

Ein quasi-stationäres Modell zur Prognose des Infrastruktur-Energiebedarfs von Rechenzentren

Gregor Drenkelfort, Lennart Goschin, Frank Behrendt

Institut für Energietechnik
Technische Universität Berlin
Straße des 17. Juni 135
10623 Berlin
g.drenkelfort@tu-berlin.de
goscspch@mailbox.tu-berlin.de
frank.behrendt@tu-berlin.de

Abstract: Die Prognose von Energiebedarfen von Rechenzentren (RZ) im Rahmen der Änderungen in der Energieversorgung (Smart Grid) wird zunehmend wichtiger. Da ein signifikanter Anteil des Gesamtenergiebedarfs eines RZ von dessen Infrastruktur benötigt wird, ist die Prognose dieses Energiebedarfs ebenfalls von großer Bedeutung. Die bisher vorhandenen Ansätze zur Bestimmung des RZ-Infrastrukturenergiebedarfs gelten nur für einen Betriebspunkt und erfassen keinen zeitlichen Verlauf. Dies ist vor allem dadurch begründet, dass viele der benötigten Daten von den RZ-Betreibern bisher nicht kontinuierlich erfasst wurden. Mit diesen Ansätzen kann zwar der jährliche Energiebedarf der RZ-Infrastruktur bestimmt werden, aber die kurzfristige Prognose ist mit ihnen nicht möglich. Dieser Artikel entwickelt auf Basis dieser Ansätze ein quasi-stationäres Modell zur Bestimmung des RZ-Infrastrukturenergiebedarfs, das für kleine Zeitintervalle den Energiebedarf berechnet. Dazu werden die notwendigen Berechnungsgrundlagen vorgestellt und anschließend mit Messreihen eines realen deutschen Rechenzentrums für zwei Zeitintervalle der Datenerhebung (15 und 240 min) hinsichtlich der Modellgenauigkeit validiert. Das 15 Minutenintervall wies hierbei größere Abweichungen als das 240 Minutenintervall auf. Eine genauere Analyse zeigte, dass die Abweichungen durch die Modellierung der Kältemaschinen verursacht werden. Die oft verwendete Modellierung als Funktion der Außen- und Kaltwassertemperatur kann das bei Kältemaschinen oft anzutreffende Takten in kleinen Zeitintervallen nicht hinreichend genau abbilden. Durch eine andere Modellierung der Kältemaschinen könnte der Gesamtansatz aber zur kurzfristigen Energiebedarfsprognose der RZ-Infrastruktur eingesetzt werden, z.B. um Energiebedarfsveränderungen Verlagerungen aus oder in andere RZ abzuschätzen.

1 Einleitung

Der Energiebedarf der Informationstechnik (IT) im Allgemeinen sowie der Energiebedarf von RZ im Speziellen ist in den letzten Jahren dramatisch angestiegen und wird nach Ansicht von Experten weiter steigen [SNPM09, DS09]. In Regionen mit hoher RZ-Dichte liegt deren Anteil am Gesamtstrombedarf bereits bei über 25% [WDD12]. Um

dieser Entwicklung entgegen zu wirken, müssen die RZ-Betreiber die Energieeffizienz ihrer RZ erhöhen und ihren Energiebedarf besser prognostizieren. Zur Vorhersage des RZ-Energiebedarfs oder zur Evaluierung neuer Technologien können Simulations-Werkzeuge genutzt werden. Dieser Beitrag untersucht die Eignung eines einfachen Modellansatzes für die Vorhersage des zeitlich abhängigen Energiebedarfs der RZ-Infrastruktur. Die wesentlichen Parameter des Energiebedarfs sind die IT-Last und die standortabhängige Außentemperatur. Zur Validierung des Ansatzes werden Messdaten eines kommunalen RZ aus dem Government GreenCloud Laboratory (GGC-Lab) Verbund verwendet.

2 Modellierung und Prognose des Energiebedarfs von Rechenzentren

In diesem Abschnitt wird der Stand zur Modellierung und Simulation des Energiebedarfs von RZ kurz beschrieben. Dazu werden RZ und ihre Funktionalen Systeme definiert und anschließend die Entwicklung und der Stand der Energiebedarfsmodellierung von RZ vorgestellt.

2.1 Rechenzentren

Die Definition des Begriffs RZ ist seit Jahren Gegenstand intensiver Diskussion in der Literatur. Für diesen Beitrag wird die Definition aus [SDE⁺12] gewählt:

RZ sind in sich geschlossene Einrichtungen, die zentralisierte IKT und ergänzende Infrastrukturen beherbergen, um die dauerhafte, zuverlässige Berechnung, Speicherung und Übertragung großer Mengen digitaler Daten zu ermöglichen.

