

Ein Framework für präferenzorientierte Handlungsempfehlungen zur Effizienzsteigerung von Rechenzentren

Volkan Gizli¹, and Jorge Marx Gomez¹

¹ Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Department für Informatik, Oldenburg, Deutschland
{volkan.gizli,jorge.marx.gomez}@uni-oldenburg.de

Zusammenfassung. Eine Reihe von vergangenen Studien belegen, dass ca. 50.000 Rechenzentren in Deutschland über 12 TWh beanspruchen, was ungefähr 2% des Gesamtstrombedarfs in dem Land ausmacht. Die Prognosen für das Jahr 2020 belaufen sich sogar auf 14 TWh. Durch Umweltzertifikate wie „Der Blaue Engel“ werden Versuche unternommen, die Energieeffizienz in den deutschen Rechenzentren zu optimieren. Untersuchungen zufolge ist es noch nicht einmal eine zweistellige Anzahl an Rechenzentren in Deutschland, die solche Zertifikate verwenden, da die Präferenz nicht immer auf der Energieeffizienz liegt, sondern auf anderen Belangen, die unabhängig davon eine Effizienz mit sich bringen. Ein Ansatz, mit dem dieser präferenzorientierte Hintergrund zur individuellen Optimierung der Effizienz in Rechenzentren gesteigert werden kann, soll in diesem Beitrag aufgezeigt werden.

Keywords: Rechenzentren, Energieeffizienz, Der Blaue Engel, Effizienz.

1 Einleitung

Rechenzentren sind in der Infrastruktur der deutschen Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) von enormer Bedeutung. Heutzutage bilden Rechenzentren die fundamentale Grundlage eines IT-gestützten Unternehmens. Ein Unternehmen aufzubauen bzw. zu führen, ohne die Nutzung eines Rechenzentrums, ist fast schon unmöglich. „Dies ist zum einen durch die strategische Bedeutung einer funktionierenden und gut ausgebauten IT-Infrastruktur begründet. Zum anderen entsteht durch den Betrieb, die Ausstattung, den Bau und die Modernisierung von Rechenzentren eine inländische Wertschöpfungskette in beträchtlichem Maße.“ [1] In Deutschland beanspruchen über 50.000 Rechenzentren gemäß vergangener Studien 12 TWh, was ungefähr 2% des Gesamtstrombedarfs in dem ganzen Land ausmacht, womit das Land als führender Rechenzentrumsstandort in ganz Europa gilt [2]. Den Entwicklungen zufolge ist in dem Jahr 2020 mit einer Prognose von 14 TWh zu rechnen. Zugrunde liegen für diese Entwicklung der Bedarf an Speicherung sowie die Verarbeitung großer Datenmengen als entscheidende Ursache. So lag 2005 der Energiebedarf für die Speichersysteme bei 5% [3] des Gesamtbedarfs, wohingegen der

Multikonferenz Wirtschaftsinformatik 2018,
March 06-09, 2018, Lüneburg, Germany

Wert sich 2011 schon auf 17% [4] belief. Maßnahmen wie die Betrachtung vor- und nachgelagerter Wertschöpfungsketten sowie die damit in Verbindung stehende sogenannte „Graue Energie“ sollen zum Entgegenwirken bzw. zur Optimierung beitragen, womit eine Steigerung der Energieeffizienz im ganzheitlichen Sinne erzielt werden soll. Der Energieverbrauch der einzelnen Rechenzentren wird derzeit auf Basis des tatsächlichen Stromverbrauchs beim Betrieb des Rechenzentrums ermittelt. Hierbei unberücksichtigt bleibt jedoch die aufgewendete Energie, die für die Herstellung, den Transport, die Lagerung und Entsorgung der Komponenten benötigt wird, was die Untersuchung des gesamten Produktlebenszyklus erfordert. Diese nicht berücksichtigte Energie wird auch „Graue Energie“ genannt [5]. Die Ermittlung dessen ist ein sehr aufwendiges Unterfangen und wird aufgrund dessen häufig ausgelassen bzw. im Bereich der Energieeffizienz nicht beachtet. Ein Beispiel für dieses Thema ist die Herstellung von Anlagen zur Gewinnung von erneuerbaren Energien. Der Energieaufwand, der beispielsweise für die Herstellung von Windkraft- oder Photovoltaikanlagen benötigt wird, ist meistens um ein vielfaches höher als die Leistungsdichte dieser Anlage. Daher ist es nicht selten, dass sich solche Anlagen aus energetischer Sicht erst nach Jahren amortisieren [6].

