

Energieoptimiertes Data Center

Die Effizienz eines Data Centers in Bezug auf dessen Energieverbrauch wird mit steigenden Energiekosten ein immer wichtigeres Thema. Das KTI-Projekt „Energie optimiertes Data Center“ befasst sich deshalb mit der mathematischen Modellierung des Energieverbrauchs eines Data Centers. Ziel des Projektes ist eine benutzerfreundliche Planungs- und Optimierungssoftware, welche mit Hilfe der entwickelten Modelle den Energieverbrauch eines Data Centers und dessen Teilsysteme berechnet. Unsere Software wird den Data Center Planern helfen, verschiedene Varianten von Data Centern zu planen und zu vergleichen, um dem Kunden die energieeffizienteste Lösung vorzuschlagen.

Cyrill Grüter, Peter Gysel, Christoph Meier | peter.gysel@fhnw.ch

Der Energieverbrauch wird zu einem immer wichtigeren Kostenfaktor bei der Planung und beim Betrieb von Data Centern. Dies führt dazu, dass auf dem Gebiet der Data Center Effizienz verschiedene internationale Organisationen tätig sind. Unter anderem setzt sich „The Green Grid“ [GG1] mit dem Thema auseinander, wie die Effizienz von Data Centern gemessen werden kann. Die „American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE)“ befasst sich mit der Effizienz der Kühlung [ASH]. Es ist zu erwarten, dass in naher Zukunft Energieeffizienz und entsprechende Normen, Gütesiegel usw. eine wichtige Rolle bei der Auswahl von Datacenter-Anbietern spielen werden. Unser KTI-Projekt¹ „Energie-optimiertes Data Center“ befasst sich daher mit der mathematischen Modellierung des Energieverbrauchs eines Data Centers. Ziel des Projektes ist eine benutzerfreundliche Planungs- und Optimierungssoftware, welche mit Hilfe der entwickelten Modelle den Energieverbrauch eines Data Centers und dessen Teilsysteme berechnet.

Die am KTI-Projekt beteiligte Firma green.ch möchte als Betreiberin grosser Rechenzentren ihren Energieverbrauch nachhaltig senken. Die am Markt erhältlichen Optimierungsmassnahmen sollen dabei herstellerunabhängig auf ihre Energieeinsparpotentiale verglichen werden, so dass die beste Variante identifiziert werden kann. Obwohl diese Fragestellung eher technischer Natur ist, müssen auch ökonomische Aspekte wie Nachhaltigkeit und Investitionsschutz berücksichtigt werden. Die ebenfalls am Projekt beteiligte Firma R+B Engineering AG erstellt Planungen für Data Center Betreiber. Sie benötigt ein Werkzeug, um definierte Data Center Designs auf ihren Energieverbrauch zu untersuchen und bereits im Entwurfsstadium zu optimieren. Das Werkzeug soll es ermöglichen, dem Kunden rasch Optimierungsvarianten und deren Einsparungen aufzeigen zu können.

In unserem KTI-Projekt wird zur Berechnung des Energieverbrauchs eines Data Centers zunächst auf Basis der relevanten Normen und Vorgaben ein mathematisches Modell entwickelt. Anhand von Messungen in realen Data Centern wird dieses Modell anschliessend validiert und verfeinert.

In einem zweiten Schritt haben wir das Modell in eine Planungs- und Optimierungssoftware überführt, welche den Energieverbrauch eines geplanten Data Centers berechnet. Ein Planer kann somit verschiedene Varianten berechnen und vergleichen. Damit kann er dem Kunden die am besten geeignete Variante rasch vorschlagen.

Energiefluss in einem Data Center

Das Ziel der Data Center Betreiber ist der sichere Betrieb ihres darin untergebrachten Datacom Equipments. Der Betrieb von Datacom Equipment erfordert unter anderem einen bestimmten Energieeinsatz. Zum Energiebedarf des eigentlichen Datacom Equipments kommt der Energiebedarf von Hilfsbetrieben (Licht, Lüftung, Arbeitsplätze, etc.) hinzu. Diese Systeme haben immer eine gewisse Verlustleistung, welche so klein wie möglich sein sollte.

Für die Modellierung des Energieverbrauchs eines Data Centers muss dessen Energiefluss betrachtet werden. Dabei wird die Energie in Form von elektrischem Strom dem Data Center zugeführt und verlässt dieses in Form von Wärme wieder (siehe Abbildung 1).

