

Auf dem Weg zu einem ganzheitlichen, quantitativen Bewertungsansatz für Energiemonitoring-Systeme in Rechenzentren

Björn Schödwell, Gregor Drenkelfort, Koray Ereğ, Rüdiger Zarnekow, Frank Behrendt

Fachgebiet für Informations- und Kommunikationsmanagement & Fachgebiet für
Energieverfahrenstechnik und Umwandlungstechniken regenerativer Energien

Technische Universität Berlin

Straße des 17.Juni,

10623 Berlin

b.schoedwell@tu-berlin.de

g.drenkelfort@tu-berlin.de

koray.erek@tu-berlin.de

ruediger.zarnekow@tu-berlin.de

frank.behrendt@tu-berlin.de

Abstract: Kontinuierlich steigende Energiepreise und Leistungsdichten sowie der Druck, ökologisch verantwortungsvoll zu agieren, verstärken die Bemühungen der Betreiber von Rechenzentren, neben der Performanz, Kapazität und Verfügbarkeit technischer Anlagen auch die energetischen Prozesse zu überwachen. Bisher setzen die Betreiber das Energiemonitoring in variierender Güte um und schränken so die Chancen ein, energetische Optimierungspotentiale zu erschließen. Oftmals fehlen der technische Hintergrund und das Wissen über die messtechnischen Möglichkeiten. Zugleich finden sich in der Literatur keine quantitativen Ansätze zur ganzheitlichen Bewertung des Status Quo. Daher werden in diesem Beitrag ausgehend von den funktionalen Systemen in Rechenzentren Teilbereiche des Energiemonitorings identifiziert, Anforderungen und Bewertungskriterien für ein integriertes Energiemonitoring-System abgeleitet und für die Bewertungskriterien qualitative Abstufungen vorgeschlagen. Darauf beruhend wird ein erster Ansatz zur ganzheitlichen, quantitativen Beurteilung von Energiemonitoring-Systemen entwickelt und exemplarisch auf die Anforderung zur vollständigen Datenerhebung angewendet. Der Beitrag bietet Betreibern somit Hilfestellung bei der Planung, Umsetzung und Bewertung eines Energiemonitoring-Systems.

1 Hintergrund und Motivation

Die stetig steigende Nachfrage nach Rechen-, Speicher- und Übertragungsleistung von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) führt seit der letzten Dekade in Rechenzentren (RZ) zu einem wachsenden Gerätebestand und Energiebedarf [EP07, Sc07, Ko08, IZ08, St09, Ma11, Ko11]. Zugleich erhöht die anhaltende Miniaturisierung und Parallelisierung die elektrische Leistungsaufnahme der IKT und sorgt zusammen mit begrenzten Flächen für zunehmende Leistungsdichten [AS05, Be06, Ko09]. Das Ergebnis sind kapazitive Lieferengpässe auf Seiten der Stromversorger und Probleme bei

der Wärmeabfuhr bei Betreibern durch lokal hochkonzentrierte Wärmeemissionen (Hot Spots). Weiterhin sorgt der wachsende Strombedarf in Verbindung mit ansteigenden Energiepreisen für einen zunehmenden Anteil der Stromkosten an den „Total Cost of Ownership“ (TCO) [Sc06, Be07, Ko09]. Dies sowie die ökologische Notwendigkeit den Kohlenstoffdioxidausstoß (CO₂) zu reduzieren, verstärken zusehends die Bemühungen der Betreiber, die Energieeffizienz der RZ zu erhöhen [EC08, Er09].

Vor diesem Hintergrund untersucht die Technische Universität Berlin (TUB) in den vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) geförderten Projekten „Green Government Cloud Laboratories“ (GGC-Lab) [Re11] und „GreenIT Cockpit“, unter Anderem inwiefern in den beteiligten RZ bereits Energiemonitoring-Systeme (EMS) in RZ eingesetzt werden, um die energetischen Betriebsabläufe zu optimieren. Bei der Erhebung des Istzustandes zeigte sich, dass in Bezug auf die Anwendung von EMS zum Teil ein großer Nachholbedarf besteht. Vor allem bei der Vollständigkeit der Datenerhebung bestehen große Qualitätsunterschiede, die die Chancen zur Aufdeckung von Optimierungspotentialen stark einschränken können. Ursachen sind die mangelnde Kenntnis über die energetischen Prozesse im RZ und die messtechnischen Möglichkeiten zur Überwachung derselben. Zudem fehlen praktikable Ansätze, um die Güte eines EMS ganzheitlich, quantitativ zu bewerten. Ziel des Beitrags ist ausgehend vom funktionalen Aufbau der RZ auf Basis der Literatur und Projekterfahrung (konzeptionell-deduktiv):

- a) energetisch relevante Teilbereiche des operativen RZ-Betriebs zu identifizieren,
- b) Anforderungen und Bewertungskriterien für EMS in RZ vorzuschlagen,
- c) für die Bewertungskriterien verschiedene Qualitätsstufen abzuleiten und
- d) eine ganzheitliche, quantitative Bewertungsmethode zu entwickeln.

Für die Betreiber von RZ bietet der Beitrag Hilfestellung bei der Planung, Umsetzung und Bewertung von EMS. Zudem zeigen die Autoren, wie die Nutzwertanalyse als praktikables Instrument zur Lösung einer RZ-spezifischen Management-Fragestellung, hier am Beispiel der quantitativen Bewertung eines EMS, angewendet werden kann.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

2.1 Funktionale Systeme in Rechenzentren

In der Literatur finden sich Definitionen und Klassifikationen von RZ nach rein qualitativen [Al04, Fi07, IZ08] und nach qualitativen und quantitativen Kriterien [Ts04, Tu08, EP07]. [EP07] beschreibt RZ als Einrichtungen, die elektrische Geräte für die Speicherung und Verarbeitung digitaler Daten und zur Kommunikation beherbergen. [Al04] versteht RZ als Räume, die ausschließlich der Verarbeitung elektronischer Daten dienen und in denen kontinuierlich vorgegebene klimatische Bedingungen eingehalten werden müssen, wohingegen [IZ08] allgemein die Fähigkeit fordert, Daten in großen Mengen, sicher, dauerhaft und zentral verarbeiten zu können. Aufgrund der Unstimmigkeiten im Terminus wird ein RZ für diesen Beitrag wie folgt definiert:

Ein RZ ist eine in sich geschlossene Einrichtung, die zentralisierte IKT und ergänzende Infrastruktur beherbergt, um die dauerhafte, zuverlässige Berechnung, Speicherung und Übertragung großer Mengen digitaler Daten zu ermöglichen.

