

Entwurf umweltfreundlicher Rechenzentren

Wolfgang Rödle
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
wolfgang.roedle@mb.stud.uni-erlangen.de

KURZBESCHREIBUNG

In der vorliegenden Ausarbeitung zum Thema umweltfreundliche Rechenzentren geht es um Ansätze zur Reduzierung des Energieverbrauchs großer verteilter Systeme und Rechnerverbunde. Dabei wird genauer auf das Gebäudedesign am Beispiel des in Lockport (New York) erbauten Yahoo! Compute Coop-Rechenzentrums eingegangen. Die Bauform, die Innenarchitektur, die Ausrichtung und die klimatischen Bedingungen des Standorts sorgen für einen geringeren Energieverbrauch, indem dadurch auf aktive Kühlung (z. B. Lüfter oder Wasserkühlsysteme) verzichtet werden kann. Die Kühlung der Computer erfolgt hierbei fast ausschließlich durch einströmende Außenluft. Das Gebäudedesign von Yahoo! reduziert auch den CO₂-Ausstoß und den Wasserverbrauch bzw. verringert die Abwassermenge, welche bei den mit Wasser gekühlten Anlagen anfällt. Ein weiterer Vorzug des Designs sind die kürzeren Bauzeiten und damit geringeren Baukosten des Rechenzentrums, die durch die Einfachheit und das verbaute Material ermöglicht werden.

Energieersparnis durch Gebäudearchitektur reicht jedoch nicht aus, um ein Rechenzentrum umweltfreundlich zu gestalten. Das GREEN-NET-Framework bietet hier eine Möglichkeit an, zusätzlich Energie durch verbesserte energiegeheure Software-Infrastruktur zu sparen. Der Ansatz versucht Endbenutzern ein Gefühl für den Energieverbrauch ihrer Programme zu verschaffen und zieht diese aktiv in Entscheidungen über Leistung und Energieverbrauch mit ein.

1. EINFÜHRUNG

Da Internetdienste immer mehr Funktionen bereitstellen und immer mehr Benutzer diese in Anspruch nehmen, sei es von einem Desktop-Computer von zu Hause aus oder mit einem Smartphone von unterwegs, werden auch mehr Rechenzentren benötigt, die viel Strom verbrauchen. Der hohe Energieverbrauch kommt u. a. von ineffizienten Kühlsystemen und von betriebsbereiter IT-Ausrüstung, die über längere Zeit ungenutzt bleibt. Die vorliegende Ausarbeitung fasst Möglichkeiten der Stromeinsparung von Rechenzentren zusammen und geht dabei speziell auf die Gebäudearchitektur vom Yahoo!-Compute-Coop-Rechenzentrum sowie auf GREEN-NET ein. Letzteres Framework ermöglicht einerseits, dass Rechenzentren energieeffizienter betrieben werden können, und andererseits deren CO₂-Ausstoß zu verringern, der durch mit Kohleenergie angetriebene Lüfter und Kühlsysteme anfällt. Bei der Gebäudearchitektur wird hauptsächlich der Strom durch Weglassung dieser Lüfter und Kühlsysteme reduziert, wobei auf der Software-Seite bei den Internetdiensten der Strom durch Abschalten von unbenutzten Applika-

tionen und Netzknoten sowie durch direkten Zugriff auf die Hardware, wie CPUs oder Festplatten, realisiert wird.

Im zweiten Kapitel wird das „grüne“ Rechenzentrum von Yahoo! vorgestellt. Dabei wird genauer auf die Thermodynamik und die Kühlmethode der Anlage eingegangen und anschließend Vergleiche zu ähnlichen Rechenzentren von Google und Facebook genannt. Das dritte Kapitel befasst sich mit einem Ansatz für Internetnetze und Clouds, die durch Einbeziehung der Endbenutzer energieeffizienter laufen sollen. Das vierte Kapitel liefert eine Diskussion über die vorgestellten Konzepte. Abschließend fasst das fünfte Kapitel kurz die Möglichkeiten den Stromverbrauch bei Rechenzentren zu reduzieren zusammen.

2. YAHOO! COMPUTE COOP (YCC)

Das YCC-Rechenzentrum wurde aufgrund des Klimas in Lockport errichtet. Dabei handelt es sich um ein Rechenzentrum, dessen Server zu 99 % durch Außenluft gekühlt werden, d. h. es fallen keine bzw. sehr geringe Kosten für die Klimatisierung an. Durch die spezielle Bauweise und die Ausrichtung der einzelnen Gebäude werden thermodynamische Gesetze und die an diesem Standort günstigen Windbedingungen hervorragend ausgenutzt und sorgen dadurch für eine umweltfreundliche und kostenfreie Kühlung („Free Cooling“) der Computer. Neben der Reduzierung vom Stromverbrauch wird auch der Wasserverbrauch im Vergleich zu konventionellen, wassergekühlten Rechenzentren drastisch verringert. Der Wasserverbrauch sinkt gegenüber konventioneller Rechenzentren auf 5 %. Auch der CO₂-Ausstoß, der durch Dieselmotoren angetriebene Lüfter entsteht, wird reduziert, da sich die Anzahl der Lüfter auf ein Minimum beschränkt. Der Standort Lockport ist nicht nur aufgrund seines Klimas geeignet, sondern auch aufgrund der Nähe zu den Niagarafällen, die sich 30 Kilometer westlich der Anlage befinden. Damit kann die IT-Ausrüstung durch nachhaltige Energie betrieben werden. Diese Eigenschaften machen das YCC zu einem umweltfreundlichen, „grünen“ Rechenzentrum. Zusätzlich gewähren die Gebäudearchitektur, das Baumaterial und die Bauweise sowohl kürzere Bauzeiten und somit geringere Baukosten als auch eine kostengünstigere Instandhaltung der Rechenzentren.

