

freie Kühlung • Rechenzentrum • PUE • Kältgestehungskosten • Simulation • Fallstudie

Dieser Artikel soll neue Erkenntnisse über die Konkurrenzsituation zwischen verschiedenen Kälteerzeugungsverfahren zur Kühlung eines Rechenzentrums vermitteln. Dazu wurden mit der Simulationssoftware TRNSYS [1] ein herkömmliches System der Kälteerzeugung mit Kompressionskältemaschinen sowie zwei Systeme mit freier Luft- oder Wasserkühlung numerisch modelliert. Der erste Teil dieser dreiteiligen Serie behandelt den energetischen und ökonomischen Vergleich der Systeme. Die Randbedingungen der Simulation sind dabei konstant.

Data Centre Cooling, Part 1: Technical Solutions for Free Cooling

free cooling • data centre • PUE • cooling cost • simulation • case study

This article gives new insights into the competitive situation amongst different cooling technologies in data centres. Therefore, the simulation tool TRNSYS [1] is used to numerically model a conventional cooling system with a water-cooled chiller, as well as two free cooling systems with one using water and the other using air as a heat transfer medium. The first part of this three-part series focuses on comparing the energetic and economic performance of free cooling. The boundary conditions of the simulation are held constant.



Bild: Wolfgang Thiem

Autoren

(v.l.o.): Luca Holzhauser, Thorsten Urbaneck, Noah Pflugradt, Nirendra Lal Shrestha, Bernd Platzer
Fakultät für Maschinenbau, Institut für Mechanik und Thermodynamik, Professur Technische Thermodynamik, TU Chemnitz

Kühlung von Rechenzentren, Teil 1: Technische Varianten zur freien Kühlung

Einleitung

In Rechenzentren werden zentralisiert Rechenleistung und Datenspeicherung bereitgestellt. Im Zuge der Digitalisierung, also dem Wandel hin zu elektronisch gestützten Prozessen mittels Informations- und Kommunikationstechnik, wächst die Nachfrage nach solchen angebotenen IT-Leistungen stark an [2].

Im Jahr 2015 verbrauchten Rechenzentren 2% des in Deutschland erzeugten Stroms [3]. Ein Großteil davon verursacht die Kühlung. Um den Betrieb von Rechenzentren günstig und umweltfreundlich zu gestalten, soll dieser Stromverbrauch gesenkt werden. In den Berichten 4.3 und 4.4 aus dem von der EU geförderten RenewIT-Projekt, sind die vielfältigen Ansätze beschrieben [4], [5]. Erste Untersuchungen in diesem Projekt zeigen das hohe Potenzial der freien Kühlung [6]. Sie erlaubt die Nutzung der Umgebung als natürliche Wärmesenke, ohne dass eine stromintensive Kältemaschine zwischengeschaltet wird.

Im Mittelpunkt dieser Fallstudie stehen die möglichen Einsparpotenziale durch die *freie Kühlung*, wobei eine Konkurrenzsituation zwischen den technischen Lösungen mit den Wärmeträgern Luft und Wasser besteht. Hier soll eine vergleichende Untersuchung mit festgelegten Randbedingungen die oben genannten Arbeiten [4], [5] fortführen. Für die numerische Modellierung der IT- und Energietechnik kommt wiederum die Simulationssoftware TRNSYS [1] zum Einsatz.

So erfolgt die Unterscheidung je nach eingesetztem Wärmeträgermedium in *freie Kühlung mit Luft* (FKL) und *freie Kühlung mit Wasser* (FKW). Bei der hier gewählten indirekten freien Kühlung mit Luft kühlt ein Plattenwärmeübertrager die aufgewärmte Umluft aus dem Serverraum mit aus der Umgebung angesaugter Luft. Bei der freien Kühlung mit Wasser erfolgt die Abkühlung in einem Nasskühler. Diese Verfahren zur Kälteerzeugung durch freie Kühlung sind typische Beispiele und decken daher die vielfältigen Ausführungsmöglichkeiten weitestgehend ab. Die Schlussfolgerungen

aus den Ergebnissen sollen eine verbesserte Bewertung der Konkurrenzsituation zwischen den verschiedenen Kälteerzeugungsverfahren zur Kühlung eines Rechenzentrums erlauben.