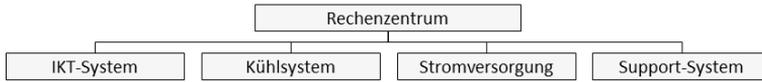


Abbildung 1: Funktionale Bereiche eines RZ

Abbildung 1 veranschaulicht die funktionalen Systeme eines RZ. Üblicherweise werden IKT, Stromversorgung, Kühl- und Support-System (Sonstiges) unterschieden.

Die **IKT** erbringt RZ-spezifische Dienstleistungen und umfasst im engeren Sinne Server, externe Datenspeicher sowie Netzwerk- und Kommunikationstechnik. Im weiteren Sinne zählen auch Rechner, Terminals, Drucker und Management-Komponenten dazu, die der Administration, Überwachung und Steuerung der technischen Betriebsabläufe dienen. Die IKT nutzt meist 50-80 % des Stroms [IZ08], wobei Server gemeinhin den größten Anteil beanspruchen. Energetische Optimierungspotentiale bieten der Einsatz effizienter IKT, erhöhte Auslastung durch Konsolidierung und Virtualisierung, Power Management und dynamisches Lastmanagement [EP07, Sc07, Ne10].

Kühlsysteme in RZ schützen die elektrischen Anlagen vor Überhitzung [VD94, AS08]. Sie umfassen Kälteanlagen, Rück-/Freikühler, Pumpen und Ventile, Umluftklima- (ULK) und Splitgeräte sowie zusätzliche Komponenten wie Ent-/Befeuchter oder in Racks installierte Ventilatoren und Wärmetauscher. Beispiele finden sich in [AS05, AS11a, AS11b, B111, Pa08]. In der Regel bedürfen Kühlsysteme 10-50 % des Stroms [IZ08], wobei die Kälteanlagen in der Regel den Großteil verursachen. Möglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz ergeben sich durch eine z.B. mit modularem Aufbau verbesserte Dimensionierung, Komponenten, die ihre Leistung lastvariabel anpassen, eine mit konsequenter Kalt-/Warmgang-Schottung optimierte Luftführung [VD94], die Freie Kühlung [Al04, IZ08] sowie durch die Abwärmenutzung [IZ08].

Zur **Stromversorgung** in RZ gehören Netzanbindungen der Energieversorger, ggfs. eigene Transformatoren, unterbrechungsfreie Stromversorgungen (USV) inklusive der Batterien und Anlagen zur Stromverteilung, die sich in Niederspannungshaupt- und -unterverteilung (NSHV/NSUV) sowie Unterverteilungen in Racks (R-NSUV) gliedern. Die USV sichert empfindliche Verbraucher gegen kurzfristige Netzstörungen ab. Für längere Ausfälle werden Netzersatzanlagen (NEA) vorgehalten. Beispiele finden sich in [Fa07, To08, AS09]. Häufig bewirken die Komponenten 5-20 % des Strombedarfs, wobei die USV-Anlagen den größten Anteil hervorrufen [IZ08]. Die Verluste lassen sich durch effiziente Komponenten, eine mit modularem Aufbau optimierte Dimensionierung sowie Verminderung der Spannungstransformationen reduzieren. Diesbezüglich werden auf Gleichstrom basierende Architekturen diskutiert [To08, Ra10].

Das **Support-System** beinhaltet alle weiteren elektrischen Anlagen im RZ wie z.B. die Mess-, Steuer und Regelungstechnik, Beleuchtung, sowie Anlagen zum Brand- und Gefahrenschutz. Diese Anlagen bedürfen ein bis vier Prozent des Gesamtstroms [IZ08], wobei z.B. Sauerstoffreduktionsanlagen zu höheren Anteilen führen können.

2.2 Status Quo (Energie-)Monitoring in Rechenzentren

Monitoring bezeichnet allgemein Aktivitäten, um mit periodischen Messungen einen Untersuchungsgegenstand zu beobachten, um ggfs. regulierend einzugreifen [Ox12]. In Bezug auf IKT wird häufig auf das Monitoring der Verfügbarkeit und Performanz abgestellt.¹ Messungen dienen der Erhöhung des Geschäftswertes [SK09], sichern die effektive Leistungserstellung [IT11] und bilden mit Soll-/Ist-Vergleichen die Basis zur (Früh-)Erkennung von Gefahren und für jeweilige Ereignisreaktionen [BS09]. Typische Messgrößen sind z.B. Kapazität, Auslastung, Temperatur, Durchsatz und Antwortzeit. Zur Erfassung werden in das Zielsystem integrierte Software-Sensoren (Agenten), eigenständige Hardware-Sensoren oder Hybrid-Sensoren genutzt, die die Messdaten z.B. ethernetbasiert mittels Simple Network Management Protocol (SNMP) oder Windows Management Instrumentation (WMI) an zentrale Monitoring-Komponenten übertragen [BS09]. Neben kommerziellen Produkten (IBM Systems Director, HP Openview, MS Operations Manager etc.) existieren viele Open Source Lösungen (Nagios, MRTG etc.).

In RZ wird neben der IKT ebenso die Verfügbarkeit und Performanz der Gebäudetechnik überwacht. Traditionell betreuen die funktionalen Systeme verschiedene Fachabteilungen oder auch Organisationen [U108]. An Stelle IKT-Verantwortlicher, denen der technische Hintergrund fehlt, beobachten Gebäudemanager die ergänzende Infrastruktur mit der Gebäudeleittechnik (GLT). Diese meist von Infrastruktur-Anbietern gelieferte Software sammelt über verschiedenste Feldbusse (BACnet, CANBus, Modbus etc.) und in Anlagen integrierte bzw. externe Controller (Direct Digital Control (DDC), speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) etc.) Prozessdaten wie z.B. Auslastung, Temperatur, Feuchte, Spannung oder Stromfrequenz [Gr04, BS09]. Die GLT bietet wie auch die IKT-Monitoring-Lösungen visuelle Darstellungen der Messwerte und Funktionen zur Meldung bei Über- und Unterschreitung von definierten Schwellwerten.

Der Fokus auf Verfügbarkeit und Performanz sowie die getrennte Überwachung der funktionalen Systeme führte in RZ in der Vergangenheit zu energetischen Ineffizienzen, so dass Betreiber bestehende Monitoring-Systeme vermehrt um Werkzeuge zur übergreifenden Beobachtung energiebezogener Prozesse ergänzen [Sc09, Th10]. Abstrakt bezeichnet das Energiemonitoring in RZ die „Zusammenführung von IKT- und Energiemanagement unter Einbeziehung weiterer Parameter wie z.B. meteorologische Daten“ [BI08] und ist unter Anderem Basis zur „Steuerung und Optimierung von technischen Anlagen der Stromversorgung“ [BS10]. Zugleich müssen Betreiber bei steigender Leistungsdichte und Dynamik im RZ durch Virtualisierung und Lastmanagement kontinuierlich und flächendeckend Temperaturen in den IKT-Räumen beobachten, um z.B. die ULK lastvariabel zu steuern, die Luftführung zu optimieren und Hot Spots zu beseitigen [Pa03, BS10, Ro11]. Infrastrukturhersteller (APC, Schneider, Raritan etc.) bieten dazu „Data Center Infrastructure Management“ (DCIM) Soft- und Hardware (z.B. „intelligente“ R-NSUV (Steckerleisten) etc.) an, die die Überwachung der Verfügbarkeit, Performanz und des Energiebedarfs der Infrastruktur und der IKT sowie die Temperaturmessungen weitestgehend integrieren [Sc09, Th10].

