M. & Ilyas, M. (2021). Challenges and Practices Identification via a Systematic Literature Review in the Adoption of Green Cloud Computing: Client's Side Approach. *IEEE Access*, *9*, 81828–81840. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3085707

Alarifi, A., Dubey, K., Amoon, M., Altameem, T., El-Samie, F. E. A., Altameem, A., Sharma, S. C. & Nasr, A. A. (2020). Energy-Efficient Hybrid Framework for Green Cloud Computing. *IEEE Access*, *8*, 115356–115369. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3002184

Alyouzbaki, Y. A. G. & Al-Rawi, M. F. (2021). Novel load balancing approach based on ant colony optimization technique in cloud computing. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, *10*(4), 2320–2326. https://doi.org/10.11591/eei.v10i4.2947

Ari, A. A. A., Damakoa, I., Titouna, C., Labraoui, N. & Gueroui, A. (2017, 3. November - 2017, 5. November). Efficient and Scalable ACO-Based Task Scheduling for Green Cloud Computing Environment. In *2017 IEEE International Conference on Smart Cloud (SmartCloud)* (S. 66–71). IEEE. https://doi.org/10.1109/SmartCloud.2017.17

Askarizade Haghighi, M., Maeen, M. & Haghparast, M. (2019). An Energy-Efficient Dynamic Resource Management Approach Based on Clustering and Meta-Heuristic Algorithms in Cloud Computing IaaS Platforms. *Wireless Personal Communications*, *104*(4), 1367–1391. https://doi.org/10.1007/s11277-018-6089-3

Bharany, S., Badotra, S., Sharma, S [Sandeep], Rani, S., Alazab, M., Jhaveri, R. H. & Reddy Gadekallu, T. (2022). Energy efficient fault tolerance techniques in green cloud computing: A systematic survey and taxonomy. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *53*, 102613. https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102613

Bharany, S., Sharma, S [Sandeep], Khalaf, O. I., Abdulsahib, G. M., Al Humaimeedy, A. S., Aldhyani, T. H. H., Maashi, M. & Alkahtani, H. (2022). A Systematic Survey on Energy-Efficient Techniques in Sustainable Cloud Computing. *Sustainability*, *14*(10), 6256. https://doi.org/10.3390/su14106256

Bindhu, V. & Joe, C. V. (2019). GREEN CLOUD COMPUTING SOLUTION FOR OPERATIONAL COST EFFICIENCY AND ENVIRONMENTAL IMPACT REDUCTION. *Journal of IoT in Social, Mobile, Analytics, and Cloud*, *1*(2), 120–128. https://www.irojournals.com/iroismac/article/view/1/2/5

Biswas, N. K., Banerjee, S., Biswas, U. & Ghosh, U. (2021). An approach towards development of new linear regression prediction model for reduced energy consumption and SLA violation in the domain of green cloud computing. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *45*, 101087. https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101087

Chingrace Guite, Kamaljeet Kaur Mangat (2018). A Study on Energy Efficient VM Allocation in Green Cloud Computing. *International Journal of Scientific Research in Computer Science and Engineering*, *6*(4), 37–40. https://www.isroset.org/journal/IJSRCSE/full_paper_view.php?paper_id=811

Cotes-Ruiz, I. T., Prado, R. P., García-Galán, S., Muñoz-Expósito, J. E. & Ruiz-Reyes, N. (2017). Dynamic Voltage Frequency Scaling Simulator for Real Workflows Energy-Aware Management in Green Cloud Computing. *PLOS ONE*, *12*(1), e0169803. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169803

Das, J., Ghosh, S., Mukherjee, A., Ghosh, S. K. & Buyya, R. (2022). RESCUE: Enabling green healthcare services using integrated IoT-edge-fog-cloud computing environments. *Software: Practice and Experience*, *52*(7), 1615–1642. https://doi.org/10.1002/spe.3078

Dhaini, M., Jaber, M., Fakhereldine, A., Hamdan, S. & Haraty, R. A. (2021). Green Computing Approaches - A Survey. *Informatica*, *45*(1). https://doi.org/10.31449/inf.v45i1.2998

Di Salvo, A. L., Agostinho, F., Almeida, C. M. & Giannetti, B. F. (2017). Can cloud computing be labeled as "green"? Insights under an environmental accounting perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *69*, 514–526. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.153

DIOUANI, S. & MEDROMI, H. (2018). Green Cloud Computing: Efficient Energy-Aware and Dynamic Resources Management in Data Centers. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, *9*(7). https://doi.org/10.14569/IJACSA.2018.090717

DIOUANI, S. & MEDROMI, H. (2019). How energy consumption in the cloud data center is calculated. In *2019 International Conference of Computer Science and Renewable Energies (ICCSRE)* (S. 1–10). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICCSRE.2019.8807458

Doss, R., Gupta, S., Chakravarthi, M. K., Channi, H. K., Koti, A. V. & Singh, P. (2022). Understand the Application of Efficient Green Cloud Computing Through Micro Smart Grid in Order to Power Internet Data Center. In *2022 2nd International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE)* (S. 336–340). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICACITE53722.2022.9823510

Fathi, M. H. & Khanli, L. M. (2018). Consolidating VMs in Green Cloud Computing Using Harmony Search Algorithm. In *Proceedings of the 2018 International Conference on Internet and e-Business* (S. 146–151). ACM. https://doi.org/10.1145/3230348.3230369

Franca, R. P., Iano, Y., Monteiro, A. C. B. & Arthur, R. (2021). Better transmission of information focused on green computing through data transmission channels in cloud environments with rayleigh fading. *Green computing in smart cities: Simulation and techniques*, 71–93.

Gayathri, B. (2022). Gray Wolf Optimisation Based Energy Efficient Green Cloud Computing. *Journal of Algebraic Statistics*, *13*(1), 932–940.

Geetha, P. & Robin, C. R. (2017). A comparative-study of load-cloud balancing algorithms in cloud environments. In ICECDS (Hrsg.), *International Conference on Energy, Communication, Data Analytics & Soft Computing (ICECDS) - 2017: 1st & 2nd August 2017 : Poonamallee, Chennai, Tamil Nadu, India* (S. 806–810). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICECDS.2017.8389549

Gholipour, N., Arianyan, E. & Buyya, R. (2020). A novel energy-aware resource management technique using joint VM and container consolidation approach for green computing in cloud data centers. *Simulation Modelling Practice and Theory*, *104*, 102127. https://doi.org/10.1016/j.simpat.2020.102127

Ghonoodi, A. (2019). Green Energy-aware task scheduling using the DVFS technique in Cloud Computing. *Journal of Advances in Computer Research*, *10*(1), 1–10. https://jacr.sari.iau.ir/article_665975.html

Gopi, R., Suganthi, S. T., Rajadevi, R., Johnpaul, P., Bacanin, N. & Kannimuthu, S. (2021). An Enhanced Green Cloud Based Queue Management (GCQM) System to Optimize Energy Consumption in Mobile Edge Computing. *Wireless Personal Communications*, *117*(4), 3397–3419. https://doi.org/10.1007/s11277-021-08084-0

Gopu, A. & Venkataraman, N. (2019). Optimal VM placement in distributed cloud environment using MOEA/D. *Soft Computing*, *23*(21), 11277–11296. https://doi.org/10.1007/s00500-018-03686-6

Hassan, H. A., Salem, S. A. & Saad, E. M. (2020). A smart energy and reliability aware scheduling algorithm for workflow execution in DVFS-enabled cloud environment. *Future Generation Computer Systems*, *112*, 431–448. https://doi.org/10.1016/j.future.2020.05.040

Hossain, M. K., Rahman, M., Hossain, A., Rahman, S. Y. & Islam, M. M. (2020). Active & Idle Virtual Machine Migration Algorithm- a new Ant Colony Optimization approach to consolidate Virtual Machines and ensure Green Cloud Computing. In *2020 Emerging Technology in Computing, Communication and Electronics (ETCCE)* (S. 1–6). IEEE. https://doi.org/10.1109/ETCCE51779.2020.9350915

Ismail, A. H., El-Bahnasawy, N. A. & Hamed, H. F. A. (2019). AGCM: Active Queue Management-Based Green Cloud Model for Mobile Edge Computing. *Wireless Personal Communications*, *105*(3), 765–785. https://doi.org/10.1007/s11277-019-06119-1

Ismail, L. & Materwala, H. (2018). Energy-Aware VM Placement and Task Scheduling in Cloud-IoT Computing: Classification and Performance Evaluation. *IEEE Internet of Things Journal*, *5*(6), 5166–5176. https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2865612

Jayalath, J. M. T. I., Chathumali, E. J. A. P. C., Kothalawala, K. R. & Kuruwitaarachchi, N. (2019). Green Cloud Computing: A Review on Adoption of Green-Computing attributes and Vendor Specific Implementations. In *2019 International Research Conference on Smart Computing and Systems Engineering (SCSE)* (S. 158–164). IEEE. https://doi.org/10.23919/SCSE.2019.8842817

Jeba, J. A., Roy, S., Rashid, M. O., Atik, S. T. & Whaiduzzaman, M. (2019). Towards Green Cloud Computing an Algorithmic Approach for Energy Minimization in Cloud Data Centers. *International Journal of Cloud Applications and Computing (IJCAC)*, *9*(1), 59–81. https://doi.org/10.4018/IJCAC.2019010105