Die Designidee des YCC bringt viele Normenüberschreitungen der American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineering (ASHRAE) mit sich und auch Risiken. Experten sind der Meinung, dass die Vorzüge die Risiken bei weitem übersteigen und das Design in Zukunft Standard wird. Yahoo! besitzt bereits viele Patente für das YCC und deren Technologien.

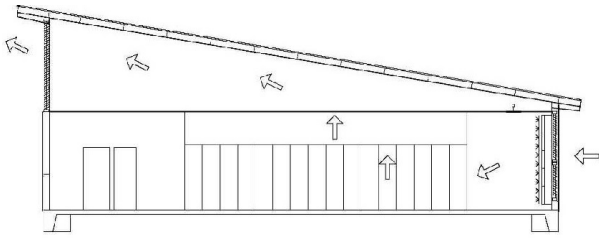


Abbildung 1: Luftstrom bei unklimatisierter Außenluftkühlung [2]

2.1 Kühlmethoden

Das Gebäude nutzt eine Eigenschaft der Thermodynamik aus, welche besagt, dass wärmere Luft aufsteigt und Luftmassen unterschiedlicher Temperatur sich auszugleichen versuchen. Um eine geeignete Architektur zu finden, baute Yahoo! anfangs ein Testlabor in Santa Clara (Kalifornien) [1]. Nachdem dieses sehr gute Ergebnisse lieferte, wurde das Compute-Coop-Projekt im Jahr 2009 gestartet. Die Abbildungen 1, 2 und 3 zeigen die Bauform einer Hälfte des Gebäudes. Im oberen Bereich, dem Dachboden, der einzelnen Gebäude ist ein leerer Raum, der die durch die Server erwärmte Luft aufsteigen lässt. Das Schrägdach sorgt für den Abzug zur Mitte hin, wo sich ein Kamin befindet. An den oberen Wänden des Kamins und der unteren Außenwand des Gebäudes befinden sich Lüftungsschlitze mit Filtersystemen, um die für die Kühlung erforderliche Außenluft einströmen zu lassen und diese von Schmutz- und Staubpartikeln zu befreien. Sensoren liefern Daten über die Windgeschwindigkeit und die Lufttemperatur, die dann an Überwachungsgeräten ausgewertet werden. Anschließend wird mit Hilfe dieser gewonnenen Daten einer der drei möglichen Kühlmodi der Anlage ausgewählt. Zusätzlich wird die Geschwindigkeit der einströmenden Luft durch Dämpfungslüfter geregelt. Damit die Computer die Luft zur Klimatisierung nutzen können, müssen sie in offenen Racks (dt. Regalen) gelagert werden [1, 4]. Das Rechenzentrum wurde großflächig angelegt, sodass eine optimale Raumluftzirkulation gegeben ist. Frühere Forschungen ergaben, dass Temperaturen zwischen 16 und 18 °C optimal für Datenzentren sind. Erfahrungswerte zeigten jedoch, dass Temperaturen von 27 °C vollkommen ausreichend sind [10]. Die drei bereits angesprochenen Kühlmodi werden im Folgenden vorgestellt.

2.1.1 Vollständig unklimateisierte Außenluftkühlung

Bei Temperaturen von 21 °C bis 29,5 °C werden in diesem Modus die Rechner nur durch Außenluft gekühlt. Diese strömt durch Lüftungsschlitze an der äußeren Wand ein und wird dort gesäubert. Durch den leeren Raum im oberen Bereich des Gebäudes steigt die durch die Server erwärmte Luft und wird durch die oben liegenden Lüftungsschlitze wieder nach außen geleitet. Hierbei entsteht kein Overhead, also keine zusätzlichen Stromkosten durch Lüftersysteme.