Der Hintergrund des stetigen Wachstums der Materialien in Rechenzentren wie der Server, Speicher und Netzwerkkomponenten gewinnt immer mehr an Relevanz, wohingegen bisher viele Rechenzentren keine Maßnahmen ergriffen haben, um eine Steigerung in der Energieeffizienz, z. B. durch die Implementierung geeigneter Ansätze, zu erzielen. Dazu liegen intransparente Kriterien wie der unpraktikabel Bestand von Kennzahlen zugrunde, die zur Bestimmung des Energiepotenzials von Rechenzentren nicht weiterhelfen.

Eine Kennzahl für die Bestimmung der Energieeffizienz von Rechenzentren hat der Unternehmensverbund „The Green Grid“ im Jahr 2007 entwickelt. Sie heißt „Power Usage Effectiveness“ (PUE) und gilt als die wohl wichtigste Kennzahl zur Messung der Energieeffizienz in Rechenzentren, dessen Wert eine Aussage über das Verhältnis des Gesamtenergieverbrauchs des Rechenzentrums zum Eigenverbrauch der IT-Komponenten gibt. Dieser Wert ist umso besser, wenn er gegen 1 konvergiert. Beispielsweise würde ein PUE-Wert von 3 als sehr schlecht eingestuft werden, was bedeuten würde, dass ca. zwei Drittel der eingesetzten Leistung für Wärme bzw. die Abführung der Wärme verbraucht werden und nur ein Drittel der Leistung des realen Verbrauchs von den Rechnern verwendet werden. Heutzutage gilt ein PUE-Wert von 1,3 als ausgezeichnet. Dieses bedeutet, dass 30% der eingesetzten Leistung ineffizient genutzt werden. Der ideale Wert des Power Usage Effectiveness ist 1, was bedeuten würde, dass keine weitere Energie von der Hardware benötigt wird [7]. Der Wert unter 1 wäre gewinnbringend, was z. B. durch die Wiederverwendung erzeugter Wärme realisiert werden könnte, indem z. B. die Heizkosten eines Rechenzentrums eingespart werden. Denkbar ist z. B. mittels der Abwärme angrenzende Bürogebäude oder Lagerhallen zu heizen. Im Umkehrschluss würde sich somit in einer Gesamtbetrachtung des PUE-Wertes ein Wert unter 1 ergeben. Nachteilhaft an dem PUE-Wert ist, dass sich durch die Effizienzverbesserung der IT-Hardware ein schlechterer Wert ergibt, weil der PUE-Wert keine ganzheitliche Aussage über das

Rechenzentrum gibt. Von daher ist die Betrachtung des Gesamtenergiebedarfs sehr wichtig [8].

Außerdem werden durch Umweltzertifikate wie „Der Blaue Engel“ Versuche unternommen, die Energieeffizienz in den deutschen Rechenzentren zu optimieren.

„Der Blaue Engel“ beinhaltet wichtige Kennzahlen, die eine hohe Relevanz als zertifizierter Maßstab darstellen. Das Umweltzeichen hat sich für Betreiber von Rechenzentren, die eine Optimierung in der Energie und Ressourceneffizienz verfolgen, zur Aufgabe gemacht, Zertifizierungen von Rechenzentren durchzuführen, um ein energiebewusstes Rechenzentrumsbetrieb umsetzen zu können [9].