Jin, S. & Yue, W. (2021). *Resource Management and Performance Analysis of Wireless Communication Networks*. Springer Singapore, Imprint: Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-7756-7

Jumde, M. & Dongre, S. (2021). Analysis on energy efficient green cloud computing. *Journal of Physics: Conference Series*, *1913*(1), 12100. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1913/1/012100

Kafiyah Usvub, Abdul Majid Farooqi & M. Afshar Alam (2017). Edge Up Green Computing In Cloud Data Centers. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, *8*(2). https://doi.org/10.26483/ijarcs.v8i2.2930

Katal, A., Dahiya, S. & Choudhury, T. (2022). Energy efficiency in cloud computing data center: a survey on hardware technologies. *Cluster Computing*, *25*(1), 675–705. https://doi.org/10.1007/s10586-021-03431-z

Katal, A., Dahiya, S. & Choudhury, T. (2023). Energy efficiency in cloud computing data centers: a survey on software technologies. *Cluster Computing*, *26*(3), 1845–1875. https://doi.org/10.1007/s10586-022-03713-0

Kinkar, K., Bhosale, P., Kasar, A. & Gutte, V. (2022). Carbon Footprint Analysis: Need for Green Cloud Computing. In *2022 International Conference on Electronics and Renewable Systems (ICEARS)* (S. 1–6). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICEARS53579.2022.9752341

Kurdi, H. A., Alismail, S. M. & Hassan, M. M. (2018). LACE: A Locust-Inspired Scheduling Algorithm to Reduce Energy Consumption in Cloud Datacenters. *IEEE Access*, *6*, 35435–35448. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2839028

Liao, Y., Zhang, G. & Chen, H. (2020). Cost-Efficient Outsourced Decryption of Attribute-Based Encryption Schemes for Both Users and Cloud Server in Green Cloud Computing. *IEEE Access*, *8*, 20862–20869. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2969223

Liu, J., Wang, S [Shangguang], Zhou, A., Xu, J. & Yang, F. (2020). SLA-driven container consolidation with usage prediction for green cloud computing. *Frontiers of Computer Science*, *14*(1), 42–52. https://doi.org/10.1007/s11704-018-7172-3

Liu, X., Liu, P., Li, H., Li, Z., Zou, C., Zhou, H., Yan, X. & Xia, R. (2018). Energy-aware task scheduling strategies with QoS constraint for green computing in cloud data centers. In C.-C. Hung (Hrsg.), *Proceedings of the 2018 Conference on Research in Adaptive and Convergent Systems* (S. 260–267). ACM. https://doi.org/10.1145/3264746.3264792

Lu, Y. & Sun, N. (2019). An effective task scheduling algorithm based on dynamic energy management and efficient resource utilization in green cloud computing environment. *Cluster Computing*, *22*(S1), 513–520. https://doi.org/10.1007/s10586-017-1272-y

M., K. & S. P., B. (2018). Energy Saving from Cloud Resources for a Sustainable Green Cloud Computing Environment. *Journal of Cyber Security and Mobility*, 95–108-95–108. https://doi.org/10.13052/2245-1439.718

Malekloo, M.-H., Kara, N. & El Barachi, M. (2018). An energy efficient and SLA compliant approach for resource allocation and consolidation in cloud computing environments. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, *17*, 9–24. https://doi.org/10.1016/j.suscom.2018.02.001

Mandal, R., Mondal, M. K., Banerjee, S. & Biswas, U. (2020). An approach toward design and development of an energy-aware VM selection policy with improved SLA violation in the domain of green cloud computing. *The Journal of Supercomputing*, *76*(9), 7374–7393. https://doi.org/10.1007/s11227-020-03165-6

Mandal, R., Mondal, M. K., Banerjee, S., Srivastava, G., Alnumay, W., Ghosh, U. & Biswas, U. (2023). MECpVmS: an SLA aware energy-efficient virtual machine selection policy for green cloud computing. *Cluster Computing*, *26*(1), 651–665. https://doi.org/10.1007/s10586-022-03684-2

Mansour, R. F., Alhumyani, H., Khalek, S. A., Saeed, R. A. & Gupta, D. (2023). Design of cultural emperor penguin optimizer for energy-efficient resource scheduling in green cloud computing environment. *Cluster Computing*, *26*(1), 575–586. https://doi.org/10.1007/s10586-022-03608-0

Masdari, M. & Zangakani, M. (2020). Green Cloud Computing Using Proactive Virtual Machine Placement: Challenges and Issues. *Journal of Grid Computing*, *18*(4), 727–759. https://doi.org/10.1007/s10723-019-09489-9

Masoudi, M., Khamidehi, B. & Cavdar, C. (2017). Green Cloud Computing for Multi Cell Networks. In *2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC): Proceedings : 19-22 March 2017, San Francisco, CA, USA* (S. 1–6). IEEE. https://doi.org/10.1109/WCNC.2017.7925672

Mehta, J. A., Nanavati, P. K. & Mehta, V. K. (2021). A survey on green cloud computing. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, *6*(1), 2455-2143.

Mishra, S. K., Puthal, D., Sahoo, B., Jena, S. K. & Obaidat, M. S. (2018). An adaptive task allocation technique for green cloud computing. *The Journal of Supercomputing*, *74*(1), 370–385. https://doi.org/10.1007/s11227-017-2133-4

Mohammadzadeh, A., Masdari, M., Gharehchopogh, F. S. & Jafarian, A. (2021). A hybrid multi-objective metaheuristic optimization algorithm for scientific workflow scheduling. *Cluster Computing*, *24*(2), 1479–1503. https://doi.org/10.1007/s10586-020-03205-z

Mohammadzadeh, A., Masdari, M., Gharehchopogh, F. S. & Jafarian, A. (2021). Improved chaotic binary grey wolf optimization algorithm for workflow scheduling in green cloud computing. *Evolutionary Intelligence*, *14*(4), 1997–2025. https://doi.org/10.1007/s12065-020-00479-5

More, N. S. & Ingle, R. B. (2017, 3. Februar - 2017, 5. Februar). Challenges in green computing for energy saving techniques. In *2017 International Conference on Emerging Trends & Innovation in ICT (ICEI)* (S. 73–76). IEEE. https://doi.org/10.1109/ETIICT.2017.7977013

Mustafa, S., Sattar, K., Shuja, J., Sarwar, S., Maqsood, T., Madani, S. A. & Guizani, S. (2019). SLA-Aware Best Fit Decreasing Techniques for Workload Consolidation in Clouds. *IEEE Access*, *7*, 135256–135267. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2941145

Nookhong, J. & Nilsook, P. (2017). System Architecture for Green University Resource Planning on Cloud Computing. *International Journal of the Computer, the Internet and Management*, *25*, 68–75.

Pang, S., Xu, K., Wang, S [Shudong], Wang, M. & Wang, S [Shuyu] (2020). Energy-Saving Virtual Machine Placement Method for User Experience in Cloud Environment. *Mathematical Problems in Engineering*, *2020*, 1–9. https://doi.org/10.1155/2020/4784191

Park, J [Jiyong], Han, K. & Lee, B. (2023). Green Cloud? An Empirical Analysis of Cloud Computing and Energy Efficiency. *Management Science*, *69*(3), 1639–1664. https://doi.org/10.1287/mnsc.2022.4442

Patel, Y. S., Jaiswal, R. & Misra, R. (2022). Deep learning-based multivariate resource utilization prediction for hotspots and coldspots mitigation in green cloud data centers. *The Journal of Supercomputing*, *78*(4), 5806–5855. https://doi.org/10.1007/s11227-021-04107-6

Patil, A. & Patil, R. (2019). An Analysis Report on Green Cloud Computing Current Trends and Future Research Challenges. *SSRN Electronic Journal.* Vorab-Onlinepublikation. https://doi.org/10.2139/ssrn.3355151

Qiu, C., Shen, H. & Chen, L. (2019). Towards Green Cloud Computing: Demand Allocation and Pricing Policies for Cloud Service Brokerage. *IEEE Transactions on Big Data*, *5*(2), 238–251. https://doi.org/10.1109/TBDATA.2018.2823330

Qureshi, B. & Koubaa, A. (2019). On Energy Efficiency and Performance Evaluation of Single Board Computer Based Clusters: A Hadoop Case Study. *Electronics*, *8*(2), 182. https://doi.org/10.3390/electronics8020182

Radu, L.-D. (2017). Green Cloud Computing: A Literature Survey. *Symmetry*, *9*(12), 295. https://doi.org/10.3390/sym9120295

Rawat, S., Kumar, P., Sagar, S., Singh, I. & Garg, K. (2017). An analytical evaluation of challenges in Green cloud computing. In *ICTUS : 2017 International Conference on Infocom Technologies and Unmanned Systems (trends and future directions): December 18-20, 2017, Amity University Dubai, Dubai International Academic City* (S. 351–355). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICTUS.2017.8286031