Die Energie wird in Form von elektrischem Strom dem Data Center zugeführt. Je nach Ausbau und Anschlussart des Data Centers fliesst der Strom durch mehrere Stufen, bevor er zum Datacom Equipment gelangt. Am Eingang des Data Centers wird der Strom auf einen Transformator geführt. Dieser setzt die Spannung des Anschlusspunktes (üblicherweise Mittelspannung im Bereich von 10 kV bis 50 kV) auf die im Data Center benötigte Niederspannung um. Vom Transformator wird die Energie weiter zu einer

1 KTI Projekt 10941.1 PFES-ES

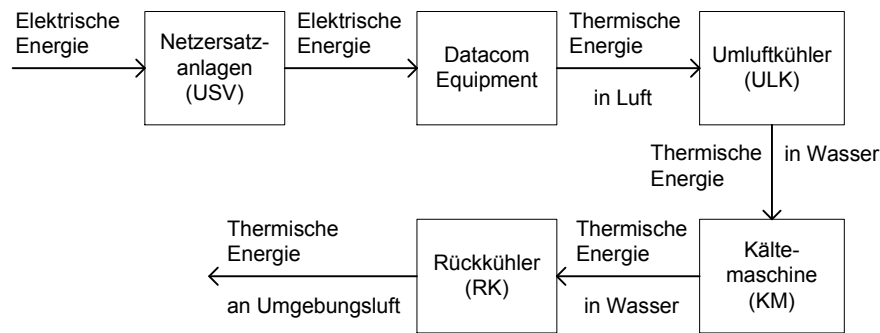


Abbildung 1: Energiefluss in einem Data Center

unterbrechungsfreien Stromversorgungsanlage (USV) geführt. Diese schützt die angeschlossenen Geräte vor verschiedenen Netzstörungen wie Versorgungsunterbrüchen, Überspannung und weiteren Störungen. Am Ausgang der USV wird das eigentliche Datacom Equipment angeschlossen. Dieses setzt die elektrische Energie in Wärmeenergie um. Die Wärme wird meistens in Form von Luft abgeführt².

Die Energie in Form von warmer Luft muss aus dem Data Center abgeführt werden um das Datacom Equipment stets genügend zu kühlen. Dazu wird die Luft durch ein wassergekühltes Register geführt. Hier findet ein Wärmeaustausch zwischen der Luft und dem Wasser statt. Die Luft wird gekühlt und das Kaltwasser dadurch erwärmt. Die Energie im Kaltwasser muss nun wiederum abgeführt werden. Um das Kaltwasser auf eine genügend tiefe Temperatur kühlen zu können, wird eine Kältemaschine eingesetzt, welche entweder luft- oder wassergekühlt sein kann. Bei der luftgekühlten Variante wird der Kondensator der Kältemaschine direkt mit der Umgebungsluft gekühlt. Die Wärmeenergie wird dadurch an die Umgebungsluft abgeführt.

Gesamtmodell

Für die Berechnung des Energiebedarfs betrachten wir den zuvor dargestellten Energiefluss im Data Center. Wie im vorhergehenden Abschnitt gezeigt setzt sich der Energiefluss eines Data Centers aus mehreren Komponenten und Teilsystemen zusammen. Unser Gesamtmodell basiert auf fünf unabhängig berechenbaren Teilsystemen. Dies sind die Netzersatzanlagen (USV), das Datacom Equipment (Server, Switches, Storage, etc.), die Umluftkühlgeräte (ULK), die Kältemaschinen (KM) sowie die Rückkühler (RK). Für jedes dieser Teilsysteme ist ein eigenständiges Modell entwickelt worden, die alle zu einem Gesamtsystem zusammgeführt worden sind.

Die Eingaben für das Modell werden in der oberen Zeile in Abbildung 2 dargestellt. Diese

Angaben müssen einerseits durch den Betreiber eingegeben werden und andererseits kommen sie von Datenblättern der Hersteller der Kühlgeräte. Die untere Zeile umfasst die Ausgaben, die der Betreiber mit Hilfe der Berechnungen erhält. Die Verbindungen in der Mitte sind Zwischenergebnisse, die jedoch direkt wieder als Eingaben für die nächste Stufe verwendet werden. So ergeben sich auch die Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Teilsystemen.

