CO_2- und Betriebskosteneinsparpotenziale durch die Kopplung digitaler Infrastrukturen mit Fernwärmenetzen

White Paper 2

Revision 1.0, Oktober 2021

Autoren:

Sarah Günther
Stefan Kuitunen

Impressum

© 2021 Cloud & Heat Technologies GmbH

Titel: White Paper 2 - CO_2- und Betriebskosteneinsparpotenziale durch die Kopplung digitaler Infrastrukturen mit Fernwärmenetzen

Revision: Revision 1.0, Oktober 2021

Herausgeber: Cloud & Heat Technologies GmbH,
Königsbrücker Straße 96, 01099 Dresden, Germany

Autoren: Sarah Günther,
Stefan Kuitunen

Korrektorat: Andreas Hantsch,
Ronny Reinhardt,
Ilka Schroth,
Jens Struckmeier,
Rachel Trovarelli,
Conrad Wächter,
Anne Weisemann

Inhalt

1 Executive Summary 5
2 Einleitung 6
3 Direkt-Heißwasserkühlung und Abwärmenutzung mit Cloud&Heat 7
4 Modellberechnung Fernwärmenetz 8
4.1 Methodik 8
4.2 Wärmebedarfsrechnung 10
4.2.1 Warmwasser 10
4.2.2 Gebäudeheizung 10
4.2.3 Skalierung der Wärmesenken 11
4.3 Vorlauftemperatur- und Volumenstromregelung 12
4.4 Wärmeverluste 13
4.5 Berechnung eines Zeitschrittes 15
4.6 Ergebnisse 17
5 Potenzial der Abwärmenutzung wassergekühlter Rechenzentren 18
5.1 Abwärmenutzungspotenzial 18
5.2 Fernwärme & Rechenzentrum - getrennte und gekoppelte Nutzung im Vergleich 20
5.3 Einsparpotenzial 24
5.3.1 Kohlendioxid-Emissionen 24
5.3.2 Betriebsenergiekosten 25
5.3.3 Einfluss des Leistungsverhältnisses Rechenzentrum zu Fernwärmenetz 26
6 Fazit und Ausblick 28

Abkürzungsverzeichnis

abh.	-	abhängig
bzw.	-	beziehungsweise
el./elektr.	-	elektrisch
ERF	-	Energy Reuse Factor
FW	-	Fernwärme
jährl.	-	jährlich
konst.	-	konstant
max.	-	maximal
RZ	-	Rechenzentrum
s.	-	siehe
spez.	-	spezifisch
S.	-	Seite
vgl.	-	vergleiche
V.	-	Verlust

1 Executive Summary

Die voranschreitende Digitalisierung in Kombination mit der Realisierung der Energiewende sorgt für einen wachsenden Bedarf an nachhaltigen IT-Infrastrukturen. Energieversorger haben die sich daraus resultierende Chance entdeckt.

Mit seiner langjährigen Erfahrung im Rechenzentrumsbetrieb sowie im Aufbau von Cloud-Infrastrukturen unterstützt das Unternehmen Cloud&Heat die Energieversorger beim Einstieg in diesen neuen Markt und unterstützt sie, einen Beitrag zur Klimaneutralität zu leisten. Nach dem Prinzip „Power to Data – Data to Heat" ermöglicht die von Cloud&Heat eingesetzte Direkt-Heißwasserkühlung die Nutzung von Rechenzentrumsabwärme in Nah- und Fernwärmenetzen bzw. zur Deckung des eigenen Bedarfs. Die energiesparende Technologie reduziert die Betriebskosten und stellt CO_2-neutrale Wärme zur Nachnutzung bereit.

Mit Hilfe von Modellberechnungen verdeutlicht das vorliegende Whitepaper die CO_2- und Kosteneinsparpotenziale einer gekoppelten Nutzung von Rechenzentren und Fernwärmenetzen. Für den Standort Frankfurt am Main wurden dafür die Betriebsenergiekosten und CO_2-Emissionen bei getrennter und gekoppelter Nutzung eines Rechenzentrums und eines Fernwärmenetzes einander gegenübergestellt.