Mit dieser Herausforderung beschäftigt sich die Carl von Ossietzky Universität Oldenburg in der Forschungskoooperation des Projektes TEMPRO (Total Energy Management for Professional Data Centers) vom BMWi im Rahmen des 6. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung. Neben weiteren akademischen Partnern sowie Industrie- und sonstigen Verbundpartnern im Forschungsprojekt TEMPRO beschäftigt sich die Abteilung VLBA (Very Large Business Applications) der Wirtschaftsinformatik an der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg mit dem Arbeitspaket 3 „Informations- und Bewertungsmodelle für die Energieeffizienz in Rechenzentren“¹. Nicht einmal eine zweistellige Anzahl an Rechenzentren in Deutschland verwendet solche Zertifikate. Gemäß den ersten Untersuchungen und daraus zu entnehmenden Annahmen, die im Rahmen dieses Forschungskontextes ermittelt wurden, deuten die Anzeichen sehr stark darauf hin, dass die Präferenz nicht immer auf der Energieeffizienz liegt, sondern auf anderen individuellen Belangen, die unabhängig davon eine Effizienz mit sich bringen. Aus diesem Hintergrund heraus ist es naheliegend, dass es nicht irrelevant ist diesem Aufschluss eine Bedeutung beizumessen sowie nachzugehen.

2 Optimierung der Energieeffizienz in Rechenzentren

Neben verschiedenen Ansätzen zur Optimierung der Energieeffizienz von Rechenzentren ist das Umweltzeichen „Der Blaue Engel“ ein etabliertes Vorgehen, um eine Zertifizierung energiebewusster Rechenzentren umzusetzen. Betreiber können bereits seit 2011 ihr Rechenzentrum überprüfen lassen, um eine Auszeichnung zu erhalten. Schon fünf Monate nach dem Start stand jedoch fest, dass nur sehr wenige Rechenzentren die Bewertungskriterien erfüllen [10]. Es liegt aber weniger an der Umsetzungsmöglichkeit der Kriterien, denn dieses ist prinzipiell machbar [11], als an der Relation zwischen den Kosten und dem Nutzen, der aus dem Umweltzeichen gezogen werden kann. „Der Blaue Engel“ ist das 1978 gegründete Umweltzeichen des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Zweck dieser Auszeichnung ist es, Verbrauchern ein Hilfsmittel an die Hand zu geben, mit dem sie in der Lage sind, durch gezielte Nachfragen umweltfreundliche Produkte zu erkennen und somit zu fördern. Zudem wird damit auch die Umweltbelastung reduziert [12]. In Deutschland sind bislang nur vier Unternehmen, die die Zertifizierung „Der Blaue

¹ <http://tempro.uni-oldenburg.de/>

Engel“ als energieeffizientes Rechenzentrum erhalten haben [13]. Für die geringe Nutzung gibt es unterschiedliche Gründe. Das Umweltbundesamt hat im Jahr 2014 in einer Onlinebefragung nach der Bekanntheit von Umweltzeichen gefragt. Der Befragte sollte sich zu bestimmten Zeichen und Siegeln äußern, ob sie ihm bekannt sind und wenn ja, ob sie seine Kaufentscheidung beeinflussen. Beteiligt waren an dieser Umfrage über 2.000 Nutzer. Anhand der herausgefundenen Ergebnisse lässt sich eindeutig erkennen, dass „Der Blaue Engel“ vielen bekannt ist, aber nicht sonderlich zu einer Kaufentscheidung beiträgt, was aus der folgenden Abbildung zu entnehmen ist [14].