Als Bewertungsgrundlage der Energieeffizienz der Kältebereitstellung dienen in dieser Betrachtung die folgenden Kennzahlen:

1. *Power Usage Effectiveness* (PUE, Verhältnis von aufgewendeter elektrischer Arbeit des gesamten Rechenzentrums zu dem Bedarf der IT-Komponenten),
2. *Water Usage Effectiveness* (WUE, Verhältnis von im Kühlsystem verbrauchtem Wasser zu aufgewendeter elektrischer Arbeit der IT-Komponenten) und
3. *Jahresarbeitszahl* (ϵ_a ; Verhältnis von produzierter Kälte zur dafür aufgewendeten elektrischen Arbeit) [2].

Die ökonomische Bewertung erfolgt anhand der

4. *Kältgestehungskosten* (KGK).

Diese werden gebildet, indem man die nach der VDI 2067 ermittelten Jahresgesamtkosten ins Verhältnis zur jährlich in den Serverraum gelieferten Kältemenge setzt [7].

Simulation

Das in dieser Arbeit modellierte Rechenzentrum hat eine IT-Nennleistung von 400 kW, steht in urbaner Lage in Bayern und hat einen luftgekühlten Serverraum. Die maximal zulässige Lufteintrittstemperatur beträgt 22 °C bei einer Temperaturdifferenz ΔT zwischen Lufteintritts- und Luftaustrittstemperatur von 10 K. Das verwendete IT-Lastprofil entspricht Hochleistungsberechnungen, welche typisch für eine Universität sind.

Abbildung 1 zeigt vereinfacht das hydraulische Schaltbild des Kältebereitstellungssystems (KBS) einschließlich der Einteilung einzelner Subsysteme. Im Umluftsystem (ULS) kühlt Umluft den Serverraum und die weiteren Wärmelasten des Rechenzentrums. Die aufgenommene Wärme wird anschließend über einen Plattenwärmeübertrager an das



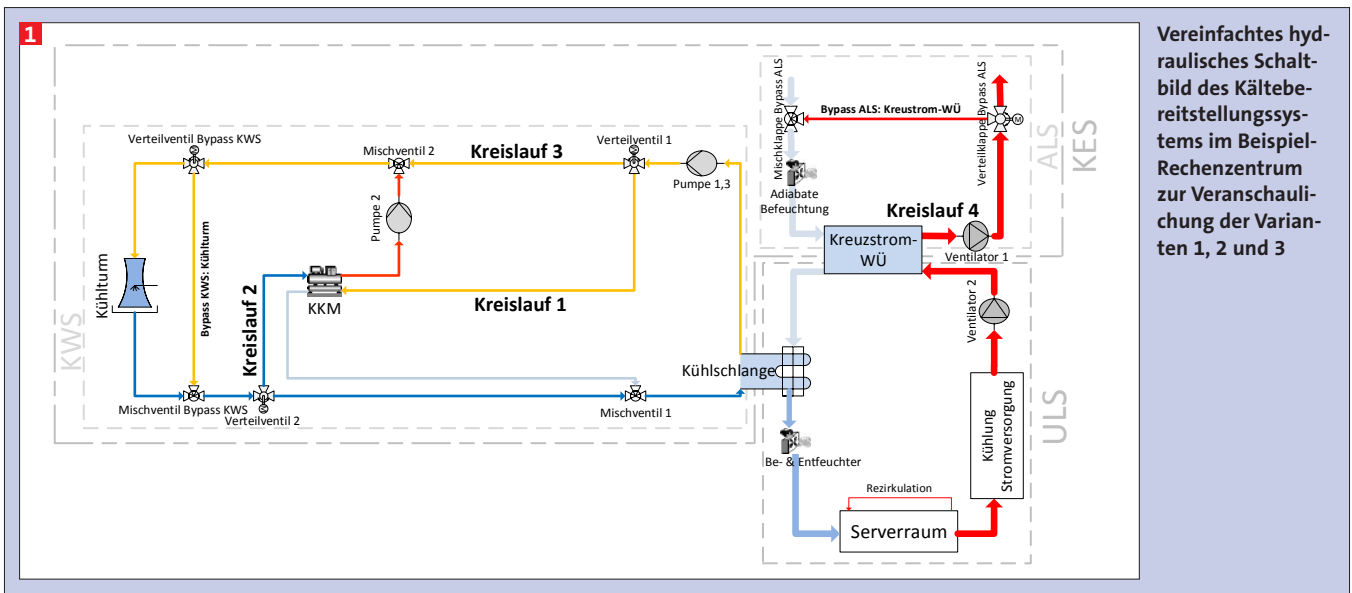
KI Kälte · Luft ·
Klimatechnik
INGENIEURWISSEN IN FORSCHUNG UND PRAXIS



Entdecken Sie weitere interessante
Artikel und News zum Thema auf
ki-portal.de!