¹ Als Kernprozess der IT-Governance dient Monitoring auch der kontinuierlichen Überwachung und Steuerung ganzer IT-Organisationen [Co07].

Im Vergleich zur Nutzung getrennter Überwachungssysteme ermöglicht ein integriertes EMS ein die funktionalen Systeme übergreifendes Energiemonitoring. Betreiber können so im Idealfall die installierten Kapazitäten der Stromversorgung und des Kühlsystems besser ausschöpfen, ohne die Verfügbarkeit oder Performanz der IKT negativ zu beeinflussen. Da sich in der Literatur bisher keine allgemeingültige Definition eines EMS für RZ findet, wird der Begriff für diesen Beitrag folgendermaßen definiert:

EMS für RZ umfassen alle Hard- und Software-Komponenten einschließlich ergänzender Messtechnik zur regelmäßigen, systematischen Erfassung und Überwachung sämtlicher energiebezogener Prozesse in den funktionalen Systemen zur Steuerung, Regelung und kontinuierlichen energetischen Optimierung der operativen Betriebsabläufe.

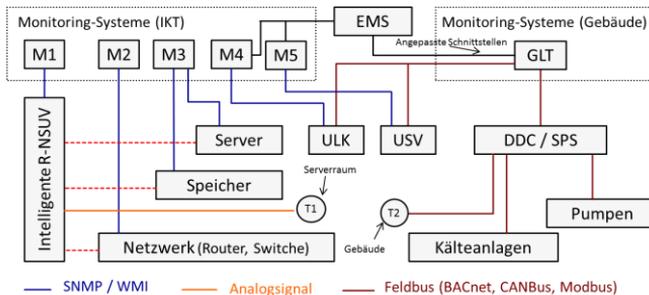


Abbildung 2: Beispielhafte Monitoringlandschaft in Rechenzentren

Abbildung 2 zeigt exemplarisch eine bestehende Monitoring-Landschaft eines RZ, in dem auf bestimmte Aspekte der technischen Betriebsabläufe spezialisierte IKT- und Infrastruktur-Monitoring-Systeme koexistieren. Ein integriertes EMS fungiert hierbei als Querschnittssystem, das die energiebezogenen Messdaten aus den anderen Monitoring-Systemen sowie aus ggfs. zusätzlich installierter Messtechnik bündelt. Aus welchen Systemen bzw. Sensoren und über welche konkreten Schnittstellen das EMS die Daten zusammenführen muss, ist von Fall zu Fall unterschiedlich und hängt maßgeblich von den im RZ bestehenden Lösungen ab. Entscheidend ist, dass alle energetisch relevanten Messgrößen des operativen Betriebs erfasst und ausgewertet werden können.

2.3 Energetisch relevante Messgrößen des operativen RZ-Betriebs

Die **elektrische Energie** stellt die wichtigste Energieform im RZ dar. Messungen des Strombedarfs können für die in Abbildung 3 skizzierten funktionalen Systeme des RZ, einzelne Verbrauchergruppen der funktionalen Systeme, einzelne Verbraucher der Gruppen und ggfs. für Komponenten einzelner Verbraucher erfolgen. Die Anzahl der Verbraucher und daher potentieller Messstellen nimmt von links nach rechts stark zu. Prinzipiell ist für ein umfassendes Energiemonitoring eine vollständige Erfassung des Strombedarfs einzelner Verbraucher sinnvoll. Um den Aufwand zu begrenzen, sollte beim Aufbau eines EMS geprüft werden, welche Daten bereits erhoben und welche einfach und schnell mit hinreichender Genauigkeit durch die Installation zusätzlicher Messtechnik erfasst werden können.

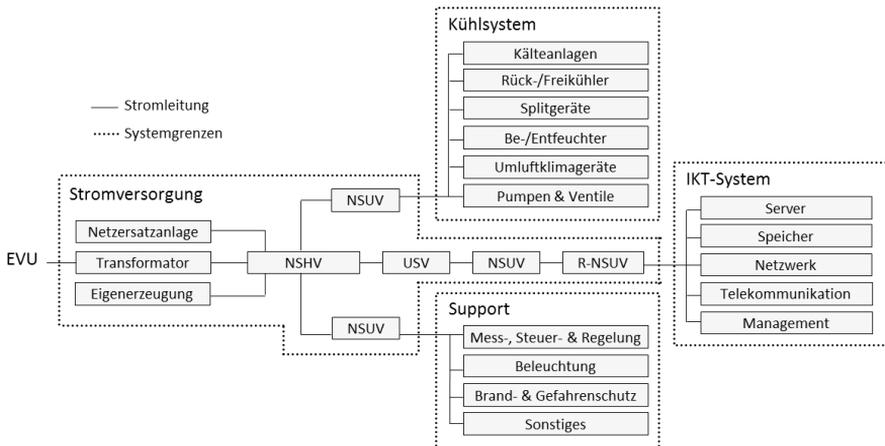


Abbildung 3: Elektrische Verbrauchergruppen im RZ nach funktionalen Systemen

Der Strombedarf der IKT lässt sich bspw. durch „intelligente“ R-NSUV [BI08] oder direkt in die IKT integrierte Sensoren² erfassen. Zudem bieten USV-Anlagen häufig die Möglichkeit, Verlustleistungen über Feldbusse direkt auszulesen. Inwiefern die direkt abgerufenen Messwerte qualitativ genügend sind, hängt von den integrierten Sensoren ab und sollte durch validierende Messungen geprüft werden. Grundsätzlich müssen zur Bestimmung des elektrischen Energiebedarfs Spannung und Stromstärke über die Zeit, bei Wechselstrom zur Bestimmung der Wirkarbeit auch die Phasenverschiebung (Leistungsfaktor, Cosphi) erfasst werden [Tk08]. Weiterhin sollte bei Wechselstrom zur Plausibilitätsprüfung der Scheitelfaktor als Verhältnis aus Scheitelwert (maximale Spannung) und Effektivwert (Mittelwert der Spannung) berücksichtigt werden, da hohe Scheitelfaktoren Messwerte stark verfälschen können [Tk08, AS10].