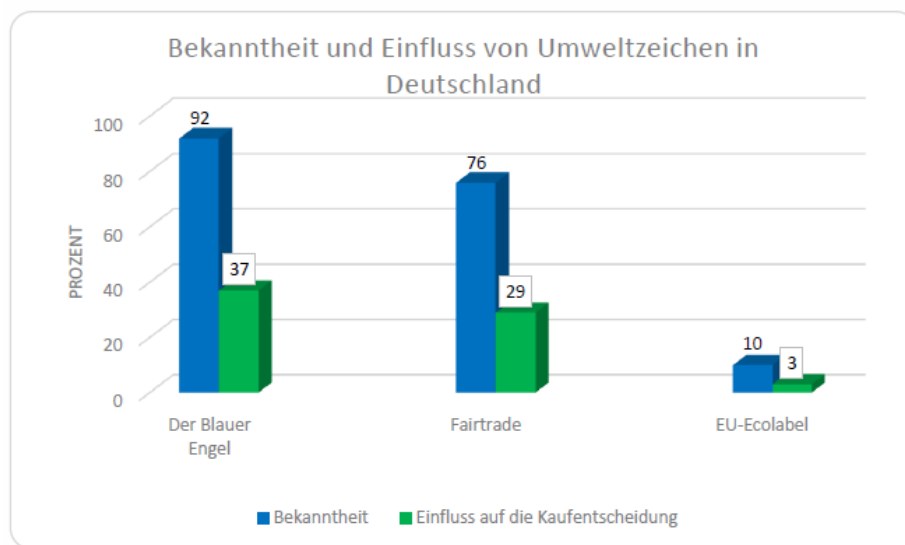


Abbildung 1: Bekanntheit und Einfluss von Produktübergreifenden Labels in Deutschland [14]

Abbildung 1 zeigt den Bekanntheitsgrad sowie den Einfluss auf die Kaufentscheidung von Umweltzeichen. Geprüft wird der gesamte Produktionsweg, bevor die Auszeichnung „Der Blaue Engel“ vergeben wird. Warum deutschlandweit nur so wenige Unternehmen ihre Produkte und Dienstleistungen mit dem Zertifikat „Der Blauen Engel“ auszeichnen lassen, kann nicht eindeutig geklärt werden. Der jährliche Kostenfaktor, der durch die Zertifizierung der Produkte/Dienstleistungen anfällt, wird sicherlich auch eine Rolle in den Entscheidungen spielen. Eine eventuell maßgebendere Rolle werden die Vergabegrundlagen bzw. deren Gültigkeit haben. Die allgemeine Information zur Laufzeit von den Vergabegrundlagen sagt aus, dass das Umweltzeichen prinzipiell nur für einen befristeten Zeitraum vergeben wird. Dieser wird von der Jury des Umweltzeichens beschlossen und liegt in der Regel zwischen 3 und 5 Jahren. Basierend auf dieser Vergabegrundlage erschließt sich die gleiche Laufzeit für den Zeichenbenutzungsvertrag.

Zu den Hauptkriterien des Zertifikats „Der Blaue Engel“ gehören die Überprüfung der Auswirkung auf die Umwelt (Klima, Wasser, Schonung der Ressourcen, etc.), sowie die Auswirkung auf die menschliche Gesundheit [15].

Der Verbraucher wird darauf hingewiesen, dass, wenn er ein Produkt oder eine Dienstleistung erwirbt, die mit dem Zertifikat „Der Blaue Engel“ ausgezeichnet ist, es eine positive Auswirkung auf die Umwelt hat. Anhand der folgenden Beispielkriterien des Umweltbundesamtes werden Produkte und Dienstleistungen für die Vergabe des Zertifikates „Der Blaue Engel“ überprüft:

- Ressourcen bei der Herstellung sparen
 - Aus nachhaltig produzierten Rohstoffen hergestellt werden
 - Weniger Ressourcen bei Nutzung und Entsorgung verbrauchen, weil sie beispielsweise besonders energieeffizient sind
 - Schädliche Substanzen für Umwelt oder Gesundheit vermeiden oder auf ein Mindestmaß beschränken
 - Besonders langlebig und reparaturfähig sind
 - Sich gut recyceln lassen
 - Geringe Emissionen in Boden, Wasser, Luft oder wenig Lärm verursachen
 - Ihre Funktion (Gebrauchstauglichkeit) in hoher Qualität erfüllen
- [16]

Darüber hinaus gibt es noch weitere Ansätze, die verfolgt werden, wie z. B. die Entwicklung eines Frameworks, die durch eine Konformitätsprüfung zertifizierter Kennzahlen und einer daraus resultierenden Handlungsempfehlung zur ganzheitlichen Steigerung der Energieeffizienz in Rechenzentren dienen soll. Dieses wird ebenfalls in dem Forschungsprojekt TEMPRO angegangen [17].