Hier klicken & informieren!





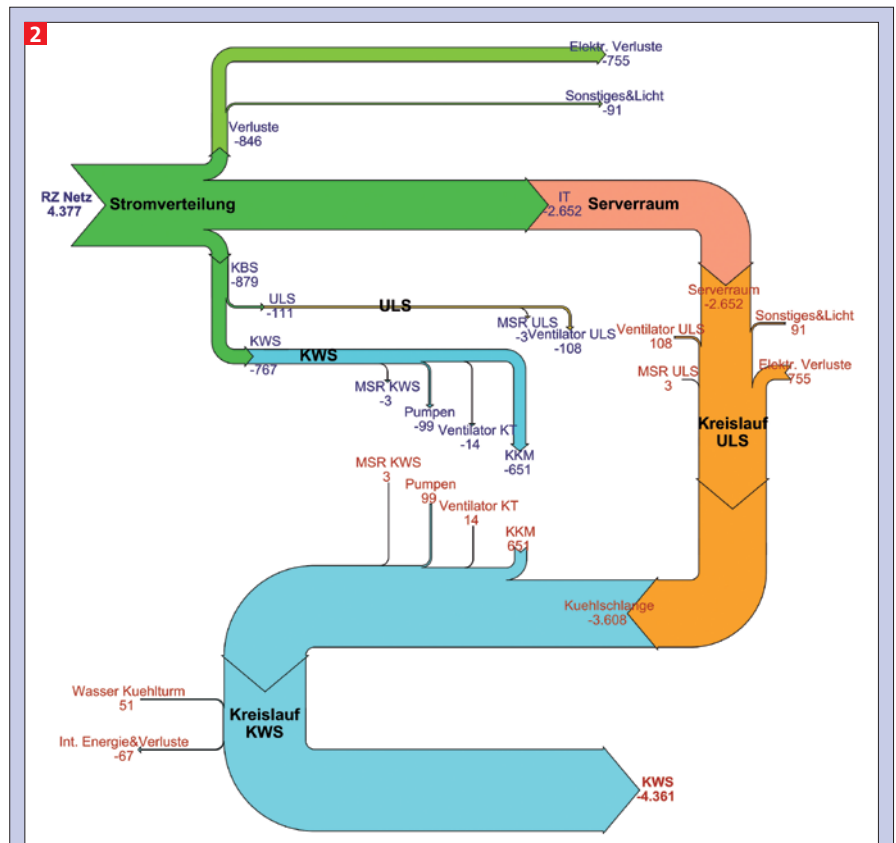
Vereinfachtes hydraulisches Schaltbild des Kältebereitstellungssystems im Beispiel-Rechenzentrum zur Veranschaulichung der Variante 1, 2 und 3

Außenluftsystem (ALS) oder über eine Kühlschlange¹ an das Kaltwassersystem (KWS) übertragen. Kaltwasser- und Außenluftsystem zusammen bilden das Kälteerzeugungssystem (KES).

Als Referenzkühlsystem wird mit Variante 1 ein herkömmliches Kaltwassersystem mit Kompressionskältemaschinen modelliert (Kreislauf 1). Die Rückkühlung der Kompressionskältemaschine erfolgt durch einen Nasskühler mit einem Kühlgrenzabstand von 3 K und einer Kühlzonenbreite von 9 K (Kreislauf 2). Die *freie Kühlung mit Luft* bildet Variante 2 ab. Sie erfolgt im Außenluftsystem durch Kreislauf 4. Durch das Versprühen von Wasser in der Zuluft (adiabate Befeuchtung) kann bei Bedarf auch bei der freien Kühlung mit Luft eine Abkühlung unterhalb der Trockenkugeltemperatur der Umgebungsluft erfolgen. Die Modellierung der *freien Kühlung mit Wasser* entspricht Variante 3. Der Kreislauf 3 verbindet die Kühlschlange mit dem Kühlturm, um dort das Wasser abzukühlen. Zur numerischen Modellierung der Systeme wurde die Simulationssoftware TRNSYS unter Nutzung der *Green Data Centre Library* eingesetzt [8].