Durch die kombinierte Nutzung von Rechenzentrum (Nennleistung: 550 kW, Auslastung: 50 %) und Fernwärmenetz (Wärmequelle: erdgasbasierter Heißwassererzeuger, Spitzennutzwärmeleistung: 1 MW) können die jährlichen CO_2-Emissionen um 39,2 % auf 367 t und die Betriebsenergiekosten um 9,8 % auf 543,7 T€ reduziert werden. Rechnerisch ergeben sich so erzielbare Einsparungen von 59,1 T€ und 237 t Kohlendioxid pro Jahr. Um die gleiche Menge CO_2 zu kompensieren, müssten über 18.900 Laubbäume gepflanzt werden, was einer Fläche von 21 Hektar bzw. 30 Fußballfeldern Wald entspricht.

2 Einleitung

Mit seiner weltweit hohen, jährlichen Wachstumsrate von 17,5 %[1] ist der Cloud-Markt eine der für viele Unternehmen aussichtsreichsten Branchen. Nicht zuletzt durch die Nutzung von rechenintensiven Anwendungen in den Bereichen künstliche Intelligenz bzw. "Machine Learning" mit ihren hohen Anforderungen an Datenverarbeitung und -speicherung steigt der Energieverbrauch in Rechenzentren drastisch. Bis 2030 wird der Anteil digitaler Infrastrukturen 4 bis 6 % des gesamten globalen Stromverbrauchs ausmachen.[2] IT-Unternehmen, deren Anwendungen einen hohen Ressourcenverbrauch verursachen, werden sich zunehmend ihrer ökologischen Verantwortung bewusst und haben daher ein gesteigertes Interesse, ihre Anwendungen auf nachhaltigen digitalen Infrastrukturen zu betreiben.

Dies haben auch die Energieversorger erkannt, deren Geschäftsbereiche, wie beispielsweise die Energiegewinnung auf Basis fossiler Brennstoffe, im Zuge der Energiewende zunehmend an Bedeutung verlieren. Auf der Suche nach neuen Geschäftsfeldern bringen sie geeignete Voraussetzungen mit, um sich als Anbieter digitaler Infrastrukturen auf dem Markt zu etablieren: zahlreiche Standorte, weitläufige Infrastrukturen, Netzflexibilität, direkter Zugang zu Energie, Millionen von Bestandskunden sowie reichliche Erfahrung im Strom- und Wärmemarkt.

Cloud&Heat liefert nicht nur die Technologie und das Know-how, um der Energiebranche den Rechenzentrums- und Cloud-Markt zu erschließen, sondern außerdem die Möglichkeit der Nachnutzung CO_2-neutraler Abwärme. Die Vorteile der Cloud&Heat Direkt-Heißwasserkühlung im Vergleich zu konventioneller Luftkühlung, wie beispielsweise die erzielbaren CO_2- und Kosteneinsparpotenziale, wurden am Beispiel des firmeneigenen Rechenzentrums in Frankfurt am Main bereits nachgewiesen[3].

Ziel dieses White Papers ist es, das Einsparpotenzial der Kopplung eines Rechenzentrums (Standort Frankfurt) mit einem Fernwärmenetz anhand einer konkreten Modellberechnung nachvollziehbar und transparent aufzuzeigen.

[1] Quelle: Research and Markets, Cloud Computing Market Report 2020
[2] Quelle: SDIA, The Utility of the Future 2020
[3] Quelle: White Paper 1, Cloud&Heat

3 Direkt-Heißwasserkühlung und Abwärmenutzung mit Cloud&Heat

Rechenzentren wandeln 100 % des IT-Stroms in Wärme um. Ein Server mit 500 W elektrischer Leistungsaufnahme produziert somit 500 W thermische Leistung. Deshalb ist die Kühlung Grundvoraussetzung für einen zuverlässigen Betrieb von Rechenzentren. Um die Energieverbräuche im Rechenzentrum zu minimieren oder dessen Betrieb nachhaltig zu gestalten, können verschiedene Lösungen eingesetzt werden.