2.1.2 Vollständig klimatisierte Außenluftkühlung

Bei Temperaturen von 29,5 °C bis 43,5 °C wird die Luft kurz nach dem Einströmen in das Gebäude durch ein wasser-gesättigtes Medium geleitet, um Verdunstungskühlung zu ermöglichen. Durch die Wasserpartikel in der Luft werden

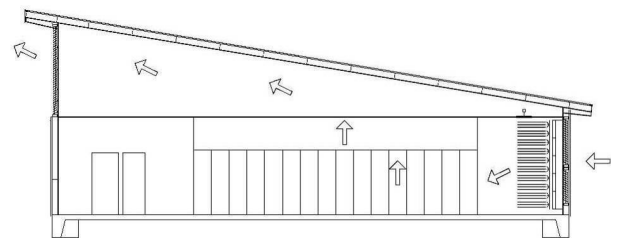


Abbildung 2: Luftstrom bei klimatisierter Außenluftkühlung [2]

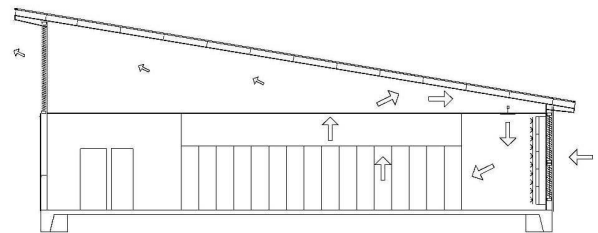


Abbildung 3: Luftstrom bei Außen- und Innenluftkühlung [2]

den Servern zusätzlich Wärme durch Verdunstung entzogen (siehe auch [5]).

Nur knapp neun Tage im Jahr befinden sich die Temperaturen in diesem Bereich und die Anlage benötigt zum Klimatisieren der Rechner diese zusätzliche Verdunstungskühlung. An den restlichen Tagen im Jahr reicht die Außenluft zur Kühlung der Rechner aus.

2.1.3 Gemischte Außenluftkühlung

Im Winter bzw. bei Temperaturen unter 21 °C wird ein Teil der in den oberen, leeren Raum geleiteten Luft wieder nach unten gepumpt und mit der einströmenden Außenluft gemischt, um hohe Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsunterschiede zu verhindern. Dafür werden Ventilatoren an der Decke nahe der Außenwände eingesetzt.

2.2 Vergleich mit anderen Rechenzentren

Tabelle 1 zeigt einen Vergleich von Yahoo!s Rechenzentren. Die Einrichtung in Santa Clara wird mit Wasser gekühlt und braucht damit zusätzlich Platz für die Wasserspeicherung und -leitungen sowie Energie für den Transport des Wassers. Die Anlage in Quincy (Washington) wird auch durch Außenluft gekühlt, hat jedoch nicht die vorteilhafte Bauform des YCC, um die Außenluft ohne viel Bearbeitung, das heißt ohne Ventilatorsysteme, zur Kühlung der Server zu verwenden. Es ist zu erkennen, dass die Anlagen in Lockport und Quincy durch neue Technologien deutliche Energieeinsparungen für die Server, also die IT-Ausrüstung, besitzen. Der Energieverbrauch für die Kühlsysteme wurde bereits bei der Anlage in Quincy durch Ventilatoren statt Wasserkühlung stark verringert. Das YCC senkt diese nochmals um 90%. Die Effizienz ist – auch wenn es sich bei diesen Daten nur um erste Zahlen handelt – sichtbar.

Um ein übersichtliches Maß für den Energieverbrauch und die Effizienz der Rechenzentren zu haben, wird das Maß PUE

	Santa Clara, CA	Quincy, WA	Lockport, NY
Leistungsaufnahme pro Server (W)	257	101	99
Leistungsaufnahme für 25.000 Server ohne Kühlung (kW)	6.438	2.529	2.489
Leistungsaufnahme für die Klimatisierung (kW)	2.285	434	46
Gesamte Leistungsaufnahme für 25.000 Server (kW)	8.722	2.963	2.535

Tabelle 1: Analyse der Energieeffizienz von verschiedenen Rechenzentren von Yahoo! [1]

(Power usage effectiveness, dt. Effektivität der Stromnutzung) eingeführt [1, 11]:

$$PUE = \frac{\text{Gesamter Energieverbrauch der Anlage}}{\text{Energieverbrauch für die IT}}$$

Dieses stellt den gesamten Energieverbrauch der Anlage ins Verhältnis zu dem Energieverbrauch, der ausschließlich durch die IT anfällt. Zum Energieverbrauch der IT zählen u. a. Energieverbräuche von Rechnern, Speichereinheiten und Netzwerken. Der gesamte Energieverbrauch setzt sich aus den Verbräuchen der IT und aus den Energieverbräuchen der Kühlsysteme, Kraftstoffnutzung, Stromverluste und sonstigen Energieverbräuchen zusammen. Aus der Tabelle 2 geht deutlich hervor, dass dieses Verhältnis bei der YCC-Anlage beinahe bei dem Wert 1,0 liegt und somit fast keine zusätzlichen Energiekosten außerhalb der IT anfallen.

Die großen Einsparungen beim Kohlenstoffdioxidausstoß und bei der Energie sind der Tabelle 2 ebenfalls zu entnehmen. Sie zeigt die umweltfreundliche Seite des Gebäudedesigns.