Als Quellen des Energiebedarfs von RZ werden funktionale Systeme unterschieden: Die IT-Komponenten, das Kühlsystem, die Stromversorgung und das Support-System. Zu den IT-Komponenten gehören die Server, die Speichersysteme und die Netzwerkgeräte. Das Kühlsystem umfasst neben der Kälteanlage auch die Umluftklimageräte (UKG) bzw. Cool-Loops sowie Rück- und Freikühler. Zur Stromversorgung zählen vorwiegend die unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) und die diversen Niederspannungsunterverteilungen.

Zur Prognose des Energiebedarfs von RZ müssen diese Systeme modelliert und mit geeigneten Werkzeugen simuliert werden. Der nächste Abschnitt beschreibt dazu den aktuellen Stand von Forschung und Technik.

2.2 Stand der Energiebedarfsmodellierung von Rechenzentren

Der Energiebedarf eines RZ mit vorgegebenen Umweltbedingungen für die IT-Komponenten in den Serverräumen (Warm- und Kaltgangtemperaturen, Bereich der Feuchte etc.)

richtet sich im Wesentlichen nach der IT-Leistung und der Außentemperatur, da diese im Wesentlichen die Effizienz des Kühlsystems bestimmen. Für RZ existieren aus diesem Grund verschiedene Modellierungsansätze. Prinzipiell werden in der Literatur thermische Ansätze zur Modellierung der Infrastruktur-Komponenten, wie sie z.B. in [JK12] vorgestellt werden und Modellierungsansätze für die IT-Komponenten, wie z.B. in [GCG⁺12], unterschieden. Die IT-Modellierung verfolgt das Ziel, die Komponenten und ihre Auslastungen bzw. ihre kritischen Ressourcen (CPU, RAM, DISC) abzubilden. Die Modellierung der Infrastruktur hat oft Größen zum Ziel, die in Beziehung zu thermischen Größen stehen. Aus diesem Grund setzen Energieeffizienzmodellierungen den Schwerpunkt häufig auf die Infrastruktur. Diese umfasst Geräte im Serverraum, z.B. die UKG, sowie die wesentlichen Komponenten des Kühlsystems, die Stromversorgung wird häufig auf die USV-Verluste¹ reduziert.

Bei der Infrastrukturmodellierung kann man zwischen der Modellierung des Serverraums und der Gesamtinfrastruktur unterscheiden. Die Modellierung der RZ-Gesamtinfrastruktur hat die Bestimmung des Gesamtenergiebedarfs des RZ zum Ziel. Hierfür werden i.d.R. die wesentlichen Komponenten modelliert und auch als wesentliche Bilanzpunkte (für elektrische Energie und Wärmeströme) des Modells verwendet. Die Serverraummodellierung setzt deutlich detaillierte und somit komplexere Ansätze ein. Oft kommen Tools der Strömungssimulation (engl. CFD, Computational Fluid Dynamics) zum Einsatz, die Informationen über Strömungsgeschwindigkeit, Druck und Temperatur zu jedem Zeitpunkt und für jeden Ort im Serverraum liefern. Ziel ist es, die zeitabhängige thermische Situation im Serverraum abzubilden. Mit Hilfe dieser Daten können z.B. bessere Aufstellungsorte für die einzelnen IT-Komponenten ermittelt werden.

Die Modelle zur Bestimmung des Energiebedarfs sind i.d.R. algebraische Modelle, die den stationären Betrieb des RZ abbilden. D.h., sie liefern den Energiebedarf für einen Betriebspunkt des RZ. Änderungen z.B. der IT-Last oder der Außentemperatur während des Betrachtungsintervalls werden nicht berücksichtigt [SBI12, BWP⁺10]. Zusätzlich wurden die Modelle bisher oft nur in Test-RZ oder für einen sehr langen Zeitraum (häufig: 1 Jahr) validiert [Dem12, BWP⁺10, WBP⁺10]. Dies ist vor allem darin begründet, dass die RZ-Betreiber die erforderlichen Daten nicht kontinuierlich speichern².

Dieser Beitrag untersucht daher die Eignung eines algebraischen Modellansatzes für die Vorhersage des zeitlich abhängigen Energiebedarfs der RZ-Infrastruktur, der möglichst einfach nach den realen Gegebenheiten eines RZ, z.B. mit Hilfe von Herstellerdatenblättern, angepasst werden kann. Die IT-Komponenten werden Abwärmelast im Serverraum modelliert. Die wesentlichen Modellparameter sind somit die IT-Last und die standortabhängige Außentemperatur. Die Energiebedarfe der Komponenten (UKG, Pumpen, Kältemaschinen) werden über Bilanzgleichungen berechnet. Zur Validierung stehen Zeitreihen eines Rechenzentrums zur Verfügung.

Der vorgestellte Ansatz ist weiterhin ein quasi-stationärer bzw. diskreter. D.h., dass die instationäre Phase, während der sich ein neuer Betriebspunkt für das Gesamtsystem einstellt, vernachlässigt wird. Diese Betrachtung ist dann zulässig, wenn die instationäre Phase rela-

¹Diese Annahme ist zulässig, da die USV-Verluste i.d.R. den großen messbaren Teil des Energiebedarfs der Stromversorgung verursachen.