Cloud&Heat verfolgt u.a. den Ansatz den energetischen Aufwand für die Kühlung zu minimieren und die Abwärme mit Hilfe einer Direkt-Heißwasserkühlung für die Nachnutzung verfügbar zu machen. Hierbei werden mit Wasser durchströmte Kühlkörper eingesetzt, welche im direkten Kontakt mit den zu kühlenden Bauteilen, wie bspw. den Prozessoren, stehen. Entsprechend wird die thermische Leistung der IT-Komponenten unmittelbar am Ort der Entstehung abgeführt. Abbildung 1 zeigt die Implementierung der Cloud&Heat Direkt-Heißwasserkühlung beispielhaft am Super Micro SuperServer 9029.

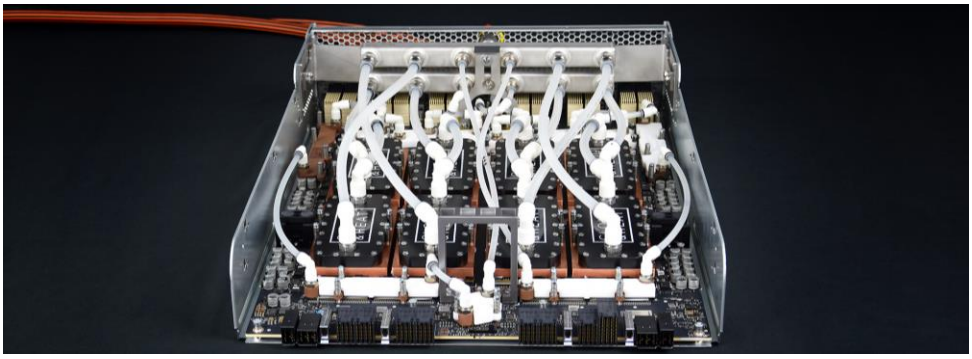

Abbildung 1: Super Micro SuperServer 9029 mit Nvidia HGX-2 Einschub und Cloud&Heat Cooling Kit

In herkömmlichen, luftgekühlten Rechenzentren ist eine wirtschaftliche Nutzung der Abwärme mit Luftaustrittstemperaturen von bis zu 40 °C nur sehr eingeschränkt möglich. Mit der Wasserkühlung wird unter Verwendung geeigneter IT-Hardware durch die präzise Steuerung der Volumenströme ein deutlich höheres Temperaturniveau von bis zu 63 °C erzielt. So kann die Abwärme in typischen Warmwasseranwendungen, wie beispielsweise der Beheizung von Gebäuden, nutzbar gemacht werden. Da die CO_2-Emissionen der Rechenzentrumsnutzung zugeordnet werden, wird dessen Abwärme mit einem Primärenergiefaktor von 0,0 bewertet[4]. Damit ist die Rechenzentrumsabwärme per Definition CO_2-frei.

[4] nach AGFW-Arbeitsblatt FW 309 Teil 1

4 Modellberechnung Fernwärmenetz

Durch die Nachnutzung der Abwärme von Rechenzentren mit Direkt-Heißwasserkühlung in Fernwärmenetzen wird der Primärenergiebedarf für die Bereitstellung der Fernwärme reduziert. Die sich daraus ergebenden ökonomischen und ökologischen Vorteile werden beispielhaft anhand des im Folgenden beschriebenen Modells eines Fernwärmenetzes evaluiert.

4.1 Methodik

Ein Fernwärmenetz besteht maßgeblich aus den drei in Abbildung 2 schematisch dargestellten Hauptkomponenten:

- mindestens einer Wärmequelle, die die Wärme bereitstellt (z. B. ein Heizkraftwerk),
- mindestens einer Wärmesenke, der die Wärme zugeführt werden soll (z. B. ein Wohngebiet) und
- einem Wärmeverteilnetz, dem die Aufgabe des Wärmetransports von der Wärmequelle zur Wärmesenke obliegt.