Raza, M. S., Wei, J. & Ali Muslam, M. M. (2021). A Succinct Review Of Intelligent Computational Techniques In Green Cloud Computing. In *2020 International Conference on Communications, Signal Processing, and their Applications (ICCSPA)* (S. 1–4). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICCSPA49915.2021.9385717

S, D. & Cholli, N. G. (2021). Green Cloud Computing: Redefining the future of Cloud Computing. *International Research Journal on Advanced Science Hub*, *3*(Special Issue 7S), 12–19. https://doi.org/10.47392/irjash.2021.203

S. Supreeth, K. P. (2022). VM Scheduling for Efficient Dynamically Migrated Virtual Machines (VMS-EDMVM) in Cloud Computing Environment. *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, *16*(6). https://doi.org/10.3837/tiis.2022.06.007

Safari, M. & Khorsand, R. (2018). Energy-aware scheduling algorithm for time-constrained workflow tasks in DVFS-enabled cloud environment. *Simulation Modelling Practice and Theory*, *87*, 311–326. https://doi.org/10.1016/j.simpat.2018.07.006

Saxena, S., Zubair Khan, M. & Singh, R [Ravendra] (2021). Green Computing: An Era of Energy Saving Computing of Cloud Resources. *International Journal of Mathematical Sciences and Computing*, *7*(2), 42–48. https://doi.org/10.5815/ijmsc.2021.02.05

Shakeel, F. & Sharma, S [Seema] (2017). Green cloud computing: A review on efficiency of data centres and virtualization of servers. In P. Nand Astya, A. Swaroop, V. Sharma, M. Singh, K. Gupta & C. a. A. IEEE International Conference on Computing (Hrsg.), *IEEE International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA-2017): On 5th-6th May, 2017 : proceeding* (S. 1264–1267). IEEE. https://doi.org/10.1109/CCAA.2017.8230012

Shaw, R., Howley, E. & Barrett, E. (2018). A Predictive Anti-Correlated Virtual Machine Placement Algorithm for Green Cloud Computing. In A. Sill & J. Spillner (Hrsg.), *11th IEEE/ACM International Conference on Utility and Cloud Computing: UCC 2018 : proceedings : 17-20 December 2018, Zurich, Switzerland* (S. 267–276). Conference Publishing Services, IEEE Computer Society. https://doi.org/10.1109/UCC.2018.00035

Shojaei, K., Safi-Esfahani, F. & Ayat, S. (2018). VMDFS: virtual machine dynamic frequency scaling framework in cloud computing. *The Journal of Supercomputing*, *74*(11), 5944–5979. https://doi.org/10.1007/s11227-018-2508-1

Shojafar, M., Canali, C., Lancellotti, R. & Abawajy, J. (2020). Adaptive Computing-Plus-Communication Optimization Framework for Multimedia Processing in Cloud Systems. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, *8*(4), 1162–1175. https://doi.org/10.1109/TCC.2016.2617367

Shree, T., Kumar, R. & Kumar, N. (2020). Green Computing in Cloud Computing. In *2020 2nd International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICACCCN)* (S. 903–905). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICACCCN51052.2020.9362822

Shu, W., Cai, K. & Xiong, N. N. (2021). Research on strong agile response task scheduling optimization enhancement with optimal resource usage in green cloud computing. *Future Generation Computer Systems*, *124*, 12–20. https://doi.org/10.1016/j.future.2021.05.012

Siddiqa, A., Qureshi, F. F., Shah, M. A., Iqbal, R., Wahid, A. & Chang, V. (2019). CCN: A novel energy efficient greedy routing protocol for green computing. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, *31*(23), Artikel e4461. https://doi.org/10.1002/cpe.4461

Singh, S., Sharma, P., Moon, S. & Park, J [Jong] (2017). EH-GC: An Efficient and Secure Architecture of Energy Harvesting Green Cloud Infrastructure. *Sustainability*, *9*(4), 673. https://doi.org/10.3390/su9040673

Singh Khichar, G., Gupta, G., Singh, R [Ravinder] & Rathi, R. (2018). Maximum Correlationwith Migration Control Based on Modified Knapsack(MC_MC) Approach for VM Selection for Green Cloud Computing. In R. Nagpal & D. S. a. E. International Conference on Cloud Computing (Hrsg.), *Proceedings of the 8th International Conference Confluence 2018 on Cloud Computing, Data Science and Engineering: 11th-12th January 2018, Amity College, Noida, Uttar Pradesh, India* (S. 1–6). IEEE. https://doi.org/10.1109/CONFLUENCE.2018.8442441

Skourletopoulos, G., Mavromoustakis, C. X., Mastorakis, G., Batalla, J. M., Song, H., Sahalos, J. N. & Pallis, E. (2019). Elasticity Debt Analytics Exploitation for Green Mobile Cloud Computing: An Equilibrium Model. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, *3*(1), 122–131. https://doi.org/10.1109/TGCN.2018.2890034

Sohaib Ajmal, M., Iqbal, Z., Zeeshan Khan, F., Bilal, M. & Majid Mehmood, R. (2021). Cost-based Energy Efficient Scheduling Technique for Dynamic Voltage and Frequency Scaling System in cloud computing. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *45*, 101210. https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101210

Sriram, G. S. (2022). Green cloud computing: an approach towards sustainability. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, *4*(1), 1263–1268.

Stavrinides, G. L. & Karatza, H. D. (2018). Energy-Aware Scheduling of Real-Time Workflow Applications in Clouds Utilizing DVFS and Approximate Computations. In M. Younas & J. P. Disso (Hrsg.), *FiCloud 2018: 2018 IEEE 6th International Conference on Future Internet of Things and Cloud : proceedings : 6-8 August 2018, Barcelona, Spain* (S. 33–40). Conference Publishing Services, IEEE Computer Society. https://doi.org/10.1109/FiCloud.2018.00013

Stavrinides, G. L. & Karatza, H. D. (2019). An energy-efficient, QoS-aware and cost-effective scheduling approach for real-time workflow applications in cloud computing systems utilizing DVFS and approximate computations. *Future Generation Computer Systems*, *96*, 216–226. https://doi.org/10.1016/j.future.2019.02.019

Surendran, R. & Tamilvizhi, T. (2018). How to Improve the Resource Utilization in Cloud Data Center? In *2018 International Conference on Innovation and Intelligence for Informatics, Computing, and Technologies (3ICT)* (S. 1–6). IEEE. https://doi.org/10.1109/3ICT.2018.8855740

Szymanski, T. H. (2017). Security and Privacy for a Green Internet of Things. *IT Professional*, *19*(5), 34–41. https://doi.org/10.1109/MITP.2017.3680952

Taufiq-Hail, G. A., Ibrahim, H. & Yusof, S. A. M. (2017). Attitude's mediating effect on intention to use SaaS cloud computing services as a means of Green IT: Malaysian university setting. *Journal of Information System and Technology Management*, *2*(4), 35–51.

Taufiq-Hail, G. A., Ibrahim, H. & Yusof, S. A. M. (2017). SaaS cloud computing as a means of Green IT acceptance model: A theory of planned behavior model at Malaysian public universities' context. *Journal of Information System and Technology Management*, *2*(4), 1–17.

Thayananthan, V., Abdulkader, O., Jambi, K. & Bamahdi, A. M. (2017). Analysis of Cybersecurity Based on Li-Fi in Green Data Storage Environments. In *2017 IEEE 4th International Conference on Cyber Security and Cloud Computing (CSCloud 2017): New York, New York, USA, 26-28 June 2017* (S. 327–332). IEEE. https://doi.org/10.1109/CSCloud.2017.32

Usha Kirana, S. P. & D'Mello, D. A. (2021). Energy-efficient enhanced Particle Swarm Optimization for virtual machine consolidation in cloud environment. *International Journal of Information Technology*, *13*(6), 2153–2161. https://doi.org/10.1007/s41870-021-00745-4

Usman, M. J., Ismail, A. S., Chizari, H., Abdul-Salaam, G., Usman, A. M., Gital, A. Y., Kaiwartya, O. & Aliyu, A. (2019). Energy-efficient Virtual Machine Allocation Technique Using Flower Pollination Algorithm in Cloud Datacenter: A Panacea to Green Computing. *Journal of Bionic Engineering*, *16*(2), 354–366. https://doi.org/10.1007/s42235-019-0030-7

V. Sajitha, A. & C. Subhajini, A. (2018). Dynamic VM Consolidation Enhancement for Designing and Evaluation of Energy Efficiency in Green Data Centers Using Regression Analysis. *International Journal of Engineering & Technology*, *7*(3.6), 179. https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.6.14966

Wadhwa, M., Goel, A., Choudhury, T. & Mishra, V. P. (2019). Green Cloud Computing - A Greener Approach To IT. In *2019 International Conference on Computational Intelligence and Knowledge Economy (ICCIKE)* (S. 760–764). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICCIKE47802.2019.9004283

Wang, H. & Tianfield, H. (2018). Energy-Aware Dynamic Virtual Machine Consolidation for Cloud Datacenters. *IEEE Access*, *6*, 15259–15273. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2813541

Xu, X., Zhang, Q., Maneas, S., Sotiriadis, S., Gavan, C. & Bessis, N. (2019). VMSAGE: A virtual machine scheduling algorithm based on the gravitational effect for green Cloud computing. *Simulation Modelling Practice and Theory*, *93*, 87–103. https://doi.org/10.1016/j.simpat.2018.10.006