Kinetische Energie in RZ umfasst primär die Strömungsenergie der Medien, die in den Kühlkreisläufen eingesetzt werden. Sie wird in Volumen- oder Masseströmen angegeben [CW08]. Volumenströme finden sich in IKT-Räumen, in denen Luft mittels Ventilatoren umgewälzt wird, sowie in Kaltwasser- und Rückkühlkreisläufen, in denen Kühlflüssigkeiten durch Rohrleitungen gepumpt werden. Die Ventilatoren und Pumpen nutzen hierbei elektrische Energie, um durch Rotation den flüssigen bzw. gasförmigen Medien die kinetische Energie aufzuprägen. Die Strömungsenergie bzw. der Volumenstrom der Medien ist dabei proportional zur Drehzahl der Anlagen, so dass diese als indirekte Messgrößen herangezogen werden können [CW08]. Drehzahlen von Anlagen der ergänzenden Infrastruktur werden in der Regel über Feldbusse ausgelesen, wohingegen Drehzahlen der Lüfter in IKT-Komponenten z.B. über IPMI erfasst werden können [IP09]. Techniken zur direkten Messung von Volumenströmen finden sich in [AS10].

² Grundlage ist das von Intel, HP, NEC und Dell spezifizierte Intelligent Platform Management Interface (IPMI) [IP09], das Schnittstellen für Hard- und Firmware definiert, um z.B. über den auf dem Mainboard integrierten Baseboard Management Controller (BMC) die Hardware-Komponenten zu warten, zu konfigurieren und über integrierte Sensoren deren Zustände und Vitalfunktionen zu überwachen.

Thermische Energie entsteht im RZ durch Verlustleistungen der elektrischen Anlagen und thermodynamische Wandlungsprozesse der Kälteanlagen, Splittergeräte und Rück-/Freikühler. Temperaturen sind die entscheidenden Messgrößen, da diese in Verbindung mit Volumenströmen der Berechnung von Kälte- bzw. Wärmemengen dienen [CW08].

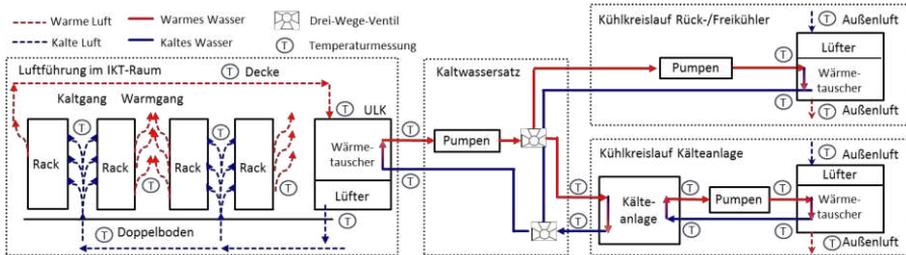


Abbildung 4: Exemplarischer Aufbau eines Kühlsystems im RZ

Abbildung 4 zeigt den Aufbau eines Kühlsystems eines RZ inklusive der Messstellen zur Erfassung von Temperaturen. In den luftgekühlten IKT-Räumen sollten im Kalt- und Warmgang Servereinlass- und -auslasstemperaturen sowie ggfs. Temperaturen in Deckenhöhe und im Doppelboden gemessen werden. Weiterhin sollten für ULK die Abluft- und Zulufttemperatur sowie Vorlauf- und Rücklauftemperatur des Kaltwassersatzes erfasst werden. Da es beim Kältetransport zu Wärmeeinträgen kommen kann, sollten die Vor- und Rücklauftemperaturen des Kaltwassersatzes auch auf Seiten der Kälteanlagen berücksichtigt werden. Ferner dient die Überwachung der Außenlufttemperaturen sowie der Vor- und Rücklauftemperaturen der Rück-/Freikühlkreisläufe der optimierten Steuerung dieser Anlagen. Falls ergänzende Infrastrukturen nicht in IKT-Räumen untergebracht sind und z.B. über Splittergeräte gekühlt werden, sollten auch hier die Temperaturen gemessen werden.

3 Ganzheitlicher, quantitativer Bewertungsansatz

Ausgehend von den bisher diskutierten Aspekten des Energiemonitorings in RZ [En12, SK09, Ri11, Ri12, AS10, BS09, te12] und der daraufhin getroffenen Definition eines integrierten EMS werden zunächst Anforderungen bestimmt, um aus diesen Kriterien zur ganzheitlichen, quantitativen Bewertung eines EMS abzuleiten. Die Anforderungen an ein EMS werden in vollständige Datenerhebung, benutzerfreundliche Analyse und automatische Reaktion kategorisiert. Die Quantifizierung der Güte des EMS folgt der Vorgehensweise multikriterieller Entscheidungsverfahren (engl. Multi Criteria Decision Analysis, MCDA), zu denen die angewendete Form der Nutzwertanalyse zählt [Ru04].

3.1 Anforderungen an ein EMS

Die **Vollständigkeit der Datenerhebung** beschreibt Anforderungen an die Art und Weise, wie und auf welche Daten das EMS zurückgreifen kann. Dazu zählen sowohl die hinreichende örtliche und zeitliche Granularität der Messungen als auch deren Qualität (direkt vs. indirekte Messung) sowie die Möglichkeit bestehende Datenquellen (GLT,

IKT-Monitoring) unabhängig von Datenübertragungsstandards (Datentypen, Protokolle, Feldbusse) zu integrieren. Dabei müssen Aufwand und Nutzen abgewogen werden, so dass energetische Einsparungen finanzielle Aufwände durch zusätzliche Messtechnik übersteigen. Ferner sollte ein EMS den mehrere RZ übergreifenden Einsatz durch eine unbegrenzte Anzahl an Messstellen ermöglichen (Skalierbarkeit) und zudem modular erweiterbar sein, um flexibel an neue Aufgaben angepasst werden zu können.

Die **benutzerfreundliche Analyse** umfasst Anforderungen in Hinblick auf Datenpflege, -zugriff und -präsentation sowie Möglichkeiten zur nutzerspezifischen Konfiguration. Dazu zählen weitestgehender Verzicht auf manuelle Dateneingabe ebenso wie uneingeschränkter, mobiler und plattformunabhängiger Zugriff in Echtzeit via Inter-/Intranet. Zudem sollten EMS Analysen sowohl des Istzustandes durch Visualisierung aktueller Messungen und Berechnungen in hierarchischen, konfigurierbaren Mess-/Kennzahlenstrukturen (Aggregation) als auch der temporären Entwicklungen durch integrierte Verfahren der deskriptiven Statistik und Darstellungen zu Trendverläufen unterstützen. Ferner sollten individuelle Reporte für verschiedene Zielgruppen erstellt werden können.