Modellierung der Teilsysteme

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Teilsysteme, auch Blöcke genannt, und deren Modellierungen kurz erläutert. Für den Block „Umluftkühler (ULK)“ zeigen wir exemplarisch die mathematischen und physikalischen Details des Modells auf.

Datacom Equipment: Das Design eines Data Centers beginnt mit der Definition der IT-Leistung. Die IT-Geräte sind die eigentliche Quelle für den Energieverbrauch in einem Data Center. Alle weiteren Komponenten hängen von diesem Verbrauchswert ab. In einem bestehenden Data Center kann die Leistung der installierten IT-Systeme gemessen werden, der Verbrauch ist demnach bekannt. Wird ein neues Data Center geplant, stellt die für das Datacom Equipment zur Verfügung stehende elektrische Leistung eine Designgröße dar und muss abgeschätzt werden. Wir modellieren das Datacom Equipment als einen Block mit dem Eingangsparameter elektrische Eingangsleistung (P_{IT}). Dieser kann entweder einen fixen Wert darstellen oder mit Hilfe unserer Modellierungen für den Energieverbrauch eines Servers, eines Netzwerk Switches und eines Storage Systems berechnet werden. Die Grundlage für die Modellierung bildet der Energiesatz: Die gesamte elektrische Energie, welche dem Datacom Equipment zugeführt wird, wird durch dieses in Wärme umgewandelt. Der Anteil des Datacom Equipments am Gesamtenergieverbrauch des Data Centers beträgt zwischen 50% und 80%.

USV: Die USV-Anlagen werden für den maximalen angeschlossenen elektrischen Bedarf geplant. Anhand der Anlagedaten und dem Betriebspunkt kann festgestellt werden, mit welchem Wirkungs-

² Es sind auch wassergekühlte Systeme auf dem Markt, bei welchen die Chips die Wärme direkt an Kühlwasser abgeben.

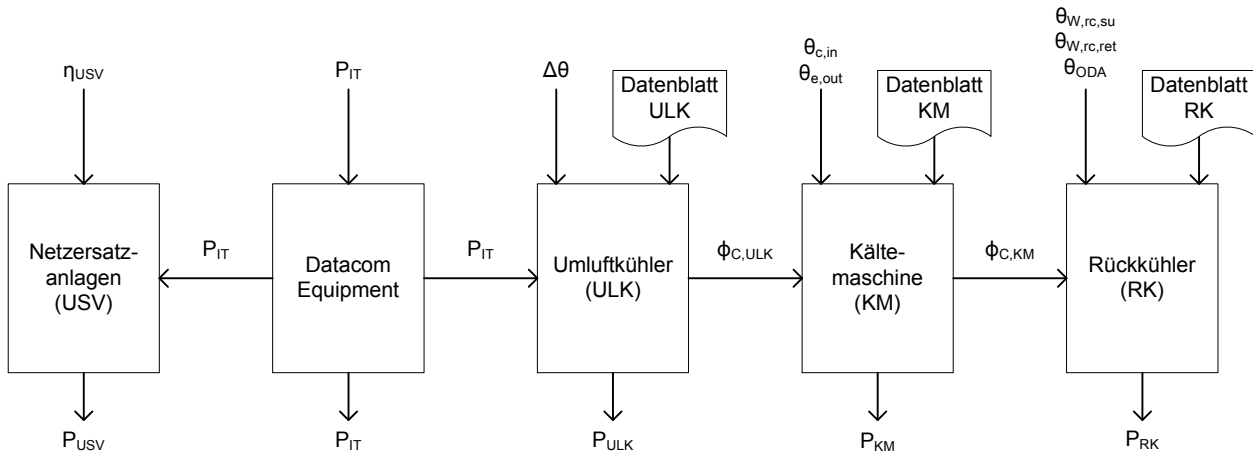


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Gesamtmodells

grad die Anlage arbeitet. Das heisst, dass der Block USV als Eingabeparameter den Wirkungsgrad (η_{USV}) und vom Datacom Equipment Block die angeschlossene Leistung erhält. Die USV-Anlagen erreichen dabei nur einen Anteil von 2% bis 4% des gesamten Energieverbrauchs.