²Diese bestätigte sich im Projektverlauf und in diversen Fachgremien, in denen RZ-Betreiber vertreten sind; derzeit werden auf diesem Gebiet große Fortschritte erzielt.

tiv kurz im Vergleich zum betrachteten Zeitintervall und der Energiebedarf in dieser Phase klein im Verhältnis zu dem der restlichen Zeit ist. Für den in diesem Beitrag vorgestellten Ansatz betragen die untersuchten Zeitintervalle 15 Minuten und 240 Minuten. Durch Validierung mit realen RZ-Daten wird untersucht, welche Zeitaufösung besser geeignet ist.

3 Modellbeschreibung

Das im Folgenden beschriebene quasi-stationäre Modell berechnet ausgehend von zeitlich variablen Leistungen der IT-Komponenten die Energiebedarfe der wesentlichen Gerätegruppen des Kühlsystems und der USV. Da die Validierung des Modells mit Messdaten eines realen RZ erfolgt, wird die Modellstruktur an das RZ angepasst. Es handelt sich um ein RZ mit indirektem Kühlsystem. Abbildung 1 zeigt die umgesetzte Struktur. Die Au-

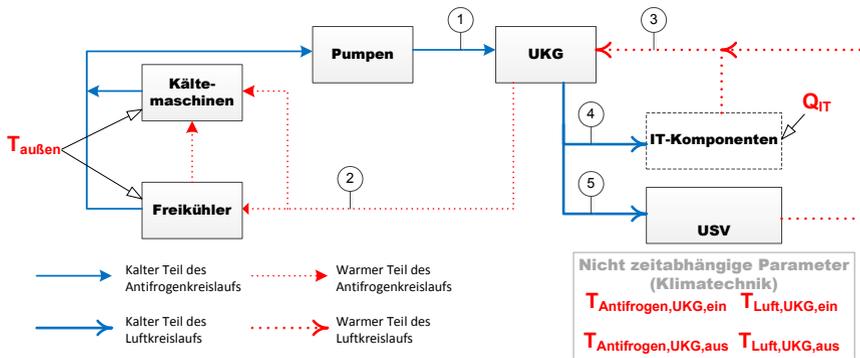


Abbildung 1: Aufbau des Modells

Bentemperatur ($T_{au\beta en}$), welche der entscheidende Parameter für die Wärmeabfuhr durch das Kühlsystem ist, erfolgt mittels Wetterdaten für den relevanten Standort (Web-based Weather Request and Distribution System (WebWerdis)³ des Deutschen Wetterdienstes [DWD]). Der durch die IT-Komponenten verursachte Abwärmestrom (\dot{Q}_{IT}) bildet den zweiten zeitabhängigen Parameter des Modells. Weiterhin verfügt das Modell über nicht zeitabhängige Parameter, wie z.B. die Temperaturen des wasserbasierten Kühlmittels (Antifrogen). Da das Antifrogen die Wärme im Modell nur über die UKG aufnimmt und über Freikühler sowie Kältemaschinen wieder abgibt, werden nur die einheitlichen Eingangs- und Ausgangstemperaturen ($T_{Antifrogen,UKG,ein}$ und $T_{Antifrogen,UKG,aus}$) in die UKG erfasst.

Die IT-Komponenten geben ihre Wärme an einen Luftstrom ab, der im UKG diese auf das Antifrogen überträgt. Die Eingangstemperatur in die UKG ($T_{Luft,UKG,ein}$), die identisch mit der Ausgangstemperatur aller IT-Komponenten ist, sowie die Ausgangstemperatur

³Der DWD stellt mit Hilfe des WebWerdis-Systems meteorologische Fachdatenbanken und Dateiverzeichnisse zur Verfügung. Klimadaten von ausgewählten Wetterstationen in Deutschland können kostenlos abgerufen werden [DWD13].

des Luftstroms ($T_{Luft,UKG,aus}$) werden als nicht zeitabhängige Parameter des Modells festgelegt.

Abbildung 1 zeigt zusätzlich die Bilanzpunkte (Nr. 1-5) des Modells sowie die Gerätegruppen, für die der Energiebedarf mit den gegebenen Parametern berechnet wird (Kältemaschinen, Freikühler, Pumpen, UKG und USV). Für die folgenden Ausführungen gilt, dass die Temperaturen bis auf die der Kältemaschinen in Kelvin, die IT-Last in kW_{el} und die Massenströme in kg/s angegeben werden.