Der PUE-Wert ist aufgrund seiner Neuheit nicht exakt definiert. Die meisten Organisationen wie Yahoo! oder Facebook nehmen in den Gesamtverbrauch nur den gesamten Verbrauch der Anlage auf, berücksichtigen jedoch nicht Verluste im Stromnetz, bei Transformatoren oder bei Generatoren. Wenige Unternehmen nehmen diese Verluste ebenfalls im PUE mit auf. Im Vergleich dazu hat das neue Rechenzentrum von Google einen PUE-Wert von 1,12, jedoch unter Einbezug sämtlicher Verluste. Mit der allgemeineren Rechnung liegt der PUE-Wert mit 1,06 sogar unter dem des Yahoo! Compute Coop [9]. Die vorliegenden Werte der neuen Anlage von Facebook schlagen die Rechenzentren von Yahoo! und Google. Dort wird ein PUE-Wert von bis zu 1,02 angegeben, was somit fast dem Idealwert entspricht. Aktuelle Werte sind mit regelmäßigen Updates unter [12] abzulesen. Sie schwanken um den Wert 1,09.

Das Datenzentrum von Facebook in Prineville funktioniert genau wie das YCC durch Kühlung der Server mit Außenluft und Wasserspritzdüsen für die heißen Tage im Jahr. Für die „open racks“ (dt. offene Computerregale) hat Facebook das „Open Compute Initiative“-Projekt gestartet [3] und sich zu der besonderen Bauform der Racks die zugehörigen Patente gesichert. Zudem kann die Anlage in Prineville Regenwasser

	Santa Clara, CA	Quincy, WA	Lockport, NY
PUE	1,62	1,27	1,08
Relative Energieeinsparung für ein 9-MW-YCC-Gebäude (kWh/Jahr)	26.541.307	12.094.773	-
Durchschnittliche jährliche Kohlenstoffdioxideinsparung (Tonnen CO ₂)	14.863	6.773	-

Tabelle 2: Energie- und Kohlenstoffeinsparung der Rechenzentrumdesigns im Vergleich [1]

aufbereiten, nutzt Solarenergie und leitet die von den Servern ausgestrahlte Wärme in Büroräume, um diese zu heizen [8].

Egal ob Yahoo!, Google, Facebook oder andere Unternehmen, alle Unternehmen, die groß angelegte Rechnersysteme für Internetdienste nutzen, achten auf eine energieeffiziente und umweltfreundliche Gestaltung dieser Anlagen. Dabei werden natürliche Ressourcen, wie Flüsse, Wasserfälle oder Sonnenlicht, herangezogen, um saubere, nachhaltige Energie zu nutzen.

3. GREEN-NET-FRAMEWORK

Energie- und Kohlenstoffdioxideinsparungen durch umweltfreundliche Kühlsysteme reichen im Allgemeinen nicht aus, um den Energieverbrauch bei Rechenzentren zu minimieren und diese als umweltfreundlich und energieeffizient einzustufen. Ein Framework mit dem Namen GREEN-NET bietet die Möglichkeit Energie zu sparen durch das Einbinden des Endbenutzers und dessen Entscheidungen. Das GREEN-NET-Framework zeichnet sich durch einen Top-down-Ansatz, der aus drei Stufen besteht, aus. Zunächst soll der Endbenutzer ein Gefühl für den Energieverbrauch der von ihm benutzten Internetleistungen bekommen. Dabei werden Informationen zu den Energieverbräuchen seiner Programme gesammelt und graphisch dargestellt. In der zweiten Stufe soll der Endbenutzer in Entscheidungen zur Reduzierung von Energieverbrauch mit einbezogen werden, wodurch Applikationen und Rechenknoten, die unbenutzt aktiv laufen, abgeschaltet werden. Zudem soll die Hardwareleistung reduziert werden, was hauptsächlich Taktfrequenzen von CPUs und Umdrehungszahlen von Festplatten betrifft. Dabei muss stets ein Kompromiss zwischen Energiereduzierung („grüner Ansatz“) und der Leistung („Performance-Ansatz“) gefunden werden. Da der Endbenutzer diese Entscheidung am ehesten Treffen kann und sollte, wird er im GREEN-NET-Framework mit einbezogen. Die dritte Stufe umschließt die Unterstützung für das automatische Abschalten unbenutzter Netzwerkknoten. Für das Sammeln der Informationen, das Präsentieren der ausgewerteten Daten und die Unterstützung automatisierter Energiereduzierung, werden eigene Tools und Bibliotheken zur Verfügung gestellt. Da es sich hierbei um ein Forschungsgebiet handelt, muss die reale Welt, welche die Endbenutzer mit ihren Entscheidungen umfasst, simuliert werden. Hierfür werden mögliche Entscheidungsrichtungen implementiert, die die Benutzer allgemein treffen können. In den Richtlinien des GREEN-NET-Frameworks sind sechs Abstufungen zwischen Leistung („user“) und maximaler Energieersparnis unter Ein-

haltung gegebener Fristen („deadlined“) vorgesehen.