Energetische Bewertung

Abbildung 2 stellt die jährlichen Energiemengen der Referenzvariante 1 in einem Sankey-Diagramm dar. Diese Abbildung zeigt die aus dem Netz entnommene elektrische Energie; wie diese im Rechenzentrum verteilt, in Wärme dissipiert und schließlich über den Kühlturm an die



Sankey-Diagramm für die Energiebilanz der Variante 1; Simulationsergebnisse für ein Jahr in MWh, elektrische Arbeit in blauer und Wärmemengen in roter Schrift

Umgebung abgegeben wird. Der Anteil der elektrischen Energie des Kältebereitstellungssystems am gesamten Rechenzentrumsstromverbrauch liegt bei 20%. Dazu kommen weitere 20% elektrische Verluste und 60% unmittelbarer Verbrauch in den IT-Komponenten. Daraus ergibt sich ein PUE-Wert von 1,651 (vgl. linke Spalte in Tabelle 1). Innerhalb des

Kältebereitstellungssystems stellt die Antriebsenergie der Kompressionskältemaschine (KKM) den Hauptstromverbraucher dar.

Die Energiebilanz der *freien Kühlung mit Luft* liefert Abbildung 3. Es fällt auf, dass die über das Kaltwassersystem abgeführte Energiemenge in dieser Variante sehr klein ist. Die Wärmeabfuhr er-

¹ Luft-Wasser-Wärmeübertrager als Rippenrohr-Konstruktion

1 Übersicht über die Kennzahlen der untersuchten Varianten; die jeweils energetisch oder finanziell beste (schlechteste) Variante ist in grün (rot) dargestellt

Kennzahl	Variante 1 – Kompressionskälte	Variante 2 – Freie Kühlung mit Luft	Variante 3 – Freie Kühlung mit Wasser
PUE	1,651	1,360	1,454
WUE	1,670 kg/kWh	0,159 kg/kWh	1,394 kg/kWh
$\epsilon_{0,KBS}$	3,02	12,68	6,24
KGK_{KBS}	0,069 €/kWh	0,047 €/kWh	0,042 €/kWh

folgt hier beinahe ausschließlich über das Außenluftsystem. Der Stromverbrauch des Außenluftsystems ist dabei weniger als doppelt so hoch wie der Stromverbrauch des Kaltwassersystems. Das Außenluftsystem führt aber ein Vielfaches der Wärme ab, arbeitet also deutlich effizienter. Dies zeigt sich auch in der Jahresarbeitszahl des Kältebereitstellungssystems. Gemäß Tabelle 1 vervierfacht sie sich durch die freie Kühlung mit Luft von 3,02 auf 12,68. Als Folge der guten Jahresarbeitszahl sinkt der PUE-Wert auf 1,360. Durch den Einsatz der freien Kühlung mit Luft erfolgt die Kältebereitstellung im Rechenzentrum also deutlich effizienter. Darüber hinaus sinkt auch der Wasserverbrauch signifikant. Im Vergleich zu der Referenzvariante, liegt der WUE-Wert bei 0,159 kg/kWh und ist damit um den Faktor 10 niedriger.

Die Jahresenergiemengen der Variante 3 zur freien Kühlung mit Wasser sind in Abbildung 4 dargestellt. Der gesamte Stromverbrauch ist von 3.607 MWh/a bei