Xu, Y. & Abnoosian, K. (2022). A new metaheuristic-based method for solving the virtual machines migration problem in the green cloud computing. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, *34*(3), Artikel e6579. https://doi.org/10.1002/cpe.6579

Yadav, R. & Zhang, W. (2017). MeReg : Managing Energy-SLA Tradeoff for Green Mobile Cloud Computing. *Wireless Communications and Mobile Computing*, *2017*, 1–11. https://doi.org/10.1155/2017/6741972

Yang, M.-J. (2021). Energy-efficient cloud data center with fair service level agreement for green computing. *Cluster Computing*, *24*(4), 3337–3349. https://doi.org/10.1007/s10586-021-03342-z

Yeganeh, H., Salahi, A. & Pourmina, M. A. (2019). A Novel Cost Optimization Method for Mobile Cloud Computing by Capacity Planning of Green Data Center With Dynamic Pricing. *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, *42*(1), 41–51. https://doi.org/10.1109/CJECE.2019.2890833

Zheng, X., Rong, C. & Badarch, T. (2019). Foreword to the special issue of green cloud computing: Methodology and practice. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, *31*(23), Artikel e5425. https://doi.org/10.1002/cpe.5425

Zhou, Q., Xu, M., Singh Gill, S., Gao, C., Tian, W., Xu, C. & Buyya, R. (2020). Energy Efficient Algorithms based on VM Consolidation for Cloud Computing: Comparisons and Evaluations. In *2020 20th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Internet Computing (CCGRID)* (S. 489–498). IEEE. https://doi.org/10.1109/CCGrid49817.2020.00-44

Zong, Z. (2020). An Improvement of Task Scheduling Algorithms for Green Cloud Computing. In *2020 15th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE)* (S. 654–657). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICCSE49874.2020.9201785

Literaturverzeichnis

Aarthee (2017). Energy Efficiency of Datacenters and Lower Carbon Emissions in Green Cloud Computing for Environment Sustainability. https://www.semanticscholar.org/paper/Energy-Efficiency-of-Datacenters-and-Lower-Carbon-Aarthee/195cafbfcf92faf7aec2f1baa7f48b0f2c63b693

Acton, M., Bertoldi, P. & Booth, J. (2020). *2020 Best Practice Guidelines for the EU Code of Conduct on Data Centre Energy Efficiency* (JRC Technical Report Nr. 11.1.0). Ispra, Italien. European Commission. https://e3p.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/documents/publications/jrc119571_jrc119571_2020_best_practice_guidelines_v11.1.0a_br_ma_21_jan.pdf

Acton, M., Bertoldi, P. & Booth, J. (2021). *2021 Best Practice Guidelines for the EU Code of Conduct on Data Centre Energy Efficiency* (JRC Technical Report Nr. 12.1.0). Ispra, Italien. European Commission. https://e3p.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/documents/publications/jrc123653_jrc119571_2021_best_practice_guidelines_final_v1_1.pdf

Acton, M., Bertoldi, P. & Booth, J. (2022). *2022 Best Practice Guidelines for the EU Code of Conduct on Data Centre Energy Efficiency* (JRC Technical Report Nr. 13.1.1). Ispra, Italien. European Commission. https://e3p.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/documents/publications/jrc128184_jrc128184_jrc128184_2022_best_practice_guidelines-1.pdf

Acton, M., Bertoldi, P. & Booth, J. (2023). *2023 Best Practice Guidelines for the EU Code of Conduct on Data Centre Energy Efficiency* (JRC Technical Report Nr. 14.1.0). Ispra, Italien. European Commission. https://e3p.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/documents/publications/jrc132576_jrc132576_jrc_2023_best_practice_guidelines_v14.1.0final_gt1.pdf

Aggarwal, S. & Laurie McCabe. (2009). *The Compelling TCO Case for Cloud-based business applications in SMB and Mid-Market Enterprises: A 4-year total cost of ownership (TCO) perspective comparing cloud and on-premise business application deploymen*. https://www.netsuite.com/portal/pdf/wp-hurwitztco-study-dynamics.pdf

Alyouzbaki, Y. A. G. & Al-Rawi, M. F. (2021). Novel load balancing approach based on ant colony optimization technique in cloud computing. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, *10*(4), 2320–2326. https://doi.org/10.11591/eei.v10i4.2947

Amazon. *Building a Better Future together: 2022 Amazon Sustainability Report.* Amazon.com, Inc. https://sustainability.aboutamazon.com/2022-sustainability-report.pdf

Amazon - Sustainability. (2023a, 16. Oktober). *The Cloud*. Zugriff am 12. Dezember 2023, verfügbar unter https://sustainability.aboutamazon.com/products-services/the-cloud?energyType=true

Amazon - Sustainability. (2023b, 16. Oktober). *Renewable Energy.* Amazon.com, Inc. Zugriff am 12. Dezember 2023, verfügbar unter https://sustainability.aboutamazon.com/climate-solutions/renewable-energy?energyType=true

Amazon - Sustainability. (2023c, 16. Oktober). *Water Stewardship.* Amazon.com, Inc. Zugriff am 12. Dezember 2023, verfügbar unter https://sustainability.aboutamazon.com/natural-resources/water

Andrea, B., Samantha Robertson, Sally Erickson & Christopher Read. (2023, 17. Oktober). *Übersicht über den Microsoft Sustainability Manager - Microsoft Cloud for Sustainability.* Microsoft Corporation. Zugriff am 12. Dezember 2023, verfügbar unter https://learn.microsoft.com/de-de/industry/sustainability/sustainability-manager-overview

Armbrust, M., Fox, A., Griffith, R., Joseph, A. D., Katz, R., Konwinski, A., Lee, G., Patterson, D., Rabkin, A., Stoica, I. & Zaharia, M. (2010). A view of cloud computing. *Communications of the ACM*, *53*(4), 50–58. https://doi.org/10.1145/1721654.1721672

Atos. (2023). *Atos awarded by the European Union for the energy efficiency of its data centers in the UK and Germany*. Zugriff am 12. Dezember 2023, verfügbar unter https://atos.net/en/2023/awards_2023_09_06/atos-awarded-by-the-european-union-for-the-energy-efficiency-of-its-data-centers-in-the-uk-and-germany

Beach, B. (2014). Virtual Private Cloud. In B. Beach (Hrsg.), *SpringerLink Bücher. Pro Powershell for Amazon Web Services: DevOps for the AWS Cloud* (S. 67–88). Apress. https://doi.org/10.1007/978-1-4302-6452-1_5

Beloglazov, A. & Buyya, R. (2010). Adaptive threshold-based approach for energy-efficient consolidation of virtual machines in cloud data centers. In B. Schulze & R. Buyya (Hrsg.), *Proceedings of the 8th International Workshop on Middleware for Grids, Clouds and e-Science (MGC'10) : held at the ACM/IFIP/USENIX 11th International Middleware Conference : November 29-December 3, 2010, Bangalore, India* (S. 1–6). ACM. https://doi.org/10.1145/1890799.1890803

Beloglazov, A. & Buyya, R. (2012). Optimal online deterministic algorithms and adaptive heuristics for energy and performance efficient dynamic consolidation of virtual machines in Cloud data centers. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, *24*(13), 1397–1420. https://doi.org/10.1002/cpe.1867

Bharany, S., Sharma, S., Khalaf, O. I., Abdulsahib, G. M., Al Humaimeedy, A. S., Aldhyani, T. H. H., Maashi, M. & Alkahtani, H. (2022). A Systematic Survey on Energy-

Efficient Techniques in Sustainable Cloud Computing. *Sustainability*, *14*(10), 1–89. https://doi.org/10.3390/su14106256

Björn Schödwell, Prof. Dr. Rüdiger Zarnekow, Ran Liu, Jens Gröger & Marc Wilkens. (Oktober 2017). *Kennzahlen und Indikatoren für die Beurteilung der Ressourceneffizienz von Rechenzentren und Prüfung der praktischen Anwendbarkeit* (Texte 19/2018). Dessau-Roßlau. Business Engineering Institute St. Gallen; Öko-Institut e.V., Berlin; proRZ Rechenzentrumsbau GmbH.