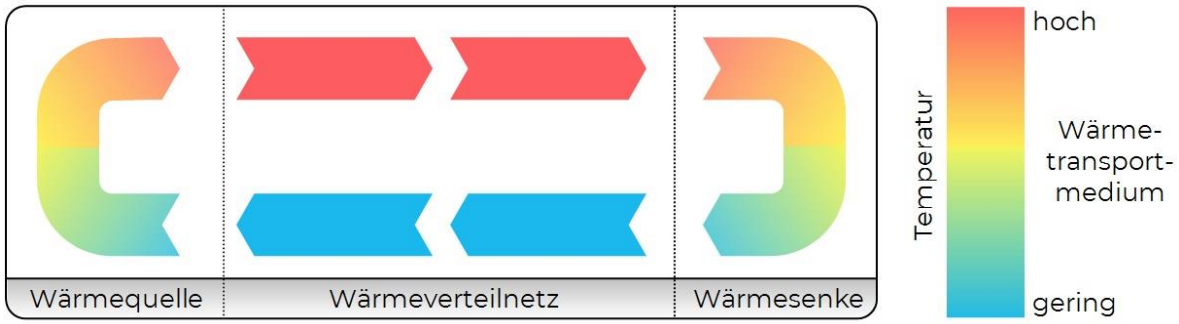

Abbildung 2: allgemeine, schematische Darstellung eines Wärmenetzes anhand des Massestroms und örtlichen Temperaturverlaufes des Wärmetransportmediums

Der zeitliche Verlauf des Wärmebedarfs der Wärmesenke ist dabei sowohl für die Dimensionierung eines Fernwärmenetzes als auch für die Auswahl der Betriebsparameter von maßgeblicher Bedeutung. Als Wärmesenke wurde im Rahmen der Modellrechnung eine per Übertragungsstation an das Fernwärmenetz angeschlossene Wohnfläche gewählt. Dieser wird Wärme sowohl zur Beheizung als auch zur Warmwasserbereitung zugeführt. Um die Skalierbarkeit der Modellrechnung auf verschiedene Fernwärmenetzgrößen zu gewährleisten, wird die Wohnfläche dabei so ausgelegt, dass sich eine maximale Wärmebedarfsleistung von 1 MW ergibt.

Als Primärenergieträger für Fernwärmenetze finden mit einem Anteil von ca. 42 %[5] noch überwiegend gasförmige Energieträger (wie Erdgas) Verwendung. Im Modell dient daher ein mit Erdgas betriebener Heißwassererzeuger (vgl. Abbildung 3, links) als Wärmequelle des Fernwärmenetzes. Das Wärmeverteilnetz wird als jeweils eine Zu- und Rücklaufleitung identischer Länge vereinfacht angenommen.

Die Modellrechnung bezieht sich auf den Standort Frankfurt am Main im Jahr 2019 und weist eine stündliche Auflösung auf. In Abbildung 3 (rechts) sind die in diesem Zusammenhang verwendeten Temperaturdaten (Lufttemperatur in 2,0 m Höhe, Erdbodentemperatur in 0,5 m Tiefe) dargestellt.

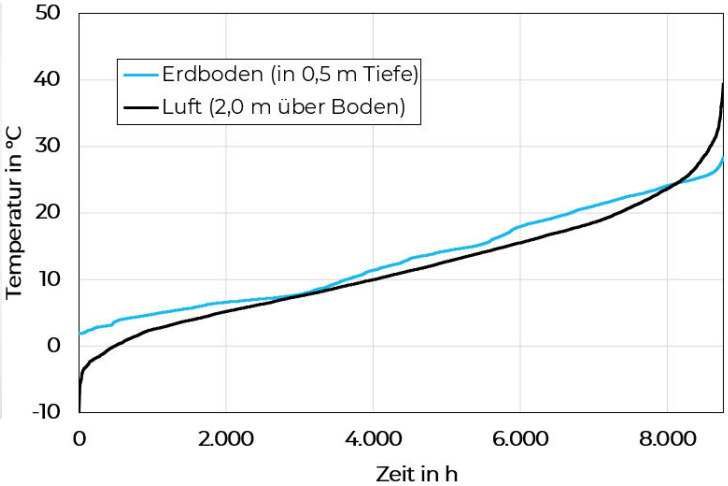

Abbildung 3: links - mit Erdgas betriebener Niederdruckheißwasserkessel (Beispiel)[6]; rechts - stündliche Daten der Luft- (2,0 m Höhe) und Erdbodentemperatur (in 0,5 m Tiefe) jeweils als Jahresdauerlinien am Standort Frankfurt am Main für das Jahr 2019[7]