3.1 Serverraum und Umluftklimageräte

Der aus der Leistung der IT-Komponenten resultierende Abwärmestrom \dot{Q}_{IT} wird über den Luftstrom abgeführt und im UKG an das Antifrogen abgegeben. Es gilt die Annahme, dass (\dot{Q}_{IT}) im betrachteten Zeitintervall konstant ist. Weiterhin wird angenommen, dass die Austrittstemperatur der UKG $T_{Luft,UKG,aus}$ gleich der Eintrittstemperatur aller Komponenten im SR und deren Austrittstemperatur gleich der Eintrittstemperatur der UKG $T_{Luft,UKG,ein}$ ist. Für die auftretende Temperaturdifferenz ΔT gilt Gleichung (1):

$$\Delta T = T_{Luft,UKG,ein} - T_{Luft,UKG,aus} \quad (1)$$

Bei geg. Luftfeuchtigkeit und Temperaturdifferenz ergibt sich daraus der zur Wärmeabfuhr benötigte Luftmassenstrom \dot{m} , der mit Hilfe von Gleichung (2) berechnet wird:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_{it}}{c_{p,Luft} \cdot \Delta T} \quad (2)$$

Mit $c_{p,Luft}$ als spezifischer Wärmekapazität der Luft. UKG benötigen den Großteil ihrer elektrischen Leistung zum Betrieb der Lüfter, welche wie im vorliegenden Fall bei neueren Geräten drehzahl geregelt sind [DKLH10]. Diese Regelung erlaubt die Anpassung des Luftmassenstroms an die Abwärmelast im Serverraum nach Gleichung (2).

Der Energiebedarf der UKG kann dann mit Hilfe der Ventilatorproportionalitätsgesetze berechnet werden. Diese beschreiben den Zusammenhang zwischen der Lüfterdrehzahl n , dem geförderten Luftmassenstrom \dot{m}_{Luft} und der erforderlichen Antriebsenergie P_{Vent} . Es gelten die Gleichungen (3) und (4):

$$\frac{\dot{m}_{Luft,B}}{\dot{m}_{Luft,A}} = \frac{n_B}{n_A} \quad (3)$$

$$\frac{P_{Vent,B}}{P_{Vent,A}} = \left(\frac{n_B}{n_A}\right)^3 \quad (4)$$

Demnach gilt für den Energiebedarf im Betriebspunkt B im Verhältnis zum Auslegungspunkt A :

$$P_{Vent} = P_{Vent,A} \cdot \left(\frac{\dot{m}_{Luft}}{\dot{m}_{Luft,A}}\right)^3 \cdot \eta_M \quad (5)$$

Mit η_M als Wirkungsgrad des Lüftermotors.

Der Wärmedurchgang von der Luft auf das Antifrogen im UKG wird mit dem sog. NTU-Verfahren (engl. Number of Transfer Units) für Kreuzstromwärmeübertrager modelliert [VG06]. Dabei besitzen die UKG drei von der Luft überströmte Kaltwasserrohrreihen. Der Wärmedurchgang besteht aus drei Teilschritten:

1. Wärmeübergang von der Luft auf das Metall des Wärmeübertragers.
2. Wärmeleitung durch das Metall des Wärmeübertragers.
3. Wärmeübergang von dem Wärmeübertrager auf das Antifrogen.

Der gesamte Vorgang wird durch einen Wärmedurchgangskoeffizienten U beschrieben. Der Zusammenhang zwischen den Teilschritten wird durch die PECLET-Gleichung ausgedrückt, Gleichung (6):

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{\alpha_{Luft}} + \frac{d}{\lambda_{Kupfer}} + \frac{1}{\alpha_{Antifrogen}} \quad (6)$$

Mit α_{Luft} als Wärmeübergangskoeffizient der Luft und $\alpha_{Antifrogen}$ als Wärmeübergangskoeffizient des Antifrogens, beide in $W/(m^2 \cdot K)$, λ_{Kupfer} als Wärmeleitfähigkeit von Kupfer (372 W/K·m [CW05]) und d als Dicke des Wärmeübertragerrohres in m. Aus dem Datenblatt der Hersteller können Produkte von U mit der Wärmeübertragerfläche A in m^2 für einige Betriebspunkte des UKG bestimmt werden (meist Vollast mit verschiedenen Temperaturen für Luft und Antifrogen).

Für die Anpassung von U an schwankende Luft- und Antifrogenmassenströme wird Gleichung (6) verwendet. Da die Rohre mit 1,5 mm sehr dünn sind und die Wärmeleitfähigkeit sehr groß ist, wird der mittlere Term in Gleichung (6) sehr klein ($< 10^{-5}$) und kann daher vernachlässigt werden. Da die Wärmeübergangskoeffizienten von Luft deutlich kleiner sind als die von Wasser, ist der bestimmende Teilschritt des Wärmedurchgangs der Wärmeübergang von Luft auf die Wärmeübertrager. Durch die erzwungene Luftströmung und die vergrößerte Wärmetauscherfläche (z.B. mit Kühlrippen) nähert sich der Wärmeübergangskoeffizient vom Kühlwasser dem der Luft an. Dies wird durch die Gewichtungsfaktoren w_{Wasser} und w_{Luft} berücksichtigt. Die Berechnung der Veränderung von U im Verhältnis zu den Auslegungsdaten U_A kann mit Gleichung (7) erfolgen:

$$U = U_A \cdot \frac{1}{w_{Antifrogen} \cdot \frac{\dot{m}_{Antifrogen,A}}{\dot{m}_{Antifrogen}} + w_{Luft} \cdot \frac{\dot{m}_{Luft,A}}{\dot{m}_{Luft}}} \quad (7)$$