Blauer Engel. (2023, 16. Oktober). *Rechenzentren | Blauer Engel.* RAL gGmbH und Umweltbundesamt. Zugriff am 12. Dezember 2023, verfügbar unter https://www.blauer-engel.de/de/produktwelt/rechenzentren

Blauer Engel - Das Umweltzeichen (Erstausgabe 01/2023). *Rechenzentren: DE-UZ 228* (Vergabekriterien Ausgabe 1). RAL gGmbH. https://produktinfo.blauer-engel.de/uploads/criteriafile/de/DE-UZ%20228-202301-de-Kriterien-V1.pdf

BloombergNEF. (2022). *Corporate Clean Energy Buying Tops 30GW Mark in Record Year | BloombergNEF*. Zugriff am 12. Dezember 2023, verfügbar unter https://about.bnef.com/blog/corporate-clean-energy-buying-tops-30gw-mark-in-record-year/

Brocke, J., Simons, A., Niehaves, B [Bjoern], Niehaves, B [Bjorn], Reimer, K., Plattfaut, R. & Cleven, A. (2009). RECONSTRUCTING THE GIANT: ON THE IMPORTANCE OF RIGOUR IN DOCUMENTING THE LITERATURE SEARCH PROCESS. *ECIS 2009 Proceedings*. https://aisel.aisnet.org/ecis2009/161

CEDaCI (Hrsg.). (2023, 16. Oktober). *CEDaCI | Home.* London South BankUniversity, Wuppertal Institut für Klima Umwelt Energie, Green IT Amsterdam,TEAM2, WeLOOP, Terra Nova Development. https://www.cedaci.org/

Chingrace Guite, Kamaljeet Kaur Mangat (2018). A Study on Energy Efficient VM Allocation in Green Cloud Computing. *International Journal of Scientific Research in Computer Science and Engineering*, *6*(4), 37–40. https://www.isroset.org/journal/IJSRCSE/full_paper_view.php?paper_id=811

Daniel Bizo. *The Carbon Reduction The Carbon Reduction Opportunity of Moving to Amazon Web Services.* 451 Research. https://sustainability.aboutamazon.com/carbon-reduction-aws.pdf

DIN EN ISO 14044:2021-02, Umweltmanagement_- Ökobilanz_- Anforderungen und Anleitungen (ISO_14044:2006_+ Amd_1:2017_+ Amd_2:2020); Deutsche Fassung EN_ISO_14044:2006_+ A1:2018_+ A2:2020. Berlin. Beuth Verlag GmbH.

DODD, N., ALFIERI, F., DE, OLIVEIRA GAMA CALDAS Miguel Nuno, MAYA-DRYSDALE, L., VIEGAND, J., FLUCKER, S., TOZER, R., WHITEHEAD, B., WU, A. & BROCKLEHURST, F. (2020). Development of the EU Green Public Procurement (GPP)

Criteria for Data Centres, Server Rooms and Cloud Services. *1831-9424.* Vorab-Onlinepublikation. https://doi.org/10.2760/964841

Regulation on ecodesign requirements for servers and data storage products EU 2019/424., EUR-Lex (2019 & i.d.F.v. 01.Mai 2021). https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/424/2021-05-01

European Commission. (2022). *Corporate sustainability due diligence.* Directorate-General for Justice and Consumers. Zugriff am 30. November 2023, verfügbar unter https://commission.europa.eu/business-economy-euro/doing-business-eu/corporate-sustainability-due-diligence_en

European Energy Efficiency Plattform. (2023, 1. Dezember). *CoC DC Partners | E3P.* European Union. Zugriff am 12. Dezember 2023, verfügbar unter https://e3p.jrc.ec.europa.eu/node/575

Directive (EU) 2022/2464 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2022 amending Regulation (EU) No 537/2014, Directive 2004/109/EC, Directive 2006/43/EC and Directive 2013/34/EU, as regards corporate sustainability reporting (Text with EEA relevance), EUR-Lex (2022). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32022L2464

European Union (Hrsg.). *Horizon Europe.* Directorate-General for Communications Networks, Content and Technology. https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe_en

European Union (Hrsg.). *The Recovery and Resilience Facility.* Directorate-General for Communications Networks, Content and Technology. https://commission.europa.eu/business-economy-euro/economic-recovery/recovery-and-resilience-facility_en

European Union (Hrsg.). *Strategic Technologies for Europe Plattform - Target investment areas.* Directorate-General for Communications Networks, Content and Technology. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/eu-budget/strategic-technologies-europe-platform/target-investment-areas_en

European Union (Hrsg.). (2023a, 23. August). *The Digital Europe Programme.* Directorate-General for Communications Networks, Content and Technology. https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/activities/digital-programme

European Union (Hrsg.). (2023b, 17. Oktober). *Connecting Europe Facility - CEF Digital.* Directorate-General for Communications Networks, Content and Technology. https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/activities/cef-digital

F. Farahnakian, T. Pahikkala, P. Liljeberg, J. Plosila & H. Tenhunen (2015). Utilization Prediction Aware VM Consolidation Approach for Green Cloud Computing. *2015 IEEE 8th International Conference on Cloud Computing*.

https://www.semanticscholar.org/paper/Utilization-Prediction-Aware-VM-Consolidation-for-Farahnakian-Pahikkala/8ec9980161177676f92efd21ce42d61bf513c416

Farahnakian, F., Ashraf, A., Pahikkala, T., Liljeberg, P., Plosila, J., Porres, I. & Tenhunen, H. (2015). Using Ant Colony System to Consolidate VMs for Green Cloud Computing. *IEEE Transactions on Services Computing*, *8*(2), 187–198. https://doi.org/10.1109/TSC.2014.2382555

Fettke, P. (2006). State-of-the-Art des State-of-the-Art. *WIRTSCHAFTSINFORMATIK*, *48*(4), 257–266. https://doi.org/10.1007/s11576-006-0057-3

G. K. Sriram (2022). GREEN CLOUD COMPUTING: AN APPROACH TOWARDS SUSTAINABILITY. https://www.semanticscholar.org/paper/GREEN-CLOUD-COMPUTING%3A-AN-APPROACH-TOWARDS-Sriram/1271c37a9e81e06cc8f6809123d2d951dc300710

Gartner. *Public cloud services end-user spending worldwide from 2017 to 2023 (in billion U.S.dollars).* Statista. Zugriff am 12. Dezember 2023, verfügbar unter https://www.statista.com/statistics/273818/global-revenue-generated-with-cloud-computing-since-2009/

Geetha, P. & Robin, C. R. R. (2023). Retraction Note to: Power conserving resource allocation scheme with improved QoS to promote green cloud computing. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, *14*(S1), 57. https://doi.org/10.1007/s12652-022-03941-7

Gholipour, N., Arianyan, E. & Buyya, R. (2020). A novel energy-aware resource management technique using joint VM and container consolidation approach for green computing in cloud data centers. *Simulation Modelling Practice and Theory*, *104*, 102127. https://doi.org/10.1016/j.simpat.2020.102127

A. Giessmann & K. Stanoevska-Slabeva (2012). Business Models of Platform as a Service (PaaS) Providers: Current State and Future Directions. *The Journal of Information Technology Theory and Application*. https://www.semanticscholar.org/paper/Business-Models-of-Platform-as-a-Service-(PaaS)-and-Giessmann-Stanoevska-Slabeva/66a12e6e12e542a65be806e29863c1827c116ec6

GitHub. (2023, 25. Oktober). *GitHub - Green-Software-Foundation/awesome-green-software*. Zugriff am 12. Dezember 2023, verfügbar unter https://github.com/Green-Software-Foundation/awesome-green-software

Giustini, D. & Boulos, M. N. K. (2013). Google Scholar is not enough to be used alone for systematic reviews. *Online Journal of Public Health Informatics*, *5*(2), 214. https://doi.org/10.5210/ojphi.v5i2.4623

Google Cloud Blog. (2023, 17. Oktober). *How partners benefit from Google Cloud Ready Sustainability | Google Cloud Blog*. Zugriff am 12. Dezember 2023, verfügbar unter

https://cloud.google.com/blog/topics/sustainability/how-partners-benefit-from-google-cloud-ready-sustainability?hl=en

Google Sustainability. (2023, 16. Oktober). *Google Environmental Report 2019 - Google Sustainability*. Zugriff am 16. Oktober 2023, verfügbar unter https://sustainability.google/reports/environmental-report-2019/#data-centers

Green Software Foundation Series, Joint Development Foundation Projects & LLC (Hrsg.). (2023a, 17. Mai). *Getting Started | SCI Guidance*. https://sci-guide.greensoftware.foundation/

Green Software Foundation Series, Joint Development Foundation Projects & LLC (Hrsg.). (2023b, 24. Oktober). *Green Software Foundation*. https://greensoftware.foundation/

Greenpixie. (2023, 25. Oktober). *Greenpixie | Comply, reduce and save with cloud emissions data*. Zugriff am 12. Dezember 2023, verfügbar unter https://greenpixie.com/

Greyson, D., Rafferty, E., Slater, L., MacDonald, N., Bettinger, J. A., Dubé, È. & MacDonald, S. E. (2019). Systematic review searches must be systematic, comprehensive, and transparent: a critique of Perman et al. *BMC Public Health*, *19*(1), 153. https://doi.org/10.1186/s12889-018-6275-y

H. F. Atlam, A. Alenezi, A. Alharthi, R. J. Walters & G. B. Wills (2017). Integration of Cloud Computing with Internet of Things: Challenges and Open Issues. In *2017 IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData)*.