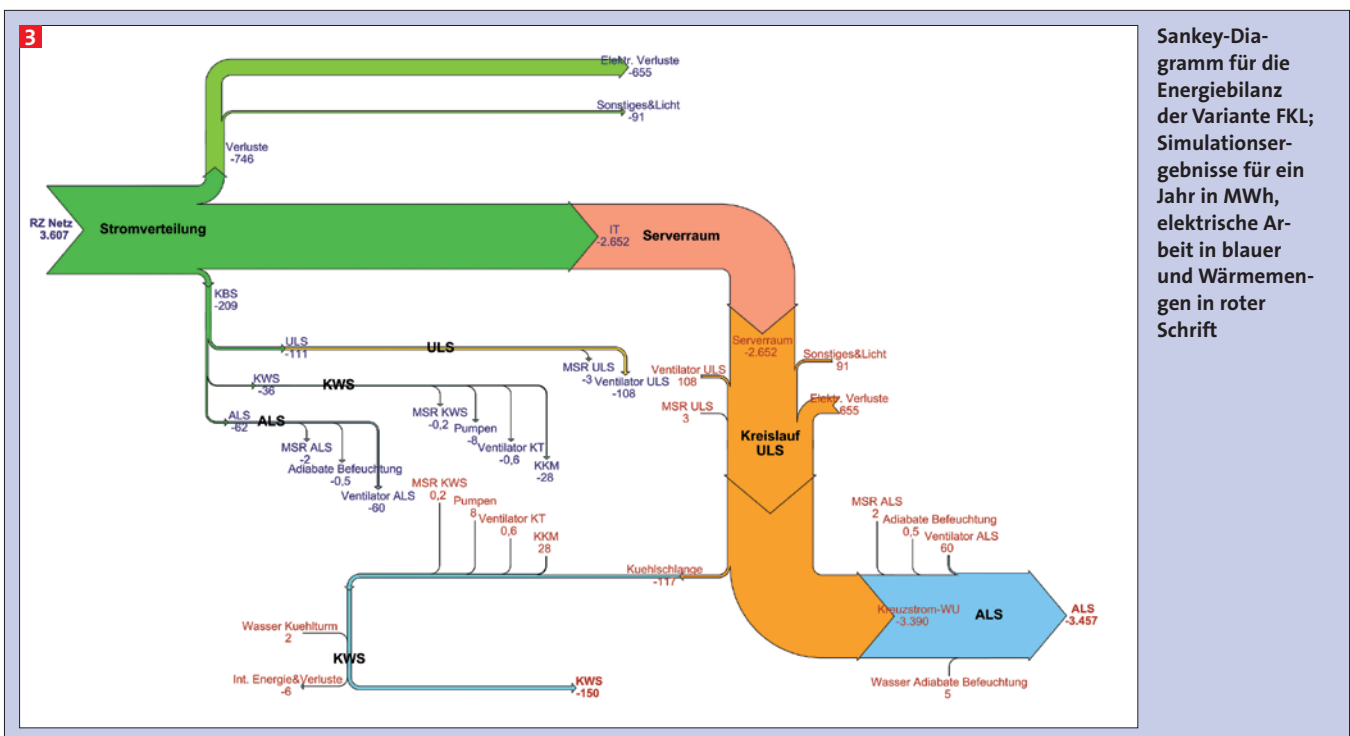
der freien Kühlung mit Luft auf 3.855 MWh/a angestiegen. Bei gleichbleibender IT-Last steigt dadurch der PUE-Wert im Vergleich zu Variante 2 von 1,360 auf 1,454. Der sich aus dem Wasserverbrauch im Nasskühler ergebende WUE-Wert liegt mit 1,394 deutlich oberhalb der Variante 2 und nur etwas unterhalb des Wertes der Variante 1. Die freie Kühlung mit Wasser ist also energetisch schlechter als die freie Kühlung mit Luft. Bezogen auf den Stromverbrauch ist sie aber deutlich besser als reine Kompressionskälte.