3.2 Pumpen

Der Energiebedarf der Pumpen zur Förderung des Antifrogens wird über die sog. Förderhöhe H berechnet [Ign07]. Die Förderhöhe H setzt sich prinzipiell aus geodätischer Förderhöhe H_{geo} , Druckhöhenverlust $\sum \zeta$ und der Druckhöhendifferenz ΔH_p gemäß Gleichung (8) zusammen.

$$H = H_{geo} + \sum \zeta + \Delta H_p \quad (8)$$

H_{geo} ist der von der Pumpe zu überwindende Höhenunterschied, $\sum \zeta$ entspricht der Summe der Druckverluste des Systems (vor allem die Verluste des Rohrleitungssystems und der Geräte, wie z.B. UKG, Freikühler und Kältemaschinen). ΔH_p entspricht der von der Pumpe zu überwindende Druckdifferenz⁴.

Eine Förderhöhe von 1 m entspricht einem Druckunterschied von 10 kPa oder 0,1 bar. Über die Förderhöhe kann die benötigte Antriebsenergie der Pumpe berechnet werden:

$$P_{Pumpe} = \frac{\dot{m}_{Antifrogen} \cdot g \cdot H}{\eta_m} \quad (9)$$

Mit g als Erdbeschleunigung ($\approx 9,81 \text{ m/s}^2$) und η_m als Wirkungsgrad des Pumpenmotors. $\dot{m}_{Antifrogen}$ wird iterativ mit dem NTU-Verfahren berechnet (vgl. Abschnitt UKG).

3.3 Freikühler

Die Berechnung der abzuführenden Wärmelast durch den Freikühler folgt den Gesetzmäßigkeiten eines Kreuzstromwärmeübertragers (vgl. UKG, Abschnitt 3.1).

3.4 Kältemaschinen

Typische Kältemaschinen in RZ verfügen über eine Hysterese-Regelung, d.h. sie takten zwischen den Zuständen AN und AUS [VJF⁺ 13]. Die Berücksichtigung des Taktens ist in diesem Modell nicht vorgesehen, es wird stattdessen eine COP-Funktion an die Herstellerdaten (Verdichterkennfelder, COP-Temperaturabhängigkeit) mit Hilfe eines maschinen-spezifischen Polynoms 4. Grades angepasst, Gleichung (10):

$$COP(t_{Antifrogen}, t_{au\beta en}) = \sum_{i=0}^4 \sum_{j=0}^4 a_i \cdot b_j \cdot t_{Antifrogen}^i \cdot t_{au\beta en}^j \quad (10)$$

Mit $t_{Antifrogen}$ als Antifrogentemperatur (Vorlauf) und $t_{au\beta en}$ als Temperatur der Außenluft in °C.

3.5 Unterbrechungsfreie Stromversorgung

Hersteller geben für ihre USV-Anlagen oft Wirkungsgrade in Abhängigkeit der Auslastung an. Für verschiedene Auslastungen können aus diesen Daten Polynome 3. oder 4. Grades erzeugt werden (vgl. Kältemaschine). Sollten diese Werte nicht zur Verfügung stehen, kann z.B. auf eine Untersuchung des Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) zurück gegriffen werden. Das LBNL hat für die vier typischen USV-Arten den Wirkungsgrad (η) in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad (ρ_{Aus}) untersucht [TF05].

⁴Ist im RZ 0, da ein geschlossener Antifrogen-Kreislauf vorliegt.

4 Validierung des Modells

In diesem Abschnitt werden die modellspezifischen Parameter und Maschinendaten vorgestellt. Das Modell wird mit Messdaten eines kommunalen RZ aus dem GGC-Lab Verbund von August 2012 bis Ende April 2013 validiert. Der Abwärmestrom \dot{Q}_{IT} entspricht der gemessenen Leistungsaufnahme der IT-Komponenten eines Serverraums. Die Außentemperatur $T_{au\beta en}$ für den entsprechenden Standort wurde aus dem WebWerdis-Tool des DLR importiert und nach DWD-Vorgabe zur Berücksichtigung des Stadteffekts um 2 K erhöht. Die UKG werden nur mit Werten aus einem Serverraum mit Werten ab Februar 2013 validiert, da die anderen Serverräume noch zu gering ausgelastet sind und vorher keine kontinuierlichen Temperaturdaten zur Verfügung standen. Bei der Ermittlung des Energiebedarfs der UKG-Ventilatoren zeigte sich, dass aufgrund strömungstechnischer Gegebenheiten im Serverraum die Energieabhängigkeit der Drehzahl vom Luftmassenstrom mit den theoretischen Affinitätsgesetzen nicht hinreichend genau beschrieben werden kann. Dies wird bereits in der Literatur erwähnt und kann z.B. durch Anpassung des Exponenten (theoretisch: $n = 3$) behoben werden [DKLH10]. Mit Hilfe von Messzeitreihen wurde der Wert des Exponenten für den vorliegenden Fall auf 1,75 ermittelt, so dass nun für den Energiebedarf der ULK-Ventilatoren im Betriebspunkt B im Verhältnis zum Auslegungsbetriebspunkt A Gleichung (11) gilt:

$$P_{Vent,B} = P_{Vent,A} \cdot \left(\frac{\dot{m}_{Luft,B}}{\dot{m}_{Luft,A}} \right)^{1,75} \cdot \eta_{th} \quad (11)$$