Im Rahmen der stetig wachsenden Digitalisierung in Deutschland sind Big Data, mobiles Internet sowie das Internet of Things (IoT) nur drei der größten Themen. Betrachtet man den Aspekt der mobilen Globalisierung, wird schnell bewusst, dass in naher Zukunft eine enorme Menge an Datenstrom zu bewältigen sein wird. Nimmt man Bezug auf die Statistik des „Cisco Blogs Deutschland“, steigt allein der mobile Datenverkehr bis zum Jahre 2019 auf ein monatliches Volumen von 259,8 Petabyte. Das entspricht in etwa 272 Millionen Gigabyte [18]. Um dieses Volumen zu bewältigen, ist ein enormer Mehrbedarf an Rechenleistung erforderlich. Die darauf spezialisierten Unternehmen der IT-Branche befinden sich ständig im Wachstum und investieren stark in den Ausbau der Rechenzentren. Um der Verarbeitung derart großer Mengen an Daten gerecht zu werden, ist der stetige Ausbau der Hard- und Software der Rechenzentren von hoher Bedeutung.

Einem Experteninterview zufolge, das bei einem assoziierten Partner des Forschungsprojektes TEMPRO geführt wurde, dessen mittelständisches Unternehmen ein zertifiziertes Rechenzentrum betreibt, besteht insbesondere bei bestehenden Rechenzentren für die Zertifizierung, z. B. durch das Zertifikat „Der Blaue Engel“, ein sehr großer Aufwand zur Umstrukturierung. Darüber hinaus sind neben dieser Umstrukturierung auch viele Kosten für den finanziellen Aufwand notwendig, die sich nicht rechnen. Außerdem besteht die Befürchtung, dass durch Supercomputer² mit höchsten Rechenleistungen Konflikte zwischen Nutzen und Energieeffizienz erzeugt

² Supercomputer bzw. Superrechner sind die Bezeichnungen für die schnellsten Rechner in der gegenwärtigen Zeit.

werden. Wenn eine gewisse Rechenpower benötigt wird, könnte das nicht so gut mit der Energieeffizienz verträglich sein [19]. Weitere Beispiele neben Supercomputer sind für solche Hochleistungssysteme Hardwarekomponenten wie In-Memory-Datenbanken³ etc.

3 Effizienzorientierte Rechenzentren

Die Tatsache, dass bisher lediglich vier Rechenzentren mit dem Umweltzeichen „Der Blaue Engel“ zertifiziert sind und aus den genannten Umfragen bzw. Studien im vorigen Kapitel das sehr geringfügige Interesse hervorgeht, lässt die Annahmen erhärten, dass nicht alle Rechenzentrumsbetreiber an einem zertifizierten Rechenzentrum interessiert sind.

Wie sich außerdem in dem Experteninterview, das am Ende des zweiten Kapitels dieses Beitrages erwähnt wurde, herausstellt, ist die Befürchtung, dass zwischen dem Nutzen und der Energieeffizienz Konflikte erzeugt werden können, was insbesondere die Zweckerreichung von Supercomputern betrifft, dessen Aufgabe z. B. das sehr schnelle Abarbeiten, Rechnen oder Generieren von Daten ist. Dieser Hintergrund deutet sehr stark darauf hin, dass die Präferenz nicht immer auf der Energieeffizienz liegt, sondern auch auf anderen individuellen Belangen, die unabhängig davon eine Effizienz mit sich bringen. Aus diesem Hintergrund heraus ist es naheliegend, dass es nicht irrelevant ist diesem Aufschluss eine Bedeutung beizumessen sowie nachzugehen, wozu in diesem Forschungskontext ein Framework entwickelt werden soll, das für präferenzorientierte Handlungsempfehlungen zur Effizienzsteigerung von Rechenzentren dienen soll und Rechenzentrumsbetreiber bei der Konfiguration ihrer Rechenzentren mit ihren individuellen Effizienzpräferenzen zum Ziel verhelfen soll.