Umluftkühler (ULK): Der Zweck der Umluftkühler besteht darin die erzeugte Wärme des Datacom Equipments abzuführen. Aktuell werden nur luftgekühlte Systeme mit Umluftkühlergeräten betrachtet. Später sind an dieser Stelle auch andere Systeme wie frischluft- und wassergekühlte Systeme einsetzbar. Für die Berechnung des elektrischen Leistungsbedarfs der ULK benötigt unser Modell Angaben aus den Datenblättern (Ventilatorleistung ($P_{F,req}$) und Volumenstrom ($q_{V,req}$) bei Vollast) und Werte für zwei allgemeine Parameter der Luft (Wärmekapazität (c_p) von Luft und Luftdichte (ρ)). Je nach Bau- und Betriebsart des Data Centers wird ein bestimmter Temperaturhub zwischen der Zu- und Abluft des ULK erreicht. Diese Differenz ($\Delta\theta$) erwartet das Modell als Designgrösse und ist vom Betreiber zu definieren. Die Wärmeleistung (P_{th}) wird durch die elektrischen Verbraucher im Data Center (Datacom Equipment)

erzeugt und ist somit bekannt. Das Modell für die Kälteabgabe berechnet aus den angegebenen Parametern den benötigten Volumenstrom qV :

$$qV = P_{th} / (\rho \cdot c_p \cdot \Delta\theta).$$

Im Idealfall ist der Temperaturunterschied ($\Delta\theta$) möglichst gross, so dass der Volumenstrom kleiner wird. Aus dem Volumenstrom lässt sich nun die dafür benötigte elektrische Leistung P_F im Teillastbetrieb mit Hilfe von bestehenden Normen des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins (SIA) näherungsweise berechnen [SIA]:

$$P_F = P_{F,req} / 100 \cdot (19,67 \cdot (q_V / q_{V,req})^3 + 96,82 \cdot (q_V / q_{V,req})^2 - 25,98 \cdot (q_V / q_{V,req}) + 10,42).$$

Der Anteil der Umluftkühler am gesamten Energiebedarf des Data Centers liegt in der Praxis im Bereich von 4% bis 10%.

Die Abbildung 3 zeigt beispielhaft die aufgenommenen Messwerte eines ULKs und die nach unserem Modell berechnete elektrische Leistung. Der Arbeitsbereich eines ULKs liegt typisch bei einer Auslastung von 50% bis 100%. In diesem Bereich weicht die Modellierung zwischen 3,4% bis maximal 14,7% vom Messwert ab. Wobei die grösste Abweichung bei einem Volumenstrom von $1,1 \text{ m}^3/\text{s}$ auf eine Fehlmessung zurück geführt werden muss.

Kältemaschine (KM): Die Kältemaschine erhält vom ULK Block die geforderte Kühlleistung ($\phi_{C,ULK}$). Zur Berechnung des elektrischen Energiebedarfs für dessen Kühlung benötigt die Kältemaschine vom Betreiber die Temperatur des Kühlwassers im Verflüssiger ($\theta_{c,in}$) und die Temperatur des Kaltwassers im Verdampfer ($\theta_{e,out}$). Zusätzlich benötigt das Modell der Kältemaschine Daten aus dem Datenblatt des eingesetzten Maschinentyps. Mit Hilfe dieser Eingaben lässt sich danach der Energieverbrauch der Kältemaschine im Modell berechnen.

Rückkühler (RK): Der Rückkühler erhält von der Kältemaschine die geforderte Kühlleistung ($\phi_{C,KM}$). Zur Berechnung des elektrischen Energie-