Auch werden die Pumpen nicht modelliert, sondern als konstanter Energiebedarf berücksichtigt, da sie wegen der geringen RZ-Auslastung derzeit mit minimaler Drehzahl betrieben werden und ihr Strombedarf daher keinen zeitlichen Schwankungen unterliegt. Die Ausprägungen der Parameter für das RZ zeigt Tabelle 1.

Tabelle 1: Ausprägungen spezifischer Modelldaten für das RZ

Komponente	Werte
UKG	$w_{Luft} = 0,995$ $w_{Antifrogen} = 0,005$ $n_{Vent} = 1,75$
Pumpen	$P_{Pumpen} = const.$
Freikühler	$w_{Luft} = 0,995$ $w_{Antifrogen} = 0,005$ $COP = (2,68007 \cdot 10^{-6} t_{Antifrogen}^4 - 9,08379 \cdot 10^{-6} t_{Antifrogen}^3 \cdot t_{au\beta en}$ $+ 1,8774 \cdot 10^{-4} t_{Antifrogen}^3 + 1,18348 \cdot 10^{-5} t_{Antifrogen}^2 \cdot t_{au\beta en}^2$ $- 4,78435 \cdot 10^{-4} t_{Antifrogen}^2 \cdot t_{Antifrogen} + 0,00627 t_{Antifrogen}^2$ $- 6,70686 \cdot 10^{-6} t_{Antifrogen} \cdot t_{au\beta en}^3 + 3,92444 \cdot 10^{-4} t_{Antifrogen} \cdot t_{au\beta en}^2$ $- 0,0108 t_{Antifrogen} \cdot t_{au\beta en} + 0,2084 t_{Antifrogen} + 1,41479 \cdot 10^{-6} t_{au\beta en}^4$ $- 1,11295 \cdot 10^{-4} t_{au\beta en}^3 + 0,00466 t_{au\beta en}^2 - 0,1751 t_{au\beta en} + 5,22938) \cdot 2$
Kältemaschinen	

Aus den Gegebenheiten im RZ resultieren die in Tabelle 2 dargestellten nicht zeitabhängigen Modellparameter. Zur Validierung sind alle Messreihen, die einen Beitrag zum Energiebe-

Tabelle 2: Annahmen der nicht zeitabhängigen Parameter zur Validierung des Gesamtenergiebedarfs über 8 Monate

Parameter	Wert
Anzahl Serverräume	1
Luftfeuchtigkeit im Serverraum	50%
Anzahl UKG	15
Luft Eintrittstemperatur	295, 65K
Luft Austrittstemperatur	300, 65K
Antifrogen-Eintrittstemperatur	290, 15K
Antifrogen-Austrittstemperatur	296, 15K

darf der Infrastruktur leisten (USV, UKG, Freikühler, Kältemaschinen und Pumpen) mit den Berechnungsergebnissen des Frameworks für beide Intervalle verglichen worden.

Die zugrundeliegenden Messungen wurden mit Messwandlern und Messgeräten durchgeführt, deren Genauigkeit mit 3 % angegeben wird. Die Unsicherheit bzgl. der Außentemperatur kann aufgrund von lokalen Temperatureffekten stark sein. Der Fehler der COP-Funktion ergibt sich dabei aus ihrem totalen Differential und ist sehr sensitiv. Bei einer Abweichung der Außentemperatur um 1 K verändert sich der COP um 1. Beim Feikühler ist die Außentemperatur ebenfalls ein wichtiger Parameter, aber führt erst bei größeren Abweichungen (ca. 5 K) zu signifikanten Änderungen im Energiebedarf. Die Abweichungen von simuliertem und gemessenem Gesamtenergiebedarf der RZ-Infrastruktur für die beiden Intervalle ist in Abbildung 2 dargestellt. Der Bereich des Messfehlers ist in einem transparenten Streifen dargestellt. Aggregierte Ergebnisse zeigt Tabelle 3.