Haranas, M. (9. August 2023). Cloud Market Share Q2 2023: AWS, Microsoft, Google Battle | CRN. https://www.crn.com/news/cloud/cloud-market-share-q2-2023-aws-microsoft-google-battle/1#

Home | cloudsecurityalliance. (2023, 7. Juli). https://cloudsecurityalliance.org/

Hoogendoorn, I. (2021). Public Cloud Integration. In I. Hoogendoorn (Hrsg.), *Springer eBook Collection. Multi-Site Network and Security Services with NSX-T: Implement Network Security, Stateful Services, and Operations* (S. 303–316). Apress. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-7083-7_10

Hossain, S. (2013). Infrastructure as a Service. In A. M. Bento & A. K. Aggarwal (Hrsg.), *Premier reference source. Cloud computing service and deployment models: Layers and management* (S. 26–49). Business Science Reference. https://doi.org/10.4018/978-1-4666-2187-9.ch002

International Organization for Standardization (Juli.2006a). *ISO 14040:2006: Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*. https://www.iso.org/standard/37456.html

International Organization for Standardization (Juli.2006b). *ISO 14044:2006: Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines*. https://www.iso.org/standard/38498.html

International Organization for Standardization (Mai.2015). *ISO/IEC TS 22237-2:2018: Information technology — Data centre facilities and infrastructures — Part 2: Building construction*. https://www.iso.org/standard/73009.html

International Organization for Standardization (März.2016a). *ISO/IEC 30134-1:2016: Information technology — Data centre facilities and infrastructures — Part 7: Management and operational information*. https://www.iso.org/standard/63450.html

International Organization for Standardization (März.2016b). *ISO/IEC 30134-2:2016: Information technology — Data centres — Key performance indicators — Part 2: Power usage effectiveness (PUE)*. https://www.iso.org/standard/63451.html

International Organization for Standardization (April.2016). *ISO/IEC 30134-3:2016: Information technology — Data centres — Key performance indicators — Part 3: Renewable energy factor (REF)*. https://www.iso.org/standard/66127.html

International Organization for Standardization (Oktober.2017). *ISO/IEC 30134-4:2017: Information technology — Data centres — Key performance indicators — Part 4: IT Equipment Energy Efficiency for servers (ITEEsv)*. https://www.iso.org/standard/66191.html

International Organization for Standardization (November.2017a). *ISO/IEC 30134-5:2017: Information technology — Data centres — Key performance indicators — Part 5: IT Equipment Utilization for servers (ITEUsv)*. https://www.iso.org/standard/66934.html

International Organization for Standardization (December.2017b). *ISO 14044:2006/Amd 1:2017: Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines*. https://www.iso.org/standard/72357.html

International Organization for Standardization (Mai.2018a). *ISO/IEC TS 22237-5:2018: Information technology — Data centre facilities and infrastructures — Part 5: Telecommunications cabling infrastructure*. https://www.iso.org/standard/73012.html

International Organization for Standardization (Mai.2018b). *ISO/IEC TS 22237-6:2018: Information technology — Data centre facilities and infrastructures — Part 6: Security systems*. https://www.iso.org/standard/73013.html

International Organization for Standardization (Mai.2018c). *ISO/IEC TS 22237-7:2018: Information technology — Data centre facilities and infrastructures — Part 7: Management and operational information*. https://www.iso.org/standard/73014.html

International Organization for Standardization (September.2020a). *ISO 14040:2006/Amd 1:2020: Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*. https://www.iso.org/standard/76121.html

International Organization for Standardization (September.2020b). *ISO 14044:2006/Amd 2:2020: Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines*. https://www.iso.org/standard/76122.html

International Organization for Standardization (Oktober.2021a). *ISO/IEC 22237-1:2021: Information technology — Data centre facilities and infrastructures — Part 1: General concepts*. https://www.iso.org/standard/78550.html

International Organization for Standardization (Oktober.2021b). *ISO/IEC 22237-3:2021: Information technology — Data centre facilities and infrastructures — Part 3: Power distribution*. https://www.iso.org/standard/78551.html

International Organization for Standardization (Oktober.2021c). *ISO/IEC 22237-4:2021: Information technology — Data centre facilities and infrastructures — Part 4: Environmental control*. https://www.iso.org/standard/78552.html

International Organization for Standardization (August.2021). *ISO/IEC 30134-6:2021: Information technology — Data centres key performance indicators — Part 6: Energy Reuse Factor (ERF)*. https://www.iso.org/standard/71717.html

International Organization for Standardization (März.2022a). *ISO/IEC 30134-8:2022: Information technology — Data centres key performance indicators — Part 8: Carbon usage effectiveness (CUE)*. https://www.iso.org/standard/77691.html

International Organization for Standardization (März.2022b). *ISO/IEC 30134-9:2022: Information technology — Data centres key performance indicators — Part 9: Water usage effectiveness (WUE)*. https://www.iso.org/standard/77692.html

International Organization for Standardization (März.2023). *ISO/IEC 30134-7:2023: Information technology — Data centres key performance indicators — Part 7: Cooling efficiency ratio (CER)*. https://www.iso.org/standard/80493.html

J. Gibson, Robin Rondeau, Darren Eveleigh & Qing Tan (2012). Benefits and challenges of three cloud computing service models. *2012 Fourth International Conference on Computational Aspects of Social Networks (CASoN)*. https://www.semanticscholar.org/paper/Benefits-and-challenges-of-three-cloud-computing-Gibson-Rondeau/3e76103b94e4ea6090ce819e196bb51041f4319c

Jadeja, Y. & Modi, K. (2012). Cloud computing - concepts, architecture and challenges. In ieee (Hrsg.), *2012 International Conference on Computing, Electronics and Electrical Technologies* (S. 877–880). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICCEET.2012.6203873

Jane Webster & Richard T. Watson (2002). Analyzing the Past to Prepare for the Future: Writing a Literature Review. *MIS Quarterly*, *26*(2). https://doi.org/10.2307/4132319

Jayachander Surbiryala & Chunming Rong (2019). Cloud Computing: History and Overview. *2019 IEEE Cloud Summit*. https://www.semanticscholar.org/paper/Cloud-

Computing%3A-History-and-Overview-Surbiryala-Rong/a44daae7ba0bc7f8f8030cc8ff5286d9c99e40c2

Jens Gröger, Ran Liu, Dr. Lutz Stobbe, Jan Druschke & Nikolai Richter. (März 2021). *Green Cloud Computing: Lebenszyklusbasierte Datenerhebung zu Umweltwirkungen des Cloud Computing* (TEXTE 94/2021). Dessau-Roßlau. Öko-Institut e.V., Berlin; Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM). http://www.umweltbundesamt.de/publikationen

Joint Development Foundation Projects, LLC, Green Software Foundation Series. (2023, 6. Oktober). *Green Software Patterns | Green Software Patterns*. Zugriff am 12. Dezember 2023, verfügbar unter https://patterns.greensoftware.foundation/

Karandeep Kaur (2016). A Review of Cloud Computing Service Models. *International Journal of Computer Applications*. https://www.semanticscholar.org/paper/A-Review-of-Cloud-Computing-Service-Models-Kaur/6d3b1f3e793d76923cdd799b301115353f294cd5

Katal, A., Dahiya, S. & Choudhury, T. (2022). Energy efficiency in cloud computing data center: a survey on hardware technologies. *Cluster Computing*, *25*(1), 675–705. https://doi.org/10.1007/s10586-021-03431-z

Kitchenham BA & S. Charters. (2007). *Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering* (Bd. 2). https://www.researchgate.net/publication/302924724_Guidelines_for_performing_Systematic_Literature_Reviews_in_Software_Engineering

Krintz, C. (2018). Platform-as-a-Service (PaaS). In *Encyclopedia of Database Systems* (S. 2769). Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8265-9_80636

Krüger, D., Parchmann, I. & Schecker, H. (2014). *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (Aufl. 2014). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-37827-0

Lee, Y. C. & Zomaya, A. Y. (2012). Energy efficient utilization of resources in cloud computing systems. *The Journal of Supercomputing*, *60*(2), 268–280. https://doi.org/10.1007/s11227-010-0421-3

Lehwess, M. (2021). Public Cloud Architecture. In M. Toy (Hrsg.), *Future Networks, Services and Management: Underlay and Overlay, Edge, Applications, Slicing, Cloud, Space, AI/ML, and Quantum Computing* (1st ed. 2021, S. 213–243). Springer International Publishing; Imprint Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-81961-3_7

Liao, Y., Zhang, G. & Chen, H. (2020). Cost-Efficient Outsourced Decryption of Attribute-Based Encryption Schemes for Both Users and Cloud Server in Green Cloud Computing. *IEEE Access*, *8*, 20862–20869. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2969223

Lin, C.-C., Liu, P. & Wu, J.-J. (2011). Energy-Aware Virtual Machine Dynamic Provision and Scheduling for Cloud Computing. In *2011 IEEE International Conference on Cloud*

Computing (CLOUD) (S. 736–737). IEEE / Institute of Electrical and Electronics Engineers Incorporated. https://doi.org/10.1109/CLOUD.2011.94

Linux Foundation - Training. (2023, 18. Oktober). *Green Software for Practitioners (LFC131) - Linux Foundation - Training*. Zugriff am 12. Dezember 2023, verfügbar unter https://training.linuxfoundation.org/training/green-software-for-practitioners-lfc131/

M. U. Bokhari, Q. M. Shallal & Y. K. Tamandani (2016). Cloud computing service models: A comparative study. In *2016 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)*.