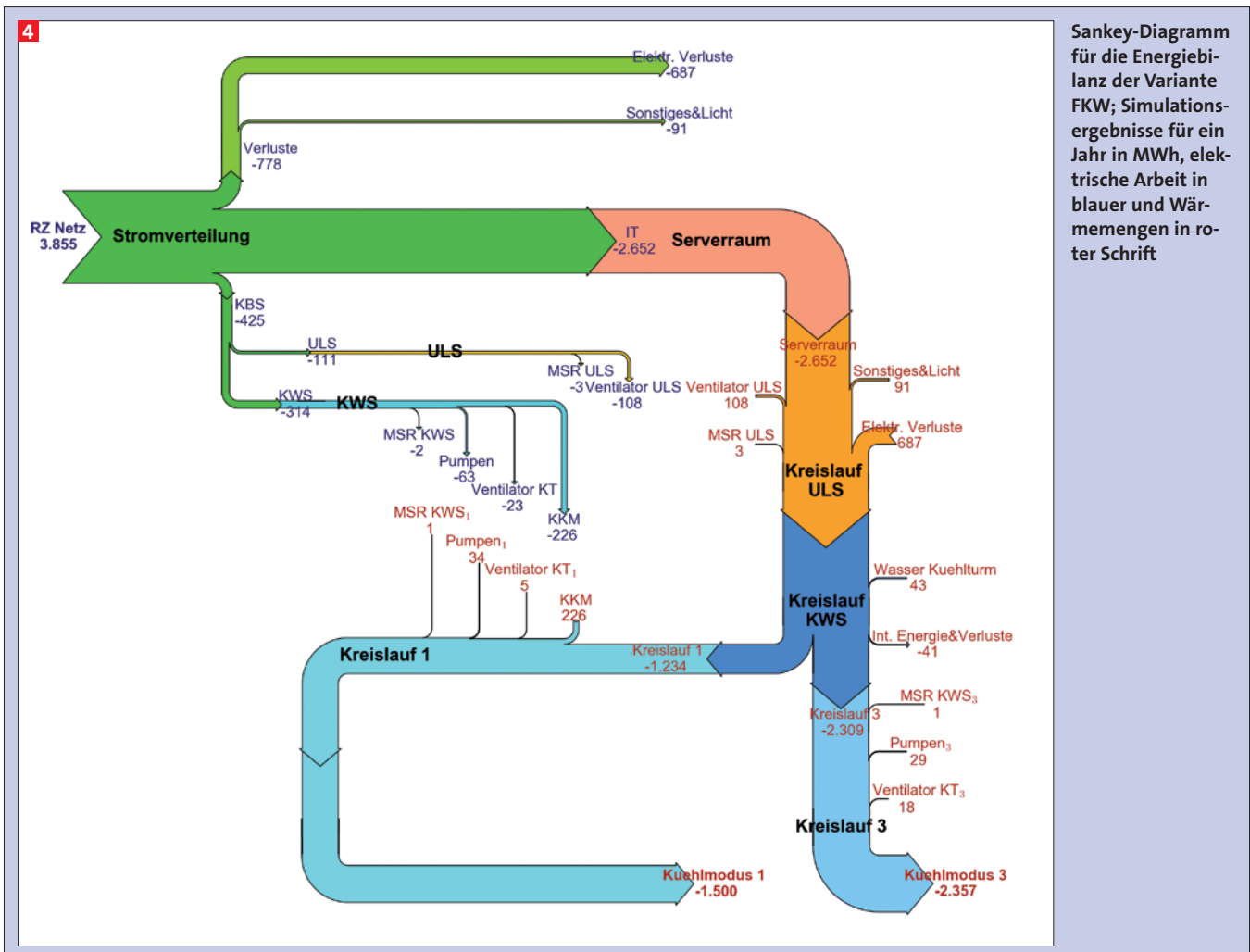
Mit 2357 MWh/a wird der Großteil der abzuführenden Wärme durch die freie Kühlung an die Umgebung abgegeben. Es fällt jedoch auf, dass der Anteil der Kompressionskälte mit 1500 MWh/a relativ groß ist. Dies liegt an einer aus Stabilitätsgründen angepassten Regelung des Systems. In Variante 2 wird die freie Kühlung mit Luft bei Bedarf durch die Kompressionskältemaschinen unterstützt, um die angestrebte Serverraum-Eintrittstemperatur zu erreichen (Kreislauf 1 und 2 sowie

4). So ist selbst an sehr warmen Tagen noch ein hoher Anteil der freien Kühlung an der Kälteerzeugung möglich. Eine solche Unterstützung der freien Kühlung mit Wasser durch die Kompressionskältemaschinen konnte dagegen bei Variante 3 nicht erhalten werden. Bei der gleichzeitigen Nutzung des Kühlturms durch die Kältemaschinen und durch die freie Kühlung (Kreislauf 1 und 2 sowie 3) kam es bei ersten Tests der Simulation nicht zur Konvergenz der Ergebnisse im jeweiligen Zeitschritt. Dies betrifft hauptsächlich Zeitschritte im Sommerhalbjahr, in denen höhere Temperaturen vorliegen. Sie verantworten einen Großteil des höheren Stromverbrauchs der Variante 3 im Vergleich zur Variante 2. Deutlich wird dies in Abbildung 5, in der für die drei Varianten die PUE-Durchschnittswerte im Verlauf eines Jahres dargestellt sind. Betrachtet man nur die Wintermonate, in denen der Regelungsunterschied aufgrund durchgehend kalter Temperaturen nicht zum Tragen kommt, sind die PUE-Werte der freien Kühlung mit Luft nur geringfügig besser.

Ökonomische Bewertung

Berücksichtigt man neben der energetischen auch die ökonomischen Kennzahlen, erzielt die freie Kühlung mit Wasser das beste Ergebnis. Abbildung 6 zeigt den Vergleich der Investitionskosten und der Kostenstruktur der Jahresgesamtkosten für das Kälteerzeugungssystem der drei Varianten. Die Kosten des Umluft-





systems sind unabhängig von der gewählten Variante und kommen deswegen nicht zum Ansatz. Während bei der freien Kühlung mit Luft (hellgrün) die Komponenten des Außenluftsystems komplett neu eingebaut werden müssen, sind die zusätzlichen Investitionskosten einer freien Kühlung mit Wasser gering (hellblau). Das für heiße Sommerstage ohnehin benötigte Kaltwassersystem muss nur leicht modifiziert werden. Daraus ergeben sich sehr niedrige Kapitalkosten und durch den Einsatz der freien Kühlung gleichzeitig auch niedrige verbrauchsgebundene Kosten. Folglich liegen die Jahresgesamtkosten der freien Kühlung mit Wasser mit ca. 70.000 €/a

- ca. 11.000 €/a unterhalb der Jahresgesamtkosten der freien Kühlung mit Luft und
- ca. 70.000 €/a unterhalb der Jahresgesamtkosten der reinen Kompressionskälte.