3.1 Informieren des Endbenutzers

Um den Endbenutzer in Energiesparentscheidungen mit einzubeziehen, muss der Benutzer in erster Linie über den Energieverbrauch seiner Applikationen informiert werden. Dafür bietet zum Beispiel Google das sogenannte PowerMeter an oder Microsoft die Hohm-Cloud-Anwendung [13]. Zusätzlich zum Stromverbrauch kann sogar die Kohlenstoffdioxidemission aufgrund des Energiegemisches des Wohnorts errechnet werden. Es verschafft dem Benutzer ein Gefühl darüber, wie umweltschonend oder -verschmutzend dessen elektrische Geräte betrieben werden. Beide Strommessgeräte beziehen sich jedoch auf ein komplettes Gerät, wie zum Beispiel eine Heizung, Beleuchtung oder einen Computer und nicht auf einzelne Programme. Es müssen auch Daten über den Energieverbrauch der Endbenutzer über Monate und sogar Jahre hinweg gesammelt werden, um den Verlauf und die Entwicklung darzustellen. Das datenschutzrechtliche Problem wird an dieser Stelle offengelegt. Erst nach dem Sammeln und Analysieren können die Strommesser dem Benutzer Vorschläge zum Energieverbrauch liefern.

Die für das hier beschriebene GREEN-NET-Framework benutzte Messmethode misst den Verbrauch eines ganzen Computers in Testlaboren, die ein Rechenzentrum simulieren. Das HAMEG HM8115-2 ist ein Leistungsmesser, der verschiedene Informationen, wie Schein-, Wirk- und Blindleistung und Phase messen kann [14]. Neben dem HAMEG-Leistungsmesser wird noch die Omegawatt box von Omega-Watt für Messungen von Knoten herangezogen. Das Messgerät wird für 162 Knoten verwendet, was dazu dient, den Energieverbrauch verschiedener Knoten zu messen.

Um die gesammelten Daten über den Energieverbrauch einzelner Computer und Internetknoten zu vereinen, wurde eine große Bibliothek implementiert.

Nach Auswertung der gesammelten Daten müssen die Ergebnisse den Endbenutzern zur Verfügung gestellt werden. Dafür gibt es die Möglichkeit die Ergebnisse auf eine Webseite oder mit Hilfe von Internetdiensten dem Benutzer zur Verfügung zu stellen. Die Webseiten werden mit Hilfe des RRDtool-Programms verwendet, um den zeitlichen Verlauf des Energieverbrauchs der Knoten, auf die die Applikationen des Benutzers zugreifen, graphisch darstellen zu können. Dabei werden keine weiteren Informationen über die Nutzung der Programme mitgeliefert. Die zweite Möglichkeit den Energieverbrauch über einen Internetdienst abzufragen, besteht darin einen genauen Zeitraum zu nennen, in dem die Programme auf einen bestimmten Knoten zugreifen.

3.2 Einbezug des Endbenutzers

Bei dem vorgestellten GREEN-NET-Framework besitzen die Endbenutzer zwei Möglichkeiten in den Energieverbrauch aktiv einzugreifen.

- Zum einen können sie explizit angeben, welche Teile der Hardware abgeschaltet werden können, da sie für die derzeit laufende Programme weniger relevant sind. Dies bezieht sich rein auf ihre Applikationen. Hierfür muss der Benutzer bei jedem Aufruf eines neuen Programms erneut entscheiden, welche Teile der Hardware abgeschaltet werden können bzw. wie viel Leistung von den jeweiligen Geräten vonnöten ist. Dafür muss

der Benutzer genaue Kenntnisse über sein Programm besitzen.

- Die zweite Möglichkeit besteht darin, dass die Endbenutzer der Middleware ein Verhalten vorgeben. Damit nehmen sie Einfluss auf das ganze System und u. a. auch auf Knoten, die komplett abgeschaltet werden können. Das Verhalten schwankt zwischen Energiesparen und hoher Leistung. Bei dieser Möglichkeit muss der Benutzer nicht genau die Hardwarevoraussetzungen seiner Programme kennen.

Je nachdem, wie sich die Benutzer entscheiden, muss die Hardware den Wünschen der Benutzer nach Leistung oder Energieeffizienz eingestellt werden. Dafür gibt es ein Ressourcen- und Auftragsverwaltungssystem (Ressource and Job Management System (RJMS)), das für dieses Framework dynamisch angepasst werden musste – das sogenannte OAR.

Das OAR kann je nach Einstellung bzw. Wunsch des Endbenutzers die Drehzahl der Festplatte und die Taktfrequenz der Prozessoren steuern. Damit können die Benutzer direkt Einfluss auf die Hardware und damit auf den Energieverbrauch der Computer nehmen. Da es sich bei OAR um eine quelloffene Software handelt, sind weitere Entwicklungen, wie das Abschalten von Netzwerkknoten, noch in der Entwicklung.

An dieser Stelle werden bei den Laborversuchen die Entscheidungen der Benutzer über den Kompromiss zwischen hoher Leistung und Energieersparnis durch die oben genannte GREEN-NET-Strategie simuliert. Je nach Modus werden die CPU-Taktfrequenz und/oder die Festplattendrehzahl verringert. Die Skalierbarkeit für weitere Elemente befindet sich auch hier noch in der Erforschung.