Anforderungen zur **automatischen Reaktion** beinhalten Fähigkeiten des EMS, aktuelle Störungen und zukünftige Probleme auf Basis von Messungen und definierten Grenzwerten selbstständig, frühzeitig zu erkennen und an Verantwortliche im RZ zu melden bzw. automatisch Maßnahmen zur Problembeseitigung anzustoßen. Dazu sollte das EMS Schnittstellen zur Integration in bestehende Steuerungs- und Regelungssysteme anbieten bzw. unterstützen, um in technische Betriebsabläufe der RZ einzugreifen zu können.

Prinzipiell sollten zur ganzheitlichen Bewertung eines EMS die Anforderungen gleichermaßen berücksichtigt werden. Da ein EMS fortlaufend weiterentwickelt werden muss, können sich Betreiber zur Verbesserung an der Reihenfolge der definierten Kategorien orientieren. Die vollständige Datenerhebung bildet die Basis. Ohne aussagekräftige Messdaten können weder Analysen durchgeführt, noch Probleme automatisch gemeldet bzw. geregelt werden. In den Forschungsprojekten hat sich gezeigt, dass EMS selten auf alle Daten zugreifen können. Daher ist beim Entwurf der Bewertungsmethode in diesem Beitrag im Folgenden der Fokus auf die vollständige Datenerhebung gerichtet.

3.2 Bewertungsschema

Ein quantitatives Bewertungsschema benötigt quantifizierte Kriterien und Vorschriften zur Gewichtung der Kriterien. Der erste Schritt ist, die Anforderungen in Kriterien zu überführen. Die Kriterien sollten dabei die Anforderungen vollständig abbilden, zudem redundanzfrei, verständlich und präferenzunabhängig sein [Ru04].³ Im Rahmen dieses Beitrags werden nur die Anforderungen Granularität der Datenerhebung und die Datenqualität betrachtet. Zur Bewertung der Granularität werden örtliche und zeitliche Granularität als Kriterien eingeführt. Die örtliche Granularität gibt an, welche funktionalen Systeme, Verbrauchergruppen der funktionalen Systeme und Verbraucher

³ Präferenzunabhängigkeit meint, dass die Ausprägung eines Kriteriums die Entscheidung bei einem anderen nicht beeinflusst.

der Gruppen vom EMS erfasst werden. Die zeitliche Granularität beschreibt, in welchen Intervallen gemessen wird. Die Datenqualität beurteilt, wie genau Messwerte sind bzw. ob Daten durch direkte oder indirekte Messungen bestimmt werden.

Nach der Überführung der Anforderungen in Kriterien müssen Ausprägungen derselben bestimmt und diesen jeweils quantitativ Qualitätsstufen zugeordnet werden [Ru04, BB02]. Zur Quantifizierung werden Kardinalskalen eingesetzt. Die Abstufungen der Skalen verstehen sich als erster Vorschlag und basieren auf Projekterfahrung und Ansätzen aus der Literatur [Ri11, Ri12, AS10, BS09, te12]. Ziel der Bewertung ist, Aussagen über die Güte der Datenerhebung sowohl für das gesamte des EMS als auch für einzelne funktionale Systeme zu treffen. Ausgangspunkt sind die für das EMS relevanten Energieformen in den funktionalen Systemen.

Für jede Energieform wird ein Bewertungsbaum aufgestellt, der alle relevanten Datenerhebungspunkte (örtliche Granularität) enthält. Auf der zweiten Stufe eines jeden Baumes folgen die Knoten relevanter funktionaler Systeme. Die nachfolgenden Stufen sind abhängig von der Energieform, wobei sich auf der letzten Stufe eines Baumes die kleinsten, sinnvoll zu erfassenden Einheiten befinden. Bei der elektrischen Energie stellt beispielsweise jeder Knoten der insgesamt vier Stufen (RZ, funktionale Systeme, Verbraucherguppen, Verbraucher) einen eigenen Datenerhebungspunkt dar. Bei der thermischen und kinetischen Energie sind die Wurzel und die zweite Stufe aggregierte Daten aus den Kinderknoten, da es bspw. keinen sinnvollen Temperaturwert für ein ganzes funktionales System bzw. für das gesamte RZ gibt.

Ausgehend von der jeweils letzten Stufe der aufgespannten Bäume werden für jeden Knoten die drei Kriterien anhand der Ausprägungen der Datenerhebung mit demselben Gewichtungsfaktor bewertet.⁴ Der entstehende Vektor enthält den Eigenanteil der Datenerhebung und wird Datenerhebungsvektor genannt. Ab der nächsten Stufe kommt zum Datenerhebungsvektor des Knotens der gewichtete Folgeanteil der Kinderknoten hinzu. Die Kombination aus Datenerhebungsvektor und gewichtetem Folgeanteil bezeichnet den Auswertungsvektor. Die Berechnung der Gesamtbewertung eines Knotens erfolgt durch Multiplikation der Elemente des Auswertungsvektors. Ausgehend von der letzten Stufe können Auswertungsvektoren für jeden Knoten jeder Stufe berechnet werden. Für jeden Knoten lässt sich ausgehend von Knoten der letzten Stufe folgende Berechnungsvorschrift anwenden und anschließend für jeden Knoten der höheren Stufen durchführen:

$$\bar{x}_i = \underbrace{\bar{a}_i \times \mu_i}_{\text{Eigenanteil}} + \underbrace{(1 - \mu_i) \times \sum_{j \in K_i} g_j \times \bar{x}_j}_{\text{Folgeanteil}}$$

$$y_i = \bar{x}_i [0] \times \bar{x}_i [1] \times \bar{x}_i [2]$$

mit:

$$\mu_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{j \in I} \lambda_j}, \text{ bei elektrischer Energie}$$

$\mu_i = 1$, auf letzter Stufe (Messung), sonst 0 bei thermischer und kinetischer Energie

$$\sum_{j \in K_i} g_j = 1$$

⁴ Nur wenn Daten erhoben werden, kann auch eine Bewertung der zeitlichen Güte und Datenqualität erfolgen.