[5] Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, Energiebilanz für Deutschland, Stand 08/2018
[6] Quelle: Niederdruckheißwassererzeuger Vitomax LW, Fa. Viessmann
[7] Quelle: DWD, Wetterstation 1420

4.2 Wärmebedarfsrechnung

Nachfolgend wird jeweils die Bestimmung des flächenspezifischen Wärmeenergie- und Wärmeleistungsbedarfs der Wärmesenken Warmwasser und Gebäudeheizung erläutert. Die verwendeten Annahmen und resultierenden Kennzahlen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

4.2.1 Warmwasser

Ein für Deutschland typischer, täglicher Warmwasserbedarf von 40 Litern pro Person bildet den Ausgangspunkt für die Bestimmung des zugehörigen Wärmebedarfs. Unter der Annahme, dass Kaltwasser im Rahmen der Warmwasserbereitstellung im Mittel um 37 K[8] erwärmt wird, ergibt sich ein Wärmebedarf von 1,7 kWh pro Person und Tag beziehungsweise 619,6 kWh pro Person und Jahr. In Kombination mit einer durchschnittlichen Wohnfläche pro Kopf von 47 m² folgt daraus ein flächenspezifischer Wärmebedarf für die Warmwasserbereitstellung von 13,2 kWh/(m² a). Unter der Voraussetzung, dass die Bereitstellung auf Verbraucherseite über ein Speicherladesystem erfolgt, wird die Warmwasserwärmeleistung $\dot{q}_{\mathrm{Warmwasser}}$ mit 1,5 W/m² über das Jahr als konstant angenommen.

4.2.2 Gebäudeheizung

Für die Beheizung von Wohngebäuden des Baujahres 2000 beträgt der flächenspezifische Wärmebedarf q_{Heizung} 50 kWh/m². Die entsprechende Heizgrenztemperatur $T_{\mathrm{Heizgrenze}}$, also die Umgebungstemperatur unterhalb der der Wohnfläche Heizwärme zugeführt werden muss, wurde mit 15 °C angenommen. Für Zeitschritte des Rechenmodells mit Umgebungstemperaturen oberhalb der Heizgrenztemperatur ist die flächenspezifische Heizwärmeleistung $\dot{q}_{\mathrm{Heizung}}$ gleich null. Für die Zeitschritte mit Umgebungstemperaturen unterhalb der Heizgrenztemperatur wurde die flächenspezifische Heizwärmeleistung mit Hilfe von Gleichung (1) bestimmt.

$$\dot{q}_{Heizung} = U \cdot a \cdot \Delta T = U \cdot a \cdot \left(T_{\mathrm{Heizgrenze}} - T_{\mathrm{Umgebung}}\right) \tag{1}$$

Das Produkt aus dem Wärmeübergangskoeffizienten U und der einem Quadratmeter Wohnfläche zugehörigen Hüllfläche a, wurde dabei iterativ bestimmt, so dass sich für den Standort über das Jahr in Summe wieder ein jährlicher Wärmebedarf von 50 kWh/m² ergibt. Zusammengefasst entspricht dieses Produkt einem temperatur- und flächenspezifischen

[8] Erwärmung von 8 °C Kaltwasser auf mittlere Warmwassernutztemperatur von 45 °C.

Heizleistungsbedarf, der für das beschriebene Beispiel 1,087439 W/(m² K) beträgt. Der maximale Wert für die flächenspezifische Heizwärmeleistung $\dot{q}_{\mathrm{Heizung,max}}$ tritt bei der kältesten Umgebungstemperatur von -10,0 °C auf und beträgt 27,2 W/m².

4.2.3 Skalierung der Wärmesenken

Um die Vergleichbarkeit des Rechenmodells für Fernwärmenetze unterschiedlicher Größen zu gewährleisten, wird die benötigte, maximale Wärmebedarfsleistung $\dot{Q}_{\mathrm{Gesamt}}$ auf 1 MW normiert. Nach Gleichung (2) ergibt sich in Kombination mit dem maximalen Heizungs- und Warmwasserwärmebedarf eine