Als ein möglicher Ansatz zur Optimierung soll ein Empfehlungssystem namens *ProDC* (Preference-oriented Data Centers) entwickelt werden. „*Ein Empfehlungssystem (oft auch „Recommender System“ genannt) ist ein System, das einem Benutzer in einem gegebenen Kontext aus einer gegebenen Entitätsmenge aktiv eine Teilmenge „nützlicher“ Elemente empfiehlt.*“ [20] Der Kontext eines solchen Empfehlungssystems besteht aus den folgenden Elementen:

- Benutzerprofil P
 - Explizite Informationen wie Geschlecht, Alter, Interessengebiete etc.
 - Implizite Informationen wie Besuchshäufigkeit einer Website, gelesene Texte, gekaufte Produkte etc.
- Entitätsmenge (*Empfehlungselemente*) M
 - Kontextelemente
 - Z. B. Dinge wie Bücher, Musikstücke, Konzerte, Reisen, Nachrichten, Fachartikel, E-Mails, Fachleute etc.
- Situation S
 - Rahmenparameter der realen Welt

³ In-Memory-Datenbanken (IMDB) sind Datenbankmanagementsysteme, die den Arbeitsspeicher eines Computers als Datenspeicher nutzen.

- Z. B. Datum, Uhrzeit, Geoinformation, verwendetes Endgerät des Benutzers, gerade angezeigter Text im Browser des Benutzers etc.
- Empfohlene Elemente T
 - Teilmenge von M
 - Soll Nutzen des Benutzers B maximieren

Die Aufgabe eines solchen Empfehlungssystems ist formal ausgedrückt folgende Optimierung:

$$\max(\text{Nutzwert}(B,K,T)) \text{ mit } K = (P,M,S)$$

Dieser Definition der Nutzwertfunktion kommt offensichtlich eine große Bedeutung zu [20].

Die folgende Grafik veranschaulicht den ganzen Kontext des Empfehlungssystems:

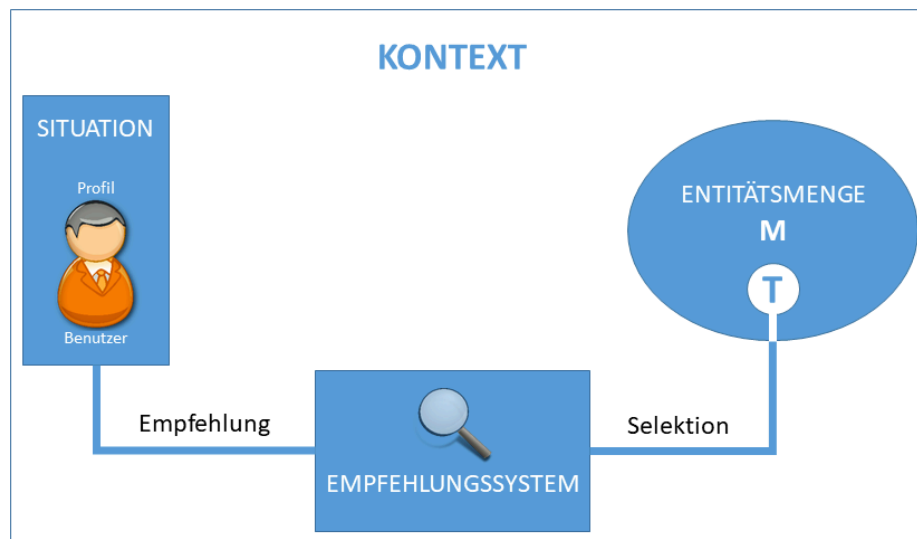


Abbildung 2: Empfehlungssystem [20]

Das Framework *ProDC* soll durch einen Wizard⁴ die Anforderungen der Rechenzentrumsbetreiber aufnehmen und gemäß dieser Angaben resultierend eine intelligente Handlungsempfehlung für die Gestaltung des Rechenzentrums basierend auf diese individuellen Ziele ausgeben.

Durch die Umsetzung dieses Frameworks wäre ein denkbare Szenario z. B., dass ein Rechenzentrumsbetreiber, der beispielsweise die Präferenz hat ein energieeffizientes Rechenzentrum zu gestalten, das Framework *ProDC* startet und folgendermaßen vorgeht:

⁴ Eine Oberfläche, mittels derer ein Anwender schrittweise durch Dialoge für eine ergonomische Dateneingabe geführt wird.