- I Menge der Knoten
- K_i Menge der Kinderknoten des Knoten i
- \vec{a}_i Datenerhebungsvektor des Knoten i
- g_j Gewichtungsfaktor des Knoten j
- \vec{x}_i Auswertungsvektor für Knoten i
- y_i Gesamtwert des Knoten i
- λ_i Stufenwert der Stufe i
- μ_i Stufenfaktor der Stufe i

Bei der elektrischen Energie gelten Besonderheiten: Bevor der Knoten i mit den Kinderknoten bewertet wird, wird geprüft, ob alle Kinderknoten erfasst sind. Wenn ja, gilt der Knoten über die mögliche Aggregation als erfasst, auch wenn er über keinen eigenen Datenerhebungspunkt verfügt. Sind alle Kinderknoten bis auf einen und der Knoten selbst erfasst, so gilt auch der fehlende Kinderknoten über die Möglichkeit zur Differenzrechnung als erfasst. Als Datenerhebungsvektor werden dann vor der Ausführung der Berechnungsvorschrift die gewichteten Werte der anderen Knoten ohne Berücksichtigung des Stufenfaktors eingetragen. Stufenwert und Stufenfaktor dienen bei der elektrischen Energie einer ausgewogenen Gewichtung der Datenerhebungspunkte auf den verschiedenen Stufen des Baums.

Der Eigenanteil der relevanten Knoten kann für jedes Kriterium einen Wert zwischen 0 % und 100 % annehmen und wird durch die jeweilige Ausprägung im Rechenzentrum bestimmt. Tabelle 1 zeigt die Stufen mit den relevanten Datenerhebungspunkten für die jeweilige Energieform und die Werte für den Datenvektor in Abhängigkeit von den vorliegenden Ausprägungen.

Tabelle 1: Bewertung des Eigenanteils der Datenerhebungsknoten

	Elektrische Energie	Thermische Energie	Kinetische Energie
Ort			
Stufen	1. RZ 2. funktionale Systeme 3. Verbrauchergruppen 4. Verbraucher einzeln	1. RZ 2. Luftführung IKT-Raum, Verbrauchergruppen Kühlung (KA, ULK, RK/FK) 3. pro Rackreihen, Verbraucher Kühlung einzeln (KA, ULK, RK/FK) 4. IKT in Racks einzeln	1. RZ 2. IKT, Kühlsystem 3. IKT-Verbrauchergruppen, Verbrauchergruppen Kühlung (Pumpen, ULK, RK/FK) 4. Verbraucher
Datenerhebung	alle Stufen	3. Stufe (KA, ULK, RK/FK) 4. Stufe (Server)	4. Stufe
Ausprägungen	100% falls gemessen, sonst 0%	Luftführung: 100% falls gemessen, sonst 0% KA,ULK,RK/FK: 25% je Temperatur pro Verbraucher	100% falls gemessen, sonst 0%
Zeit			
Kontinuierlich	25-80 %, linear abhängig von Auflösung Intervalls I: $1\text{min} \leq I \leq 60\text{min}$		
Festes Intervall	25-80 %, linear abhängig von Auflösung Intervall I: $1\text{min} \leq I \leq 60\text{min}$		
Sporadisch	0-25 %, linear abhängig von Auflösung Intervalls Intervall I: $1\text{h} < I \leq 24\text{h}$		

Datenqualität			
Direkte Messung*	Abweichung Sensoren 2-4% nach [AS10] 80-95 % bei Messung der Spannung, Stromstärke und Cosphi für alle Phasen linear zur Sensorgenauigkeit weitere 5% bei Messung Scheitelfaktor	Abweichung Sensoren 2,5-0,5°C absolut nach [te12] im Bereich von 0-50°C 90-100 % linear zur Sensorgenauigkeit für IKT-Raum (Gänge, Racks, IKT-Komponenten) 51-100% linear zur Sensorgenauigkeit für ULK/KA/RK/FK	Abweichung Sensoren 1-5% nach [AS10] 90-100% linear zur Sensorgenauigkeit für Luftvolumenströme 51-100 % linear zur Sensorgenauigkeit für Wasservolumenströme
Indirekte Messung	60 % bei gerätespezifischer Kennlinie 25 % bei auslastungsabhängigen, linearen, allgemeinen Profil, das Gerätetyp nicht berücksichtigt.	Temperaturen können nur über Sensoren erfasst werden, daher nicht relevant.	100% bei Lüfterdrehzahlen der IKT.** 60% bei gerätespezifischer Kennlinie aus Motordrehzahl ULK, RK/FK bzw. 40% für Pumpen 25% bei auslastungsabhängigen Profil für ULK, RK/FK bzw. 15% für Pumpen

*auch Sensoren im Gerät; bei diesen konservativ, d.h. niedrigeren Wert ansetzen oder indirekte Datenerhebung annehmen, falls keine Informationen vorliegen.

** Die Messung von Volumenströmen hinter einzelnen IKT-Komponenten ist aufwendig und nicht zweckmäßig, daher wird die Datenerfassung aus internen Sensoren genutzt.

Die Gewichtungsfaktoren bei der thermischen und kinetischen Energie können über die Anzahl der Geschwisterknoten (1/Anzahl) bestimmt werden. Diese Art der Gewichtung ist zur Erfassung elektrischer Energien nur eingeschränkt sinnvoll, da einzelne Verbrauchergruppen bzw. Verbraucher mit unterschiedlichem Leistungsbedarf gleichgestellt werden. Eine bessere Möglichkeit ist die Gewichtung nach tatsächlichem Leistungsbedarf. Dies setzt aber bereits tatsächliche Bedarfsmessungen voraus. Daher ist zunächst auch eine Gewichtung nach der Nennleistung zweckmäßig.

Abbildung 5 zeigt exemplarisch am Beispiel der elektrischen Energie die Bewertung der Datenerhebung durch das EMS. Jeder der Wurzel nähere Knoten repräsentiert ein höheres Aggregationsniveau. Die zweite Stufe repräsentiert die Güte der Datenerhebung in den für die entsprechende Energieform relevanten funktionalen Systemen, die erste Stufe immer für das gesamte RZ. Die Werte der ersten Stufe aller Energieformen können abschließend gewichtet und zu einem einzelnen Kennwert aggregiert werden, der die Güte der gesamten Datenerhebung im RZ durch das EMS beschreibt.

Der Auswertungsvektor steht an jedem Knoten des Baums in der Form „GES[Wert der Messung, Wert der Datenqualität, Wert der zeitlichen Granularität]“ mit GES als Produkt aller Werte von Messung, Datenqualität und zeitlicher Granularität. Vor dem Knoten steht an den Kanten der Gewichtungsfaktor, mit dem der Knoten unter Berücksichtigung der obigen Berechnungsvorschrift in den Elternknoten eingeht.