Entsprechend ergeben sich die in Tabelle 1 dargestellten Kältegestehungskosten in Höhe von 0,042 €/kWh für die freie Küh-

lung mit Wasser im Vergleich zu 0,047 €/kWh für die freie Kühlung mit Luft und 0,069 €/kWh für die Kompressionskälte.

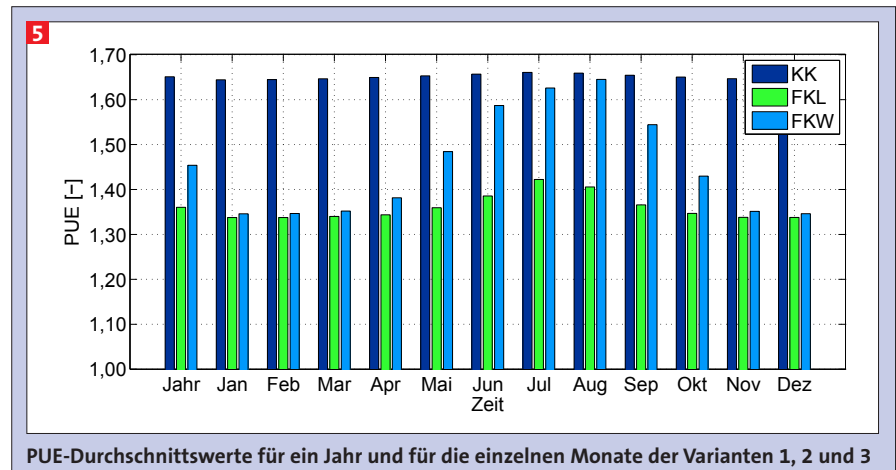
Zusammenfassung

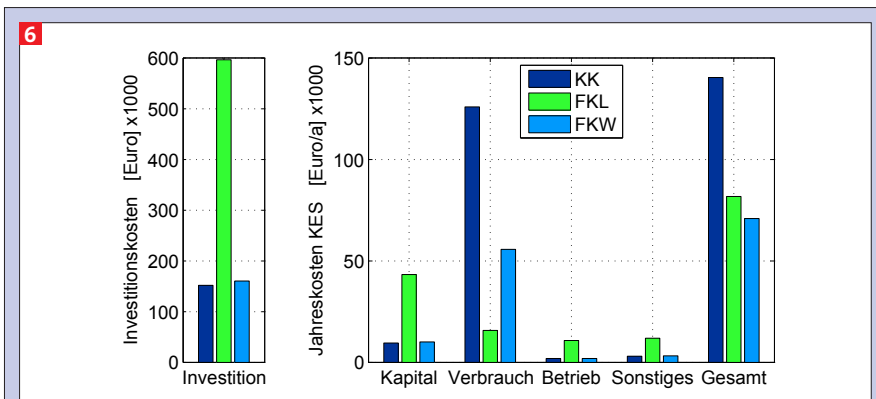
Die Nutzung der freien Kühlung erlaubt im Vergleich zur herkömmlichen Kompressionskälte eine energetisch und wirtschaftlich deutliche effizientere Käl-

tebereitstellung beim betrachteten Rechenzentrum.

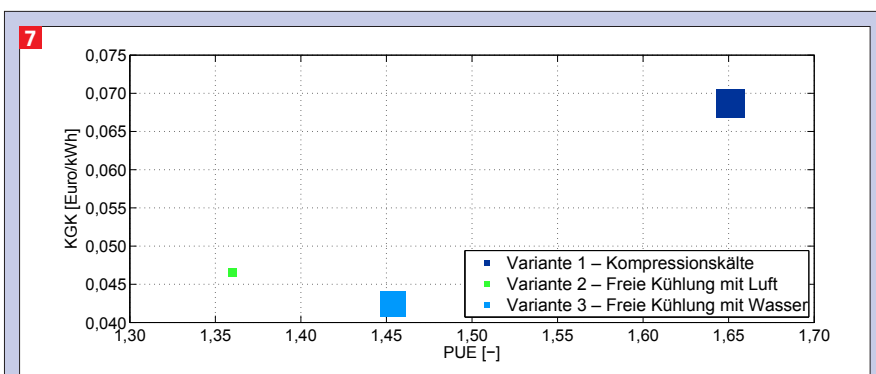
Die freie Kühlung mit dem Wärmeträger Luft ist bei rein energetischer Betrachtung im Vorteil, da sie den niedrigsten Stromverbrauch und den mit Abstand niedrigsten Wasserverbrauch aufweist.