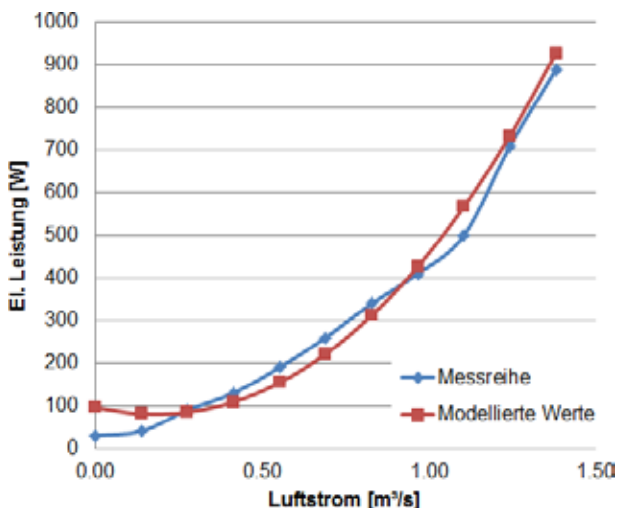


Abbildung 3: Berechnete Werte vs. gemessene Werte ULK

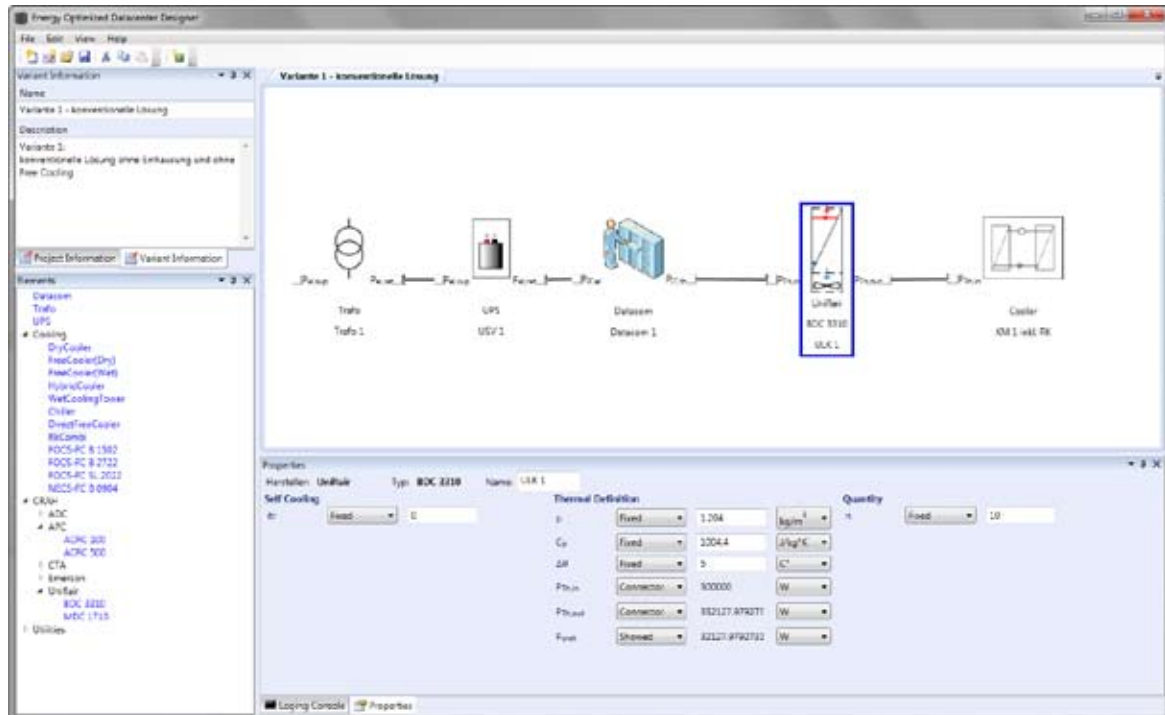


Abbildung 4: Variante eines Data Center im EoD Designer

bedarfs für dessen Kühlung benötigt die Kältemaschine vom Betreiber die Kühlwassertemperaturen im Vorlauf ($\theta_{w,rc,su}$) und im Rücklauf ($\theta_{w,rc,ret}$). Zusätzlich wird die Umgebungstemperatur (θ_{ODA}) benötigt. In den heute eingesetzten Systemen werden Kältemaschine und Rückkühler häufig kombiniert. Solche Kältemaschinen mit integriertem Rückkühler haben einen Anteil von 10% bis 20% am Gesamtenergieverbrauch des Data Centers.

Ergebnisse der Modelle

Die oben beschriebenen Blöcke berechnen für jede Stunde im Jahr die benötigte elektrische Leistung und stellen sie zur Analyse und zur grafischen Auswertung in Form eines Vektors für die weitere Verarbeitung zur Verfügung. Das Modell für die USV-Anlage berechnet die Verlustleistung (P_{USV}). Das Modell der ULK berechnet die benötigte elektrische Leistung der ULK (P_{ULK}). Dasselbe gilt für die Kältemaschine und das Rückkühlwerk, welche die benötigten elektrischen Leistungen (P_{KM} und P_{RK}) berechnen. Die Summe dieser Teilleistungen entspricht dem elektrischen Gesamtbedarf (P_{tot}) des Modells:

$$P_{tot} = P_{IT} + P_{USV} + P_{ULK} + P_{KM} + P_{RK}$$

Das Konsortium „The Green Grid“ hat einen weltweit anerkannten Wert für die Effizienz der eingesetzten elektrischen Energie in einem Data Center entwickelt [GG2]. Dieser Effizienzwert zeigt, wie gross der Anteil des Energieverbrauchs des Datacom Equipments im Vergleich mit den restlichen Systemen (Kühlsysteme, USV, etc.) ist. Dieser sogenannte „Power Usage Effectiveness“ (PUE) lässt

sich mit Hilfe der Ergebnisse unseres Gesamtmodells wie folgt berechnen: $PUE = P_{tot}/P_{IT}$

Planungs- und Optimierungssoftware: EoD Designer

Die im vorhergehenden Abschnitt gezeigten Modelle für die Teilsysteme und das Gesamtsystem sind in eine Planungs- und Optimierungssoftware überführt worden. Die Software erlaubt eine Abschätzung des Energieverbrauchs eines gesamten Data Centers. Dabei können die fünf Teilsysteme jeweils einzeln konfiguriert werden. Dies erlaubt die Simulation verschiedener Varianten eines Data Centers und damit deren Vergleich. Der Planer kann dadurch die Auswirkungen der verschiedenen Varianten auf den Energieverbrauch des Data Centers darstellen. Eine solche Software ist nach unserem derzeitigen Wissensstand auf dem Markt noch nicht erhältlich. Die Firma R+B Engineering AG setzt unsere Software bereits für ihre Dienstleistungen ein und verschafft sich dadurch einen Wettbewerbsvorteil. In den nachfolgenden Abschnitten werden die beiden Hauptbestandteile der Software (Erstellen von Varianten und Reports) vorgestellt.

Erstellen von Varianten: Der Kernpunkt der Software bildet die Erstellung von verschiedenen Varianten von Data Centern. In einer Variante werden die fünf Teilsysteme individuell konfiguriert. Begonnen wird mit der Definition der Leistung des Datacom Equipments. Anschliessend wird die Energiezufuhr, bestehend aus Trafos und USV Anlagen, konfiguriert. Um die entstandene Wärme abzuführen, werden zusätzlich noch Umluftkühler und Kältemaschinen (inkl. Rückkühler) hinzugefügt. Eine Komponente kann da-

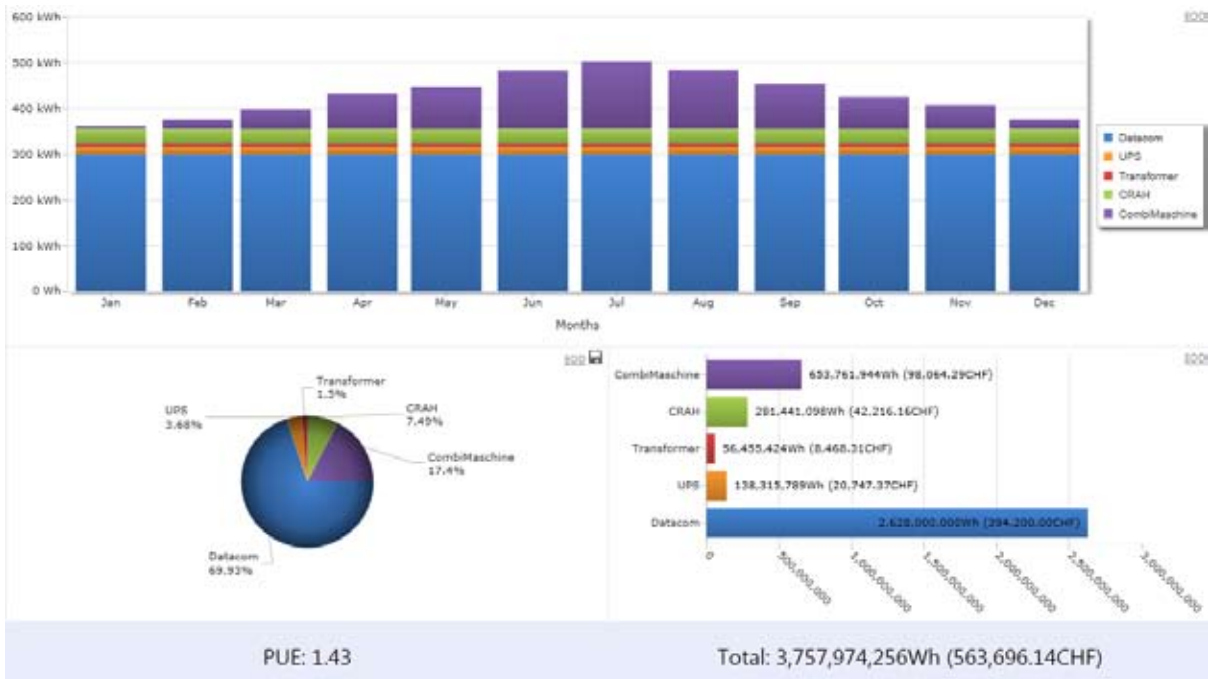


Abbildung 5: Report einer Variante im EoD Designer

bei mehrmals vorkommen, z.B. können im gleichen Data Center zwei verschiedene USV Anlagen eingesetzt werden. Die einzelnen Komponenten werden mit den für die Modelle benötigten Werten konfiguriert. Wie im Kapitel Gesamtmodell bereits beschrieben wurde, müssen dabei einige Werte vom Betreiber manuell definiert werden. Andere Werte werden automatisch aus bereits vorliegenden Datenblättern geladen. Einige Ausgaben der Komponenten dienen zudem direkt als Eingaben für anschließende Komponenten. Der Betreiber hat zudem die Möglichkeit, Daten aus von ihm angefertigten Textdateien zu laden (z.B. die Wetterdaten eines Standorts). Die Software beinhaltet bereits viele vordefinierte Elemente (Komponenten). Der Benutzer hat aber die Möglichkeit, eigene Geräte hinzuzufügen. Dafür muss er lediglich eine neue Spezifikation mit einigen Grunddaten aus dem Datenblatt im XML Format erstellen. Dies gibt ihm auch die Möglichkeit, bestehende Geräte anzupassen. Ein Beispiel für eine Variante eines Data Centers wird in Abbildung 4 dargestellt.

Reports: Für jede Variante kann der Benutzer die Auswirkungen auf den Energieverbrauch auswerten. In einem solchen Report werden die Anteile des Energieverbrauchs der Teilsysteme gemessen am gesamten Verbrauch des Data Centers aufgelistet (prozentual und absolut als kWh). Eine Jahresbilanz zeigt den Energieverbrauch der einzelnen Systeme und des gesamten Data Centers pro Monat. Der Report berechnet zudem die Energiekosten pro Jahr und den international anerkannten PUE Wert. Damit kann das geplante Data Center mit anderen bereits bestehenden Data Centern verglichen werden. Neben der Jahresbilanz

kann auch eine Auswertung pro Monat, in welcher jeder Wochentag ersichtlich ist, angezeigt werden. Der Report liefert somit dem Planer alle wichtigen und benötigten Informationen, um dem Kunden die Vor- und Nachteile jeder Variante aufzuzeigen. Der Kunde erkennt die Auswirkungen auf den Energieverbrauch und die damit verbundenen Energiekosten sofort, ohne dass weitere Berechnungen nötig sind. In Abbildung 5 wird ein solcher Report für eine Variante aufgezeigt.

Fazit

In diesem Projekt ist ein möglichst einfaches mathematisches Modell für den Energieverbrauch eines ganzen Data Centers entwickelt worden. Anhand von Messungen in verschiedenen operationellen Data Centern ist dieses verifiziert worden und dabei hat sich gezeigt, dass die Vorhersagen zwischen -5% und +10% vom tatsächlichen Energieverbrauch abweichen. Damit ist das Modell hinreichend genau, um vernünftige Abschätzungen zu liefern. Die auf der Modellierung aufgebaute Software gibt dem Planer die Möglichkeit, verschiedene Varianten für sein Data Center einander gegenüber zu stellen. Mit Hilfe der Auswertungen kann er die Varianten vergleichen und dem Kunden den im Zusammenhang mit der Energie effizientesten Vorschlag offerieren.

Referenzen

- [ASH] ASHRAE: <http://www.ashrae.org>
- [GG1] The Green Grid: <http://www.thegreengrid.org>
- [GG2] The Green Grid, Data Center Power Efficiency Metrics (PUE): http://www.thegreengrid.org/~media/WhitePapers/White_Paper_6_-_PUE_and_DCIE_Eff_Metrics_30_December_2008.pdf?lang=en
- [SIA] SIA, Merkblatt 2044