3.3 Mechanismus zur automatisierten Sicherstellung von Energiegewahrheit

Der Mechanismus zur automatisierten Sicherstellung von Energiegewahrheit umschließt das automatische Abschalten von Netzknoten oder sogar Computern, die gerade nicht gebraucht werden. An dieser Stelle wird wieder das OAR herangezogen, das diese Funktion automatisch ermöglicht.

3.3.1 Energiereduzierung und Leistungsverluste

Um Leistung und Energieverbrauch gegeneinander abzuwägen, werden zwei Verwaltungsmodi für die anfallenden Aufträge bereitgestellt. Zum einen wird ein Standard-Verwaltungsmodus verwendet, d. h. volle Leistung auch im unbenutzten Zustand, und zum anderen ein stromsparender „grüner“ Verwaltungsmodus, welcher unbenutzte Knoten selbstständig abschaltet und bei Allokationen wieder einschaltet. Beide Verwaltungsmodi wurden bei 50,32% Systemauslastung (Abbildung 5) und bei 89,62% Systemauslastung (Abbildung 6) gemessen und verglichen.

Die Abbildungen beschreiben den zeitlichen Verlauf des momentanen Leistungsverbrauchs. Die rote Linie entspricht dem normalen Verwaltungssystem, das durch aktiven Betrieb aller Knoten einen konstanten Verlauf hat. Am Graphen für das grüne Verwaltungssystem, der schwarz eingezeichnet ist, kann man die Ein- und Ausschaltvorgänge der Rechenknoten erkennen. Die Fläche unterhalb der Graphen beschreibt den Energieverbrauch.

In den beiden Abbildungen ist die Energieersparnis des grünen Verwaltungsmodus deutlich zu erkennen. Die hohen

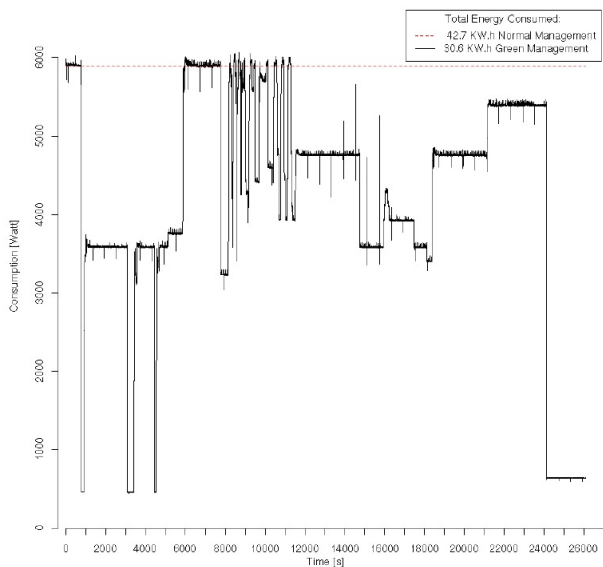


Abbildung 4: Energieverbrauch über die Zeit bei 50,32 % Systemauslastung

Werte am Anfang des Graphen in Abbildung 4 kommen vom Hochfahren aller Knoten vor der Messung. Tabelle 3 stellt die Ergebnisse der Messungen übersichtlich dar. In beiden Fällen ist durch den grünen Verwaltungsmodus ein Energiegewinn abzulesen. Ein Viertel des normalen Energieverbrauchs kann bei 50,32 % der Systemauslastung gespart werden. Im Falle der höheren Systemauslastung ist dieser geringer, da es weniger Zeitfenster gibt, in denen Knoten unbenutzt und damit abschaltbar sind. Jedoch entstehen durch das ständige Ein- und Ausschalten der Knoten extrem hohe Wartezeiten für die Aufträge. Die durchschnittliche Wartezeit mit grünem Verwaltungsmodus bei halber Systemauslastung beträgt knapp 14 Minuten. An dieser Stelle bleibt zu konstatieren, dass das Leistungsvermögen stark unter der Energieersparnis leidet.

3.3.2 Vorhersagen

Um das Problem des Overheads (dt. Mehraufwand) bezogen auf die Wartezeit beim Ein- und Ausschalten der Netzknoten zu verbessern, bieten sich Vorhersagen an, mit deren Hilfe vorausschauend Knoten aktiviert und deaktiviert werden sollen. Dadurch kann einerseits Energie gespart werden und andererseits die Leistung nur marginal beeinflusst werden; im besten Fall bleibt diese gänzlich unbeeinflusst. Hierfür werden u. a. auch Schlupfzeiten (engl. slack times) berechnet und ausgenutzt.

Die Schlupfzeit ist die Zeit zwischen dem voraussichtlichen Terminationszeitpunkt und der Deadline eines Arbeitsauftrags (siehe Abbildung 5) [15]. Sie beschreibt den Spielraum der Bearbeitung und damit die Dringlichkeit des Auftrags. Bei Unterbrechungen z. B. durch Interrupts wird die Fertigstellung des Auftrags verzögert, wodurch sich der Schlupf verringert.