Durch die freie Kühlung mit dem Wärmeträger Wasser kann jedoch ein optima-





Investitionskosten und Kostenstruktur der Jahresgesamtkosten des Kälteerzeugungssystems für Variante 1, 2 und 3



Übersicht zu den Kältegestehungskosten, dem PUE- und dem WUE-Wert; der WUE-Wert ist relativ als Größe des jeweiligen Rechtecks dargestellt

Abkürzungsverzeichnis

Lateinische Buchstaben		
Symbol	Beschreibung	Einheit
KGK	Kältegestehungskosten	[€/kWh]
PUE	Power Usage Effectiveness	[-]
WUE	Water Usage Effectiveness	[kg/kWh]
Griechische Buchstaben		
Symbol	Beschreibung	Einheit
ΔT	Temperaturdifferenz	[K]
ϵ_a	Jahresarbeitszahl	[-]
Abkürzungen und Indizes		
Symbol	Beschreibung	
ALS	Außenluftsystem	
FKL	freie Kühlung mit Luft	
FKW	freie Kühlung mit Wasser	
IT	Informationstechnik	
KBS	Kältebereitstellungssystem	
KES	Kälteerzeugungssystem	
KK	Kompressionskälte	
KKM	Kompressionskältemaschine	
KT	Kühlturm	
KWS	Kaltwassersystem	
MSR	Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik	
ULS	Umluftsystem	
WÜ	Wärmeübertrager	

ler Kompromiss aus niedrigen Kapitalkosten und niedrigen verbrauchsgebundenen Kosten erreicht werden. Darüber hinaus besteht bei der freien Kühlung mit Wasser mithilfe einer verbesserten Regelung weiteres Potenzial, den Stromverbrauch und damit auch die verbrauchsgebundenen Kosten annähernd auf das Niveau der freien Kühlung mit Luft zu senken. Die Zusammenfassung der Ergebnisse ist graphisch in Abbildung 7 dargestellt.

Danksagung

Das diesem Artikel zugrundeliegende Vorhaben ist Teil des RenewIT-Projekts *Advanced concepts and tools for renewable energy supply of IT Data Centres* und wurde mit Mitteln des siebten Rahmenprogramms (RP7) der europäischen Union unter der Finanzhilfvereinbarungsnummer 608679 gefördert. Besonderer Dank gilt auch dem Projektträger für die Unterstützung des Vorhabens. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Literatur

- [1] Klein, S. A. u.a.: TRNSYS 17: A Transient System Simulation Program. Software and User's Guide, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, USA, 2014.
- [2] Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V. (Bitkom e.V.): Energieeffizienz in Rechenzentren – Leitfaden, Berlin, 2015.
- [3] Hintermann, R.: Rechenzentren – Energiefresser oder Effizienzwunder. Internetartikel, Informatik Aktuell, <http://www.informatik-aktuell.de/betrieb/server/rechenzentren-energiefresser-oder-effizienzwunder.html#>, 26.01.2016.
- [4] Shrestha, N.; Oppelt, T.; Urbaneck, T. u.a.: Deliverable D4.3 – Catalogue of advanced technical concepts for Net Zero Energy Data Centres. Forschungsbericht, 2014.
- [5] Shrestha, N.; Pflugradt, N.; Loeck, V. u.a.: Deliverable D4.4 – Report on specifications of technical solutions for energy modelling. Forschungsbericht, 2014.
- [6] Shrestha, N.; Oppelt, T.; Urbaneck, T. u.a.: Deliverable D4.5 – Catalogue of advanced technical concepts for Net Zero Energy Data Centres (Final version). Forschungsbericht, 2014.
- [7] Verein Deutscher Ingenieure (VDI): Richtlinie VDI 2067: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen. September 2012.
- [8] Pflugradt, N.; Shrestha, N. u.a.: Green Data Centre Library – Mathematical Reference. Dokumentation. RenewIT, TRNSYS, 2015.
- [9] Holzhauser, L.: Systematische Untersuchung konkurrierender Verfahren zur Kühlung von Rechenzentren. Masterarbeit, TU Chemnitz, 2016.