In Abbildung 2 ist zu erkennen, dass eine auffallend große Schwankung der Abweichungen (bis zu 50 %) vor allem in wärmeren Phasen sowohl in den positiven als auch den negativen Bereich auftritt. Die Schwankungen sind beim 15 Minutenintervall auffälliger als beim 240 Minutenintervall. Eine genaue Analyse zeigt, dass die Schwankungen auf die Kältemaschinen zurückzuführen sind und sich im Zeitverlauf teilweise ausgleichen. Dies liegt daran, dass das verwendete Polynom nicht das Takten der Kältemaschine (Hysterese) abbildet. Daher lässt sich mit ihm kein genauer Energiebedarf prognostizieren. Je kleiner das betrachtete Zeitintervall wird, desto größer die Abweichung. Um bessere Ergebnisse für kleine Zeitintervalle zu erzielen, müsste das COP-Polynom durch eine andere Funktion ersetzt werden. Zusätzlich kann die mit Unsicherheit behaftete Außentemperatur $t_{außen}$ Grund für die deutliche Abweichung sein. Da die UKG an die vorhandenen Daten angepasst wurden, kann keine Auskunft zu deren Einfluss auf die Modellgenauigkeit gemacht werden.

Tabelle 3: Ergebnisse der Validierung

System	Monat	Mittlere Leistungsaufnahme [kW] (I=15 min)			Mittlere Leistungsaufnahme [kW] (I=240 min)		
		Framework	Real	Abweichung [%]	Framework	Real	Abweichung [%]
USV	Aug. 12 - Apr. 13	11,16	13,97	-20,11	11,16	13,97	-20,11
UKG	Feb. 13 - Apr. 13	2,03	2,03	0	2,03	2,03	0
Freikühler	Aug. 12 - Apr. 13	1,42	1,26	12,7	1,39	1,26	10,32
Kälteanlage	Aug. 12	44,22	42,54	3,9	44,63	44,32	0,7
	Apr. 13	11,03	10,98	0,46	10,7	10,98	-2,55
Pumpe	Aug. 12 - Apr. 13	25	24,06	3,91	25	24,06	3,91
Gesamt	Aug. 12 - Apr. 13	56,58	60,07	-5,81	56,46	60,07	-6,01

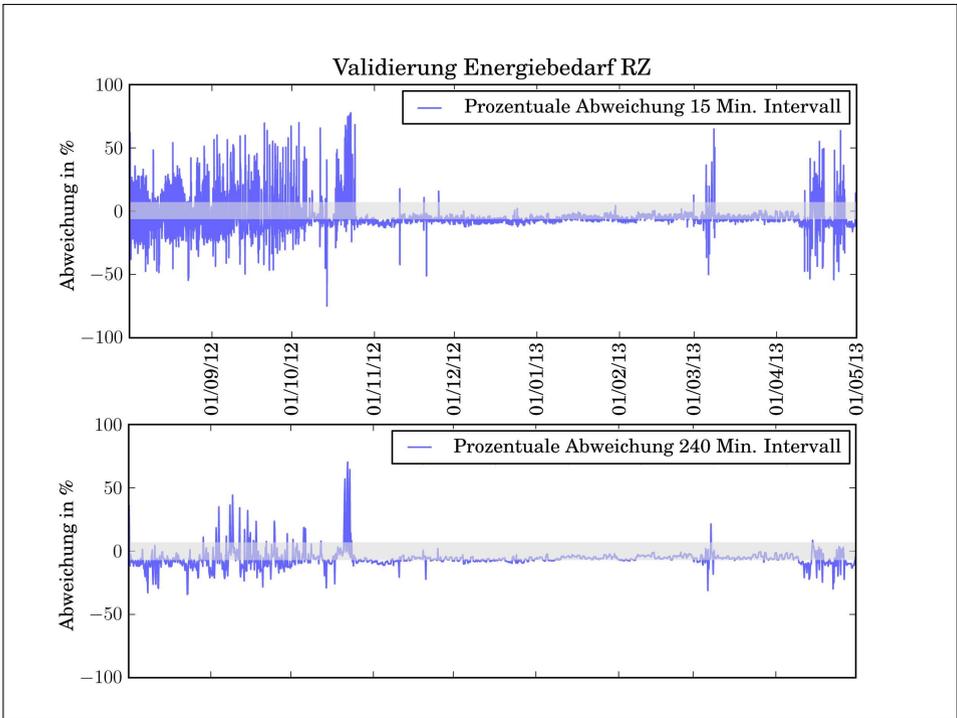


Abbildung 2: Abweichungen des simulierten und gemessenen Gesamtenergiebedarfs der verschiedenen Messintervalle (Zeitraum: 01.08.2012 bis 30.04.2013)

Einen Hinweis liefert hier der Freikühler, der analog modelliert wurde. Die Abweichungen liegen meistens im moderaten Bereich zwischen 5 und 10 %. Die Abweichungen fallen wegen des niedrigen Energiebedarfs des Freikühlers im Vergleich zu den anderen Komponenten nicht ins Gewicht. Die Pumpen laufen wie bereits erwähnt wegen der niedrigen Auslastung mit der niedrigsten Drehzahl, die Abweichung liegt im Bereich des Messfehlers.