1. Auswahl des Rechenzentrumstyps „*Energieeffizientes Rechenzentrum*“
 - a. Energieeffizientes Rechenzentrum
 - b. Hochleistungsrechenzentrum
 - c. Langlebiges Rechenzentrum
2. Auswahl des Existenzstatus „*Neu zu gestaltendes Rechenzentrum*“
 - a. Bestehendes Rechenzentrum
 - b. Neu zu gestaltendes Rechenzentrum
3. Fläche des Rechenzentrums
4. Weitere Parameter
5. Ausgabe / Handlungsempfehlung durch *ProDC* zur Konfiguration eines energieeffizienten Rechenzentrums
 - a. Auswahl der Komponente
 - b. Anordnung der Komponente
 - c. Kennzahlen, die mindestens folgende Werte (z. B. gemäß „Der Blaue Engel“) erfüllen müssen, um ein energieeffizientes Rechenzentrum zu gewährleisten
 - d. Weiteres

Für die Entwicklung des Frameworks kommen gegenwärtige Webtechnologien wie HTML 5, CSS und JavaScript zum Einsatz sowie das von Google entwickelte Front-End-Framework „Materialize“⁵, was klassische Grundsätze von erfolgreichem Design mit zeitgemäßer Innovation und Technologie verbindet. „Materialize“ wurde außerdem im Rahmen dieses Forschungskontextes gewählt, weil es das Programmieren beschleunigt, das Nutzungserlebnis fokussiert und eine simple Benutzung bietet. Diese Aspekte sind für das iterative Entwickeln in einem solchen Forschungsprojekt sehr entscheidend, wenn es insbesondere um die sukzessive Erweiterung einer solch evolutionären Softwareentwicklung als Beitrag in der Wissenschaft geht.

4 Schlussfolgerung und Ausblick

Dass Ansätze zur Effizienzsteigerung in Hinsicht auf das Energieeinsparpotential von Rechenzentren bestehen, geht durch Maßnahmen wie der Vergabe des Zertifikats „Der Blaue Engel“ sowie des Zertifizierungsprozesses selbst und der Bestimmungsmöglichkeiten durch den Power Usage Effectiveness (PUE) hervor. Das mangelnde Interesse solcher Zertifizierungsmaßnahmen jedoch, das auf eine geringe Anzahl eines zweistelligen Betrages der 50.000 Rechenzentren in Deutschland zurückzuführen ist, lässt nahelegen, dass die Präferenz nicht immer auf diesen Aspekt gelegt ist. Experteninterviews zufolge, die unter anderem aussagen, dass ein Konflikt zwischen Nutzen und Energieeffizienz hervorgerufen werden kann, wenn es z. B. um den Einsatz von Supercomputer geht, mit denen das sehr schnelle Abarbeiten, Rechnen oder Generieren von Daten erzielt werden soll, ist ein Beispiel, das diese Annahme

⁵ <http://materializecss.com/>

begründet. Dieser Herausforderung soll mit der Entwicklung eines Empfehlungssystems namens *ProDC* (Preference-oriented Data Centers) nachgegangen werden. Dieses Framework soll präferenzorientierte Handlungsempfehlungen zur Effizienzsteigerung von Rechenzentren ermöglichen und Rechenzentrumsbetreiber somit bei der Konfiguration ihrer Rechenzentren mit ihren individuellen Effizienzpräferenzen zum Ziel verhelfen. Wichtig ist außerdem in der Entwicklung von *ProDC* die Erweiterbarkeitsmöglichkeit, um z. B. innovative Fortschritte in der Hardwareauswahl etc. in diesem Sektor vorbeugend berücksichtigen und diese Daten in das Empfehlungssystem somit künftig schnell einpflegen zu können.

5 Acknowledgements

Diese Arbeit ist im Rahmen des Projektes TEMPRO (Total Energy Management for Professional Data Centers) entstanden. Das Projekt wird mit Mitteln vom BMWi im Rahmen des 6. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung finanziert (Förderkennzeichen: 03ET1418A-H).