Mandal, R., Mondal, M. K., Banerjee, S., Srivastava, G., Alnumay, W., Ghosh, U. & Biswas, U. (2023). MECpVmS: an SLA aware energy-efficient virtual machine selection policy for green cloud computing. *Cluster Computing*, *26*(1), 651–665. https://doi.org/10.1007/s10586-022-03684-2

Mansour, R. F., Alhumyani, H., Khalek, S. A., Saeed, R. A. & Gupta, D. (2023). Design of cultural emperor penguin optimizer for energy-efficient resource scheduling in green cloud computing environment. *Cluster Computing*, *26*(1), 575–586. https://doi.org/10.1007/s10586-022-03608-0

Max Schulze (Hrsg.). (2023a, 16. Oktober). *Sdialliance.org: Sustainable Digital Infrastructur Alliance.* Sustainable Digital Infrastructure Alliance e.V. https://sdialliance.org/

Max Schulze (Hrsg.). (2023b, 16. Oktober). *Taxonomy: Sustainable Digital Infrastructur Alliance.* Sustainable Digital Infrastructure Alliance e.V. https://knowledge.sdialliance.org/taxonomy

Michael, Y. & Rolf, H. (2010). *THE ECONOMICS OF THE CLOUD*. https://news.microsoft.com/download/archived/presskits/cloud/docs/The-Economics-of-the-Cloud.pdf

Michael Armbrust, A. Fox, R. Griffith, A. Joseph, R. Katz, A. Konwinski, Gunho Lee, D. Patterson, A. Rabkin, I. Stoica & M. Zaharia (2009). Above the Clouds: A Berkeley View of Cloud Computing. *Science*. https://www.semanticscholar.org/paper/Above-the-Clouds%3A-A-Berkeley-View-of-Cloud-Armbrust-Fox/1f7190fc294246f83f1f331cc51e3264851d0d36

Michael Kavis (2014). Architecting the Cloud: Design Decisions for Cloud Computing Service Models (Saas, Paas, and Iaas). https://www.semanticscholar.org/paper/Architecting-the-Cloud%3A-Design-Decisions-for-Cloud-Kavis/6c14a6c6f5470c8b9c5c89d0537b2c4071769ff5

Microsoft. *2022 Environmental Sustainability Report: Enabling sustainability for our company, our customers, and the world*. https://query.prod.cms.rt.microsoft.com/cms/api/am/binary/RW15mgm

Microsoft Corporation. (2018). *The carbon benefits of cloud computing: A study on the Microsoft Cloud in partnership with WSP*. Zugriff am 12. Dezember 2023, verfügbar unter https://www.microsoft.com/en-us/download/details.aspx?id=56950

Microsoft News Centre Europe. (2023, 16. Oktober). *As the world goes digital, datacenters that make the cloud work look to renewable energy sources - Microsoft News Centre Europe*. Zugriff am 12. Dezember 2023, verfügbar unter https://news.microsoft.com/europe/features/as-the-world-goes-digital-datacenters-that-make-the-cloud-work-look-to-renewable-energy-sources/

Mohammadzadeh, A., Masdari, M., Gharehchopogh, F. S. & Jafarian, A. (2021). Improved chaotic binary grey wolf optimization algorithm for workflow scheduling in green cloud computing. *Evolutionary Intelligence*, *14*(4), 1997–2025. https://doi.org/10.1007/s12065-020-00479-5

Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J. & Altman, D. G. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *Annals of internal medicine*, *151*(4), 264-9, W64. https://doi.org/10.7326/0003-4819-151-4-200908180-00135

Murdiyanto, A. W. & Priadana, A. (2021). Analysis of Web Scraping Techniques to Get Keywords Suggestion and Allintitle Automatically from Google Search Engines. *Compiler*, *10*(2), 71. https://doi.org/10.28989/compiler.v10i2.1064

Mustafa, S., Sattar, K., Shuja, J., Sarwar, S., Maqsood, T., Madani, S. A. & Guizani, S. (2019). SLA-Aware Best Fit Decreasing Techniques for Workload Consolidation in Clouds. *IEEE Access*, *7*, 135256–135267. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2941145

Muthusamy, A., Anand, A., Kannan, T. V. & Rao, D. N. (2021). The Modern Way for Virtual Machine Placement and Scalable Technique for Reduction of Carbon in Green Combined Cloud Datacenter. In B. Balusamy (Hrsg.), *Green Energy and Technology. Green Computing in Smart Cities* (S. 1–18). Springer International Publishing AG. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48141-4_1

Nedbal, D. (2012). An Examination of the Economic Value and Contribution to Energy Efficiency of SaaS Solutions: The Case of E-Invoicing. In L.-J. Zhang (Hrsg.), *2012 IEEE First International Conference on Services Economics (SE 2012): Honolulu, Hawaii, USA, 24 - 29 June 2012 ; [proceedings* (S. 1–8). IEEE. https://doi.org/10.1109/SE.2012.7

Official Google Blog: Powering a Google search. (2023, 30. Juni). https://googleblog.blogspot.com/2009/01/powering-google-search.html

Okoli, C. & Schabram, K. (2010). *A Guide to Conducting a Systematic Literature Review of Information Systems Research.* https://doi.org/10.2139/ssrn.1954824

Olowu, M., Yinka-Banjo, C., Misra, S. & Florez, H. (2019). *A Secured Private-Cloud Computing System* (Communications in Computer and Information Science). Springer International Publishing, *1051*, S. 373–384.

OpenStack. (2023, 29. Juni). *Open Source Cloud Computing Infrastructure - OpenStack*. Zugriff am 12. Dezember 2023, verfügbar unter https://www.openstack.org/

Österreichisches Umweltzeichen (1. Juli 2021). *Richtlinie UZ 80: Klimaschonende Colocation-Rechenzentren* (Version 1). Wien. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,Mobilität, Innovation und Technologie; VKI, Verein für Konsumenteninformation. https://www.umweltzeichen.at/file/Richtlinie/UZ%2080/Long/Uz80_R1a_Rechenzentren_2021.pdf

P. Mell & T. Grance (2011). The NIST Definition of Cloud Computing. https://www.semanticscholar.org/paper/The-NIST-Definition-of-Cloud-Computing-Mell-Grance/379f897fa771cc8fecddac7e982c6fb0a3fffb86

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., . . . Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, *372*, n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Paola Annis & Jennifer Wagman. (2023, 17. Oktober). *Messen der Nachhaltigkeit von Azure-Apps mithilfe des SCI-Scores - Azure Architecture Center.* Microsoft Corporation. Zugriff am 12. Dezember 2023, verfügbar unter https://learn.microsoft.com/de-de/azure/architecture/example-scenario/apps/measure-azure-app-sustainability-sci-score

Paolo Bertold. (2023). *Assessment Framework for Data Centres in the Context of Activity 8.1 in the Taxonomy Climate Delegated Act.* European Commission. https://e3p.jrc.ec.europa.eu/publications/assessment-framework-data-centres-context-activity-81-taxonomy-climate-delegated-act

Patil, A. & Patil, R. (2019). An Analysis Report on Green Cloud Computing Current Trends and Future Research Challenges. *SSRN Electronic Journal.* Vorab-Onlinepublikation. https://doi.org/10.2139/ssrn.3355151

Radu, L.-D. (2017). Green Cloud Computing: A Literature Survey. *Symmetry*, *9*(12), 295. https://doi.org/10.3390/sym9120295

Rawat, S., Kumar, P., Sagar, S., Singh, I. & Garg, K. (2017). An analytical evaluation of challenges in Green cloud computing. In *ICTUS : 2017 International Conference on Infocom Technologies and Unmanned Systems (trends and future directions): December 18-20, 2017, Amity University Dubai, Dubai International Academic City* (S. 351–355). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICTUS.2017.8286031

Richter, F. (8. August 2023). Amazon Maintains Lead in the Cloud Market. *Statista*. https://www.statista.com/chart/18819/worldwide-market-share-of-leading-cloud-infrastructure-service-providers/

Rowley, J. & Slack, F. (2004). Conducting a literature review. *Management Research News*, *27*(6), 31–39. https://doi.org/10.1108/01409170410784185

A. S. Rumale & D. N. Chaudhari (2017). Cloud computing: Software as a service. In *2017 Second International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*.