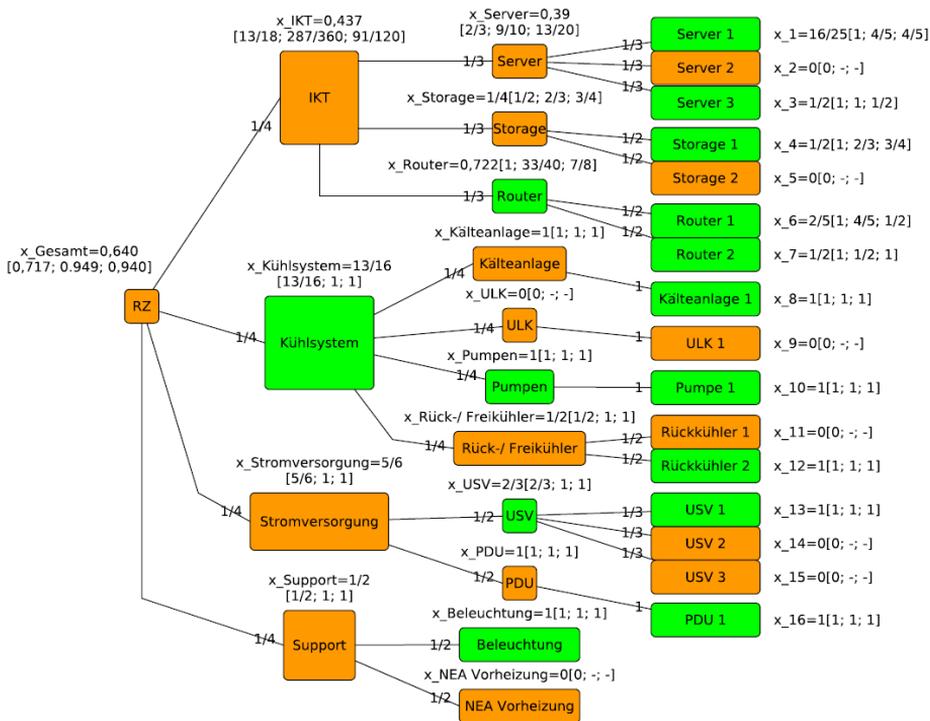


Abbildung 5: Exemplarische Bewertung der Datenerhebung des EMS für elektrische Energie

4 Fazit und Ausblick

Der vorgestellte Ansatz zur Bewertung der Güte eines EMS erfasst in der vorliegenden Form die örtliche und zeitliche Granularität sowie die Qualität der Datenerhebung durch das EMS. Der Ansatz summiert die Bewertung der Einzelbereiche für jede Energieform und liefert Punktwerte für jeden Teilbereich sowie für die gesamte Datenerhebung durch das EMS. Die Gewichtung der elektrischen Energie nach Leistung führt hierbei bei nicht vorhandenen Messwerten wahrscheinlich zur Verwendung von Nennleistungsdaten. Da diese bis zu 40 % über den realen maximalen Verbrauchswerten liegen können [Fa07], birgt der Ansatz die Gefahr einer Fehlgewichtung. Daher ist in Bezug auf die Bewertung der Datenerhebung in Bezug auf die elektrische Energie ein iteratives Vorgehen ratsam:

1. Initiale Gewichtung für die funktionalen Systemen nach typischen Anteilen (IKT 50 %, Kühlsystem 30 %, Stromversorgung 15 %, Support 5 %). Für die Verbrauchergruppen mit Nennleistungsdaten oder über die Anzahl ($1/n$, n als Anzahl der Verbrauchergruppen), für einzelne Verbraucher analog dazu.
2. Anpassung der Gewichtung nach angemessenem Zeitraum nach tatsächlich gemessener Leistungsaufnahme der funktionalen Systeme.

Diese Vorgehensweise geht neutral an die erste Bewertung und führt iterativ zu einer stetigen Verbesserung der Datenerhebung, da durch die Anpassung der Gewichtung über die Zeit sich die Optimierung auf die wesentlichen Stromverbraucher konzentriert.

Neben den in diesem Beitrag bewerteten Kriterien ist für eine ganzheitliche Bewertung eines EMS die Überführung der weiteren, meist qualitativen Anforderungen in Kriterien sowie deren Quantifizierung erforderlich. Qualitative Anforderungen bzw. Kriterien können mit einem Fuzzy-Ansatz quantifiziert werden [Mu95]. Für die Bewertung der Granularität der Qualität der Datenerhebung ist der vorgestellte, sich an der Nutzwertanalyse orientierende Ansatz gut geeignet, da er eine einfache und schnelle Bewertung erlaubt, zur Betrachtung der Wechselwirkungen zwischen Anforderungen bzw. Kriterien hingegen eher nicht [Mu95, Ru04]. Insbesondere bei Kriterien zur benutzerfreundlichen Analyse und zu den Fähigkeiten des EMS zur automatischen Reaktion ist es von Vorteil, Wechselwirkungen im Bewertungssystem abzubilden. Für die Problemstellung dieses Beitrags ist eine Erprobung weiterer MCDA-Methoden daher vielversprechend.

5 Literaturverzeichnis

- [Al04] Altenburger, A.: Energieeffizientes Kühlen von IT-Räumen. BFE, Zürich, 2004.
- [AS05] ASHRAE: Datacom equipment power trends and cooling applications. Atlanta, 2005.
- [AS08] ASHRAE: Environmental Guidelines for Datacom Equipment --- Expanding the recommended environmental envelope. Atlanta, 2008.
- [AS10] ASHRAE: Real-Time Energy Consumption Measurements in Data Centers. Atlanta, 2010.
- [AS11a] ASHRAE: Thermal Guidelines for Data Processing Environments – Expanded Data Center Classes and Usage Guidance. Atlanta, 2011.
- [AS11b] ASHRAE: Thermal Guidelines for Liquid Cooled Data Processing Environments. Atlanta, 2011.
- [BB02] Bamberg, G.: Baur, F.: Statistik. 12. Auflage, Wissenschaftsverlag, Oldenburg, 2002.
- [Be06] Belady, C. L.: Malone, C. G.: Data center power projections to 2014. In: Proc. of 10th Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems. Piscataway: IEEE, 2006; S. 439–444.
- [Be07] Belady, C. L.: In the data center, power and cooling costs more than the IT equipment it supports. In: Electronics Cooling Magazine 13 (1), 2007; S. 24–27.
- [BI08] BITKOM: Energieeffizienz im Rechenzentrum - Ein Leitfaden zur Planung, zur Modernisierung und zum Betrieb von Rechenzentren. Berlin, 2008.
- [BI11] Blough, B. et al.: Qualitative Analysis of Cooling Architecture for Data Centers. The Green Grid, 2011.
- [BS09] BSI: Hochverfügbarkeits-Kompodium - Kapitel 12: Monitoring. Berlin, 2009.
- [BS10] BSI: Green IT - Ein Leitfaden zur Optimierung des Energieverbrauchs des IT-Betriebs. Berlin, 2010.