Durch Vorhersagen werden deutlich bessere Ergebnisse im Wettstreit zwischen Energiereduzierung und Leistungsausbeute erzielt.

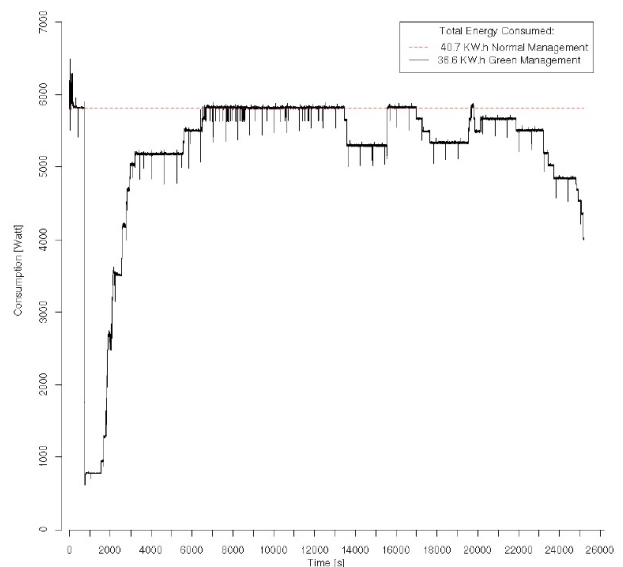


Abbildung 5: Energieverbrauch über die Zeit bei 89,62 % Systemauslastung

4. DISKUSSION

Die guten PUE-Werte des YCC sind aus der Tabelle 2 abzulesen, jedoch ist anzumerken, dass das mit Wasser gekühlte Rechenzentrum von Google gleichwertige Zahlen liefert. Es ist also nicht erforderlich das Design von YCC für ein Rechenzentrum heranzuziehen. Auch mit konventionellen, wassergekühlten Anlagen kann das Rechenzentrum durch niedrige PUE-Werte und Wiederverwendung des Wassers umweltfreundlich sein.

Die Kühlmethode des YCC funktioniert nur mit offenen Racks, da sonst das Kühlmittel, also die Luft, nicht die Server erreichen kann. Auch wenn diese Racks immer mehr zu einem Standard werden, sind geschlossene Racks z. B. zum Mieten von Servern nötig, die in solchen Rechenanlagen ohne zusätzlichen Aufwand für die Kühlung nicht eingesetzt werden können.

Wie in [10] beschrieben, liegt die optimale Außenlufttemperatur für die Kühlung der Server bei 27 °C. Lockport bietet sich somit nicht als Standort an, da die Temperaturen nur im Juli durchschnittlich bei den optimalen Werten liegen [16]. Im restlichen Jahr ist es deutlich kühler, sodass die Anlage im dritten Kühlmodus betrieben werden muss, d. h. mit Ventilatoren für die Mischung der kalten Außenluft mit der bereits erwärmten Innenluft. Ein wärmeres, maritimes Klima, wie z. B. in San Diego, ist als Standort für ein Rechenzentrum nach dem Design des YCC vorzuziehen.

Beim GREEN-NET-Framework setzen die Entwickler auf das Verständnis und Wissen der Endbenutzer über ihre Software- und Hardwarekomponenten. Das ist jedoch für die Benutzung der Geräte nicht vonnöten und somit bei den wenigsten Nutzern vorhanden. Die RJMS-Tools müssen die Benutzer zudem über Spezifikationen der Komponenten informieren bzw. ihnen Vorschläge zur Energiereduzierung liefern. Dies kostet zusätzlich Energie, was weitere Evaluationen erforderlich macht.

Des Weiteren können die Endbenutzer zwischen Leistung und Energieersparnis wählen. Bei dieser Entscheidung werden die meisten Endbenutzer die deutlich kürzeren Wartezeiten

Modus	Normal	Grün	Normal	Grün
Systemauslastung	50,32		89,62	
Anzahl der Aufträge	309		188	
Gesamter Energieverbrauch (kWh)	42,7	30,6	40,7	36,6
Durchschnittlicher Energieverbrauch (kWh)	5,9	4,2	5,8	5,2
Wartezeit der Aufträge im Durchschnitt (s)	8	829	1	218

Tabelle 3: Gesamter Energieverbrauch und Wartezeiten vom normalen und grünen Verwaltungsmodus [1]