S. Khurana & Anmol Verma (2013). Comparison of Cloud Computing Service Models: SaaS, PaaS, IaaS. https://www.semanticscholar.org/paper/Comparison-of-Cloud-Computing-Service-Models%3A-SaaS%2C-Khurana-Verma/fabe9beaff63b625b47c269e861981b5654e7c18

S. Supreeth, K. P. (2022). VM Scheduling for Efficient Dynamically Migrated Virtual Machines (VMS-EDMVM) in Cloud Computing Environment. *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, *16*(6). https://doi.org/10.3837/tiis.2022.06.007

Safari, M. & Khorsand, R. (2018). Energy-aware scheduling algorithm for time-constrained workflow tasks in DVFS-enabled cloud environment. *Simulation Modelling Practice and Theory*, *87*, 311–326. https://doi.org/10.1016/j.simpat.2018.07.006

Shailesh S. Deore & Ashok Narayan Patil (2012). Energy-Efficient Scheduling Scheme for Virtual Machines in Cloud Computing. *International Journal of Computer Applications*, *56*, 19–25. https://research.ijcaonline.org/volume56/number10/pxc3882999.pdf

Shojaei, K., Safi-Esfahani, F. & Ayat, S. (2018). VMDFS: virtual machine dynamic frequency scaling framework in cloud computing. *The Journal of Supercomputing*, *74*(11), 5944–5979. https://doi.org/10.1007/s11227-018-2508-1

Shojafar, M., Canali, C., Lancellotti, R. & Abawajy, J. (2020). Adaptive Computing-Plus-Communication Optimization Framework for Multimedia Processing in Cloud Systems. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, *8*(4), 1162–1175. https://doi.org/10.1109/TCC.2016.2617367

Shu, W., Cai, K. & Xiong, N. N. (2021). Research on strong agile response task scheduling optimization enhancement with optimal resource usage in green cloud computing. *Future Generation Computer Systems*, *124*, 12–20. https://doi.org/10.1016/j.future.2021.05.012

Sitaram, D. & Manjunath, G. (2011a). Chapter 2 - Infrastructure as a Service. In D. Sitaram & G. Manjunath (Hrsg.), *Moving to the cloud: Developing apps in the new world of cloud computing* (S. 23–71). Syngress. https://doi.org/10.1016/B978-1-59749-725-1.00002-0

Sitaram, D. & Manjunath, G. (2011b). Chapter 3 - Platform as a Service. In D. Sitaram & G. Manjunath (Hrsg.), *Moving to the cloud: Developing apps in the new world of cloud computing* (S. 73–152). Syngress. https://doi.org/10.1016/B978-1-59749-725-1.00003-2

Software Carbon Efficiency Rating · Green-Software-Foundation/scer Wiki · GitHub. (2023, 24. Oktober). https://github.com/Green-Software-Foundation/scer/wiki/Software-Carbon-Efficiency-Rating

Sohaib Ajmal, M., Iqbal, Z., Zeeshan Khan, F., Bilal, M. & Majid Mehmood, R. (2021). Cost-based Energy Efficient Scheduling Technique for Dynamic Voltage and Frequency Scaling System in cloud computing. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *45*, 101210. https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101210

Statista. (2023, 24. Juni). *IT services spending forecast 2023 | Statista*. Zugriff am 12. Dezember 2023, verfügbar unter https://www.statista.com/statistics/203291/global-it-services-spending-forecast/#statisticContainer

Stavrinides, G. L. & Karatza, H. D. (2019). An energy-efficient, QoS-aware and cost-effective scheduling approach for real-time workflow applications in cloud computing systems utilizing DVFS and approximate computations. *Future Generation Computer Systems*, *96*, 216–226. https://doi.org/10.1016/j.future.2019.02.019

Steven Gonzalez Monserrate (2022). The Cloud Is Material: On the Environmental Impacts of Computation and Data Storage. *Winter 2022.* Vorab-Onlinepublikation. https://doi.org/10.21428/2c646de5.031d4553

Surendran, R. & Tamilvizhi, T. (2018). How to Improve the Resource Utilization in Cloud Data Center? In *2018 International Conference on Innovation and Intelligence for Informatics, Computing, and Technologies (3ICT)* (S. 1–6). IEEE. https://doi.org/10.1109/3ICT.2018.8855740

Sustainability. (2023, 17. Oktober). *Sustainable Innovation & Technology - Google Sustainability.* Google Ireland Limited. Zugriff am 12. Dezember 2023, verfügbar unter https://sustainability.google/

Sustainable Digital Infrastructure Alliance e.V. *Digital Environmental Footprint.* Sustainable Digital Infrastructure Alliance e.V. Zugriff am 12. Dezember 2023, verfügbar unter https://knowledge.sdialliance.org/digital-environmental-footprint/overview-tools-and-apis

Sustainable Digital Infrastructure Alliance e.V. (Colonnaden 5, 20354 Hamburg, Deutschland). *Launching the Sustainable Digital Infrastructure Alliance e.V. - Reducing Emissions from Digital Infrastructure and strengthening the Digital Economy*. Zugriff am 12.12.2023, verfügbar unter https://sdialliance.org/blog/position-paper-high-potential-of-co2-free-commercial-waste-heat-from-data-centers-0/

Thayananthan, V., Abdulkader, O., Jambi, K. & Bamahdi, A. M. (2017). Analysis of Cybersecurity Based on Li-Fi in Green Data Storage Environments. In *2017 IEEE 4th*

International Conference on Cyber Security and Cloud Computing (CSCloud 2017): New York, New York, USA, 26-28 June 2017 (S. 327–332). IEEE. https://doi.org/10.1109/CSCloud.2017.32

Tobias Zimmergren. (2023, 17. Oktober). *Dokumentation zu Nachhaltigkeitsworkloads - Microsoft Azure Well-Architected Framework.* Microsoft Corporation. Zugriff am 12. Dezember 2023, verfügbar unter https://learn.microsoft.com/de-de/azure/well-architected/sustainability/

Tsai, L. & Liao, W. (2012). Cost-aware workload consolidation in green cloud datacenter. In *2012 IEEE 1st International Conference on Cloud Networking (CLOUDNET)* (S. 29–34). IEEE. https://doi.org/10.1109/CloudNet.2012.6483650

T-Systems. (2023, 27. Oktober). *European Commission awards data centre in Biere*. Zugriff am 12. Dezember 2023, verfügbar unter https://www.t-systems.com/de/en/newsroom/news/european-commission-awards-data-centre-in-biere-612562

Umweltbundesamt. (2018). *Ökobilanz.* Umweltbundesamt. Zugriff am 23. Oktober 2023, verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/produkte/oekobilanz

Umweltbundesamt. (2023, 16. Oktober). *KPI4DCE 2.0.* Umweltbundesamt. Zugriff am 12. Dezember 2023, verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/kpi4dce-20

Usha Kirana, S. P. & D'Mello, D. A. (2021). Energy-efficient enhanced Particle Swarm Optimization for virtual machine consolidation in cloud environment. *International Journal of Information Technology*, *13*(6), 2153–2161. https://doi.org/10.1007/s41870-021-00745-4

Vaishnavi, P. & Ananthi, S. (2020). Environmental Impact Study on Carbon Footprint Emission and Development of Software Architectural Framework to Measure the Level of Emission in Cloud Services. In V. K. Gupta, P. V. Varde, P. K. Kankar & N. Joshi (Hrsg.), *Lecture Notes in Mechanical Engineering. Reliability and risk assessment in engineering: Proceedings of INCRS 2018* (S. 159–164). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-3746-2_14

Walsh, B. D. *A new approach for Scope 3 emissions transparency.* Microsoft Corporation. https://download.microsoft.com/download/7/2/8/72830831-5d64-4f5c-9f51-e6e38ab1dd55/Microsoft_Scope_3_Emissions.pdf

Wang, L., Zhang, F., Vasilakos, A. V., Hou, C. & Liu, Z. (2014). Joint virtual machine assignment and traffic engineering for green data center networks. *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, *41*(3), 107–112. https://doi.org/10.1145/2567529.2567560

Watson, R. T. & Webster, J. (2020). Analysing the past to prepare for the future: Writing a literature review a roadmap for release 2.0. *Journal of Decision Systems*, *29*(3), 129–147. https://doi.org/10.1080/12460125.2020.1798591

Welcome | Learn Green Software. (2023, 16. Oktober). https://learn.greensoftware.foundation/

Westerhof, R. *A Model for the Total Carbon Footprint of a Cloud-based Software as a Service Provider and its Customers*. fse.studenttheses.ub.rug.nl. https://fse.studenttheses.ub.rug.nl/28563/

Westphall, C. B. & Villarreal, S. R. (2013). PRINCIPLES AND TRENDS IN GREEN CLOUD COMPUTING. *Revista Eletrônica de Sistemas de Informação*, *12*(01), 7. https://doi.org/10.5329/RESI.2013.1201007

Wohl, A. (2010). Software as a Service (SaaS). In P. Simon (Hrsg.), *The next wave of technologies: Opportunities from chaos* (S. 97–113). John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/9781119199946.ch6

World Business Council for Sustainable Development; World Resources Institute. (2004). *The greenhouse gas protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard* (Revised ed.). World Resources Inst. https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf

Xiaoying Wang, Guojing Zhang, Mengqin Yang & Lei Zhang (2017). Green-Aware Virtual Machine Migration Strategy in Sustainable Cloud Computing Environments. https://www.semanticscholar.org/paper/Green-Aware-Virtual-Machine-Migration-Strategy-in-Wang-Zhang/5e7cb035412c11bf084d10139befa537b17d599a

Xu, M. & Buyya, R. (2020). Managing renewable energy and carbon footprint in multi-cloud computing environments. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, *135*, 191–202. https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2019.09.015

Xu, Y. & Abnoosian, K. (2022). A new metaheuristic-based method for solving the virtual machines migration problem in the green cloud computing. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, *34*(3), Artikel e6579. https://doi.org/10.1002/cpe.6579

Zhou, Q., Xu, M., Singh Gill, S., Gao, C., Tian, W., Xu, C. & Buyya, R. (2020). Energy Efficient Algorithms based on VM Consolidation for Cloud Computing: Comparisons and Evaluations. In *2020 20th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Internet Computing (CCGRID)* (S. 489–498). IEEE. https://doi.org/10.1109/CCGrid49817.2020.00-44