- [CO12] ITGI: COBIT 5.0 Edition Framework, 2012.
- [CW08] Cerbe, G.; Wilhelms, G: Technische Thermodynamik. HANSER, München, 2008.
- [EC08] European Commission: Code of Conduct on Data Centres Energy Efficiency, 2008.
- [En12] EnergieAgentur.NRW: EMS.marktspiegel, <http://www.energieagentur.nrw.de/tools/emsmarktspiegel/>. Zuletzt aufgerufen am 27.04.2012.
- [EP07] EPA: Report to Congress on Server and Data Center Energy Efficiency, 2007.
- [Er09] Erek, K. et al.: Sustainability in Information Systems: Assessment of Current Practices in IS Organizations. In: Proc. of 15th Americas Conference on Information Systems, 2009.
- [Fa07] Fan, X.; Weber, W.; Barroso, L.: Power provisioning for a warehouse-sized computer. In: ACM SIGARCH Computer Architecture News 35 (2), 2007.
- [Fi07] Fichter, K.: Zukunftsmarkt Energieeffiziente Rechenzentren. Borderstep, Berlin, 2007.
- [Gr04] Gröger, A.: Energiemanagement mit Gebäudeautomationssystemen; Expert, Renningen, 2004.
- [BI08] BITKOM: Energieeffizienz-Analysen in Rechenzentren – Messverfahren und Checkliste zur Durchführung. BITKOM, 2008.
- [IP09] Intel: IPMI Intelligent Platform Management Interface Specification Second Generation v2.0 Document Revision 1.0, 2009.
- [IZ08] Innovationszentrum Energie (IZE) Technische Universität Berlin: Konzeptstudie zur Energie- und Ressourceneffizienz im Betrieb von Rechenzentren. Endbericht, 2008.
- [Ko08] Koomey, J.: Worldwide electricity used in data centers. Environmental Research Letters, vol. 3, no. 034008, 2008.
- [Ko09] Koomey, J. et al.: Assessing trends over time in performance, costs, and energy use for servers. Analytics Press, Oakland, 2009.
- [Ko11] Koomey, J.: Growth in data center electricity use 2005 to 2010. Analytics Press, Oakland, 2011.
- [Li09] Liang, C. et al.: RACNet: A High-Fidelity Data Center Sensing Network. In: Proc. of 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, 2009.
- [Ma11] Masanet, E. et al.: Estimating the Energy Use and Efficiency Potential of U.S. Data Centers. In Proc. of IEEE, vol. 99, no. 8. 2011.
- [Mu95] Munda, G.: Multicriteria Evaluation in a Fuzzy Environment. Physika-Verlag, Heidelberg, 1995.
- [Ox12] Oxford Dictionary. <http://oxforddictionaries.com/>. Zuletzt aufgerufen am 27.04.2012
- [Pa08] Patterson, M. K.; Dave, F.: The State of Data Center Cooling: A review of current air and liquid cooling solutions, Intel, 2008.
- [Ra10] Rasmussen, N.; Spitaels, J.: A Quantitative Comparison of High Efficiency AC vs. DC Power Distribution for Data Centers. APC, 2010.
- [Re94] Reisner, K.: Fachwissen Kältetechnik. 2. Auflage. Verlag C.F. Müller, Heidelberg, 1994.
- [Re11] Repschläger, J. et al.: Konzeption einer Community Cloud für eine ressourceneffiziente IT-Leistungserstellung. In: WS Informatik und Nachhaltigkeitsmanagement, 2011.

- [Ri10] Riegel, G.: Spielerische Suche nach nobelpreisverdächtigen RZ-Effizienzindikatoren, jenseits des PUE. Vortrag am 2.3.10 in Frankfurt/Main.
- [Ri12] Riegel, G.: Umfassendes Energie- und Temperaturcontrolling im Rechenzentrum. Vortrag zur Infrakon am 22.3.12 in Berlin.
- [Ru04] Ruhland, A.: Entscheidungsunterstützung zur Auswahl von Verfahren der Trinkwasseraufbereitung an den Beispielen Arsenentfernung und zentrale Enthärtung. Dissertation. TU Berlin, 2004.
- [te12] testo: Auswahl des richtigen Temperatur-Mess-Systems. Testo AG. www.messbar.de/pdf/s026-027_technik_temperatur.pdf . Zuletzt aufgerufen am 12.05.12.
- [Sc06] Scaramella, J.: Worldwide Server Power and Cooling Expense 2006 - 2010 Forecast, IDC, 2006.
- [Sc07] Schaeppi, B. et al.: Energy efficient servers in Europe: Energy consumption, saving potentials and measures to support market development for energy efficient solutions. E-Server, 2007.
- [Sc09] Schreck, G. et al.: Put DCIM into Your Automation Plans. Forrester, 2009.
- [SK09] Stanley, J.; Koomey, J.: The Science of Measurement: Improving Data Center Performance Measurement of Site Infrastructure, Analytics Press. 2009.
- [St09] Stobbe, L. et al.: Abschätzung des Energiebedarfs der weiteren Entwicklung der Informationsgesellschaft. Fraunhofer, 2009.
- [Te12] Temperaturblog.de: Lehrbuch der Temperaturkalibrierung – Fehlerquellen. <http://www.temperaturblog.de/lehrbuch/Fehlerquellen.htm>. Zuletzt aufgerufen am 8.5.12.
- [Th10] The 451 Group: Datacenter management & energy-efficiency software. 2010.
- [Tk08] Tkotz, K. et al.: Fachkunde Elektrotechnik. Europa-Lehrmittel, 2008.
- [To08] Ton, M.; Fortenbury, B.; Tschudi, W.: DC Power for Improved Data Center Efficiency, LBNL, 2008.
- [Ts04] Tschudi, B. et al.: Energy Efficient Data Centers. LBNL-54163, Berkeley, 2004.
- [Tu08] Turner, W. et al.: Tier Classifications Define Site Infrastructure Performance. 2008.
- [UI08] Ulichni, T.: ITIL: How to Manage the Coming Convergence of IT and Facilities. 2008.
- [Zh10] Zhang, X.; Zhang, Z.: Data Center Integrated Monitoring based on Performance Monitoring of Server and Application System; In: Proc. of International Conference on Computer and Communication Technologies in Agriculture Engineering, 2010.
- [Zh11] Zhou, R. et al.: Modeling and Control for Cooling Management of Data Center with Hot Aisle Containment. In: Proc. of ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, 2011.
- [Ro11] M. G. Rodriguez, L. E. Ortiz Uriarte, Y. Jia, K. Yoshii, R. Ross, P. H. Beckman, "Wireless Sensor Network for Data-Center Environmental Monitoring," Preprint ANL/MCS-P1935-0911, 2011.
- [Pa03] Patel, C. D. et al.: Smart cooling of data centers, In Proc. of International Electronic Packaging Technical Conference and Exhibition, 2003.