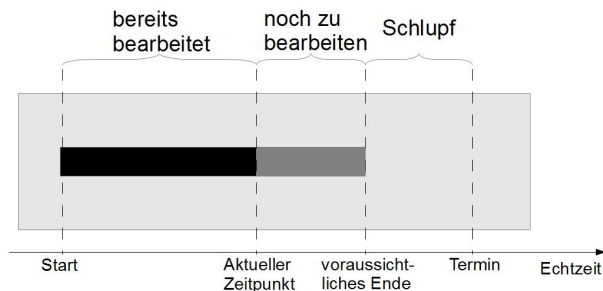


Abbildung 6: Schlupf

(siehe Tabelle 3) und somit die Leistung der Energieersparnis vorziehen. Die hohen Leistungsverluste für größere Stromkostensparnisse des Endbenutzers und Rechenzentrums sind die Hauptkritikpunkte bei dem vorgestellten Ansatz. Vorhersagen über Ressourcenallokationen sind deshalb unerlässlich, wenn sich dieser Ansatz bei den Endbenutzern durchsetzen soll.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Diese Ausarbeitung zeigt Ansätze, die dazu dienen Rechenzentren umweltfreundlicher und energieeffizienter zu gestalten. Das Gebäudedesign von Yahoo! für Rechenzentren hat sich profiliert. Ein PUE-Wert von bis 1,08, 40% weniger Energieverbrauch für die gesamte Anlage und ein 95% geringerer Wasserverbrauch im Vergleich zu konventionellen Anlagen sind deutliche Indikatoren, die für eine Umstellung auf die neue Architektur von Rechenzentren sprechen [6, 7]. Nicht nur bei Yahoo!, sondern auch bei anderen Unternehmen wie Google und Facebook, ist diese Architektur für eine nahezu kostenlose Klimatisierung der Rechner heute aktiv im Einsatz und höchster Stand der Technik von Kühlsystemen in Rechenzentren.

Das vorgestellte GREEN-NET-Framework bietet eine Möglichkeit, Energie durch Einwirken auf die Hardware zu sparen. Dabei werden Netzwerknoten abgeschaltet, Drehzahlen von Festplatten und Taktfrequenzen von Prozessoren individuell eingestellt. Dieser grüne Ansatz zur Energiereduzierung geht jedoch stark auf Kosten der Leistung. Hier sind weitere Entwicklungen nötig und genauere Messdaten über den Stromverbrauch von einzelnen Programmen erforderlich. Auch die individuelle Einstellbarkeit der Hardware benötigt weitere Forschung und Entwicklung. Grundsätzlich ist zu

sagen, dass allein das Informieren des Benutzers ein energiebewussteres Verhalten schafft und womöglich den Verbrauch indirekt in Rechenzentren und zu Hause senkt.

6. LITERATUR

- [1] Da Costa, G., Dias De Assuncao, M., Gelas, J.P., Georgious, Y., Lefevre, L., Orgerie, A.C, Pierson, J.M., Richard, O, Sayah, A. Multi-facet approach to reduce energy consumption in clouds and grids: The GREEN-NET framework In: ACM/IEEE International Conference on Energy-Efficient Computing and Networking (e-Energy), pp. 95-104. ACM, 2010.
- [2] Bob Lytle, Chris Page. Yahoo! Compute Coop (YCC): A next-generation passive cooling design for data centers, Juli 2011.
- [3] Mark Hachman. Facebook launches 'open compute initiative' servers, Juli 2011. <http://www.pcmag.com/article2/0,2817,2383257,00.asp>
- [4] Open Racks. Triple racks for servers, 2011. <http://www.opencompute.org/wp/wp-content/uploads/2011/07/DataCenter-Mechanical-Specifications.pdf>
- [5] Jay Park. Data center design director, Juli 2011. http://regmedia.co.uk/2011/04/07/facebook_open_compute_triple_rack.jpg
- [6] Richard L. Brandt. Four companies that went green, Januar 2013. http://www.greencomputingreport.com/gcr/2013-01-04/four_companies_that_went_green.html?page=2
- [7] Rich Miller. Inside the Yahoo Computing Coop, September 2010. <http://www.datacenterknowledge.com/archives/2010/09/20/inside-the-yahoo-computing-coop/>
- [8] Facebook. Press release: Facebook opens first data center in Prineville, Oregon, April 2011. <https://www.facebook.com/notes/prineville-data-center/press-release-facebook-opens-first-data-center-in-prineville-oregon/10150150581753133>
- [9] Google. Effizienz: So machen wir das, 2013. <http://www.google.com/about/datacenters/efficiency/internal/>
- [10] Jürgen Kleinöder, Vorlesung zu energieeffizienten Datenzentren, Erlangen, 2013.
- [11] Margarete Rouse. Power Usage Effectiveness (PUE), April 2009. <http://searchdatacenter.techtarget.com/definition/power-usage-effectiveness-PUE>
- [12] Facebook. Prineville, OR data center, 2013. <https://www.fbpuewue.com/prineville>
- [13] Werner Pluta. Microsoft Hohm hilft beim Stromsparen, Juni 2009. <http://www.golem.de/0906/67997.html>
- [14] Hameg. Leistungsmessgerät, Juli 2013. <http://www.hameg.com/1.147.0.html>
- [15] Fabian Scheler, Wolfgang Schröder-Preikschat, Real-time systems, 2012. https://www4.cs.fau.de/Lehre/WS12/V_EZS/Vorlesung/
- [16] u.s. climate data. Climate of Lockport, NY, 2013. <http://www.usclimatedata.com/climate.php?location=USNY0827>