Literaturverzeichnis

1. Hintemann, R., Clausen, J.: Rechenzentren in Deutschland: Eine Studie zur Darstellung der wirtschaftlichen Bedeutung und der Wettbewerbssituation, Berkub (2015)
2. Hintemann, R.: Deutliches Wachstum bei deutschen Rechenzentren. Update 2015, Studie zur Entwicklung von Rechenzentren im Jahr 2015, Borderstep Institut, Berlin (2015)
3. Koomey, J. G.: „Worldwide electricity used in data centers“, *Environ. Res. Lett.*, Bd. 3, Nr. 3, S. 034008, (2008)
4. Prakash, S., Baron, Y., Ran, L., Proske, L., Schlosser, A.: “Study on the practical application of the new framework methodology for measuring the environmental impact of ict - cost/benefit analysis,” studie, Brussels: European Commission (2014)
5. Prakash, S., Liu, R., Schischke, K., Stobbe, P.: “Early replacement of notebooks considering environmental impacts,” in *Electronics Goes Green 2012+*. Paschotta, D.: RP-Energie-Lexikon 2017, https://www.energielexikon.info/graue_energie.html (Abgerufen: 22.09.2017) Proceedings. CD-ROM, p. Art. 6360532, 2012.
6. ITWissen, "PUE (power usage effectiveness), PUE-Wert.", <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/power-usage-effectivness-PUE.html> (Accessed: 20.02.2017)
7. Abolhassan, F.: Der Weg zur modernen IT-Fabrik: Industrialisierung – Automatisierung – Optimierung. Springer Fachmedien, Wiesbaden (2013)
8. Pawlik, R.: Cloud and Heat, <https://blog.cloudandheat.com/index.php/de/2017/01/04/wie-aussagekraeftig-ist-pue-als-maszahl-fur-energieeffizienz/> (Abgerufen: 22.09.2017)
9. Sting, T.: “Energieeffizienz im öffentlichen Bereich - Blauer Engel für Betreiber von Rechenzentren.” 2014, <http://www.egovernment-computing.de/blauerengel-fuer-betreiber-von-rechenzentren-a-444734/> (Abgerufen: 30.01.2017)
10. ZDNet, „Gütesiegel für Rechenzentren: der gefallene Blaue Engel“, <http://www.zdnet.de/41559417/guetesiegel-fuer-rechenzentren-der-gefallene-blaue-engel> (Abgerufen: 20.02.2017)

11. Sting, T., und Ehneß, S.: „Energieeffizienz im öffentlichen Bereich - Blauer Engel für Betreiber von Rechenzentren.“ <http://www.egovernment-computing.de/blauerengel-fuer-betreiber-von-rechenzentren-a-444734/> (Abgerufen: 25.09.2017).
12. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Grundsätze zur Vergabe des Umweltzeichens Blauer Engel, <https://www.blauer-engel.de/sites/default/files/pages/downloads/unser-zeichen-fuer-die-umwelt/vergabegrundsaeetze-maerz2011.pdf> (Abgerufen: 20.09.2017)
13. RAL und Umweltbundesamt, <https://www.blauer-engel.de/de/produktwelt/buero/data-center-operation> (Abgerufen: 20.09.2017)
14. Schack, K., Gellrich, A.: Umweltbewusstsein in Deutschland 2014: Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage, Bundesministerium für Umwelt, Natur, Bau und Reaktorsicherheit, S. 58, (2015)
15. RAL und Umweltbundesamt, 1. https://www.blauer-engel.de/sites/default/files/laufzeit_von_vergabegrundlagen.pdf (Abgerufen: 20.09.2017)
16. RAL und Umweltbundesamt, <https://www.blauer-engel.de/de/der-blaue-engel/was-steckt-dahinter/das-verlaessliche-zeichen> (Abgerufen: 20.09.2017)
17. Gizli, V., Marx Gómez, J.: A Framework for Optimizing Energy Efficiency in Data Centers, EnviroInfo 2017, Luxemburg (2017)
18. Wittphal, V.: Neuer Umgang mit Digitalen Daten, Springer Vieweg, S. 13, Berlin (2017)
19. Universität Oldenburg, Very Large Business Applications, „Experteninterview in einem mittelständischen Unternehmen mit einem Rechenzentrum“, Oldenburg (2017)
20. Klahold, A.: Empfehlungssysteme: Recommender Systems - Grundlagen, Konzepte und Lösungen, Springer-Verlag (2009)