5 Fazit und Ausblick

Die Vorteile des Modells liegen in seiner einfachen und schnellen Anwendbarkeit und der Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Strukturen. Allerdings zeigte sich auch bei der Datenbeschaffung für die Validierung, dass viele erforderliche Daten bisher nicht kontinuierlich von den RZ-Betreibern erfasst werden. Hier sind derzeit allerdings große Fortschritte zu beobachten. Wenn RZ-Betreiber über Prognosemodelle für den Leistungsbedarf ihrer IT-Komponenten verfügen, kann ein wie in diesem Beitrag vorgestellter Modellansatz genutzt werden, um den Energiebedarf der Infrastruktur zu bestimmen. Die bisherige

gen Modellierungsansätze sind dabei vor allem für große Zeitbereiche geeignet. Fraglich ist allerdings, ob durch Parameteranpassung die diskreten bzw. quasi-stationären Modelle die notwendige Genauigkeit für zukünftige Smart Grid-Anwendungen erreichen können (vor allem bei der Modellierung von taktenden Kälteanlagen). Dafür sollte der Einsatz von einfachen kontinuierlichen, differentiellen Modellen geprüft werden, um die Genauigkeit hinreichend zu steigern (zu jedem Zeitpunkt $< 5\%$).

Literatur

- [BWP⁺10] Thomas J. Breen, Ed J. Walsh, Jeff Punch, Amip J. Shah und Cullen E. Bash. From Chip to cooling tower data center modeling: Part I Influence of server inlet temperature and temperature rise across cabinet. 2010.
- [CW05] Günter Cerbe und Gernot Wilhelms. Technische Thermodynamik. Hanser, 14. Auflage, 2005.
- [Dem12] Dustin W. Demetriou. Thermally Aware, Energy-Based Techniques for Improving Data Center Energy Efficiency. Dissertation, Syracuse University, 2012.
- [DKLH10] Rajarshi Das, Jeffrey O. Kephart, Jonathan Lenchner und Hendrik Hamann. Utility-Function-Driven Energy-Efficient Cooling in Data Centers. 2010.
- [DS09] Lars Dittmar und Marc Schaefer. Electricity Demand Modeling of German Data Centers: Dealing with Uncertainties. Schriftenreihe Innovationszentrum Energie der TU Berlin, Band 1, ISBN 978-3-7983-2168-7, 2009.
- [DWD13] DWD. Web-based Weather Request and Distribution System (WebWerdis). Deutscher Wetterdienst, 2013.
- [GCG⁺12] Anshul Gandhi, Yuan Chen, Daniel Gmach, Martin Arlitt und Manish Marwah. Hybrid resource provisioning for minimizing data center - SLA violations and power consumption. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 2(2):91 – 104, 2012. IEEE International Green Computing Conference (IGCC 2011).
- [Ign07] Eckhard Ignatowitz. Chemietechnik. Europa Verlag, 8. Auflage, 2007.
- [JK12] Yogendra Joshi und Pramod Kumar. Energy Efficient Thermal Management of Data Centers, Kapitel Introduction to Data Center Energy Flow and Thermal Management, Seiten 1–38. Springer, 2012.
- [SBI12] Bahgat Sammakia, Siddharth Bhopte und Mahmoud Ibrahim. Energy Efficient Thermal Management of Data Centers, Kapitel Numerical Modeling of Data Center Clusters, Seiten 335–382. Springer, 2012.
- [SDE⁺12] Björn Schödwell, Gregor Drenkelfort, Koray Ereğ, Ruediger Zarnekow und Frank Behrendt. Auf dem Weg zu einem ganzheitlichen, quantitativen Bewertungsansatz für Energiemonitoring-Systeme in Rechenzentren. Proceedings zur Informatik, 2012.
- [SNPM09] Lutz Stobbe, Nils F. Nisse, Marina Proske und Andreas Middendorf. Abschätzung des Energiebedarfs der weiteren Entwicklung der Informationsgesellschaft. Bericht, Fraunhofer IZM, 2009.
- [TF05] My Ton und Brian Fortenbury. High Performance Buildings: Data Centers Uninterruptible Power Supplies (UPS). LBNL, 2005.

- [VG06] Verein Deutscher Ingenieure und Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen. VDI-Wärmeatlas. Springer, Berlin ua, 10., bearb. und erw. aufl.. Auflage, 2006.
- [VJF⁺13] Georgios Varsamopoulos, Michael Jonas, Joshua Ferguson, Joydeep Banerjee und Sandeep K.S. Gupta. Using transient thermal models to predict cyberphysical phenomena in data centers. Sustainable Computing: Informatics and Systems, (0), 2013.
- [WBP⁺10] Ed J. Walsh, Thomas J. Breen, Jeff Punch, Amip J. Shah und Cullen E. Bash. From chip to cooling tower data center modeling: Part II Influence of chip temperature control philosophy. 2010.
- [WDD12] Marc Wilkens, Gregor Drenkelfort und Lars Dittmar. Bewertung von Kennzahlen und Kennzahlensystemen zur Beschreibung der Energieeffizienz von Rechenzentren. Schriftenreihe Innovationszentrum Energie der TU Berlin, Band 3, ISBN 978-3-7983-2432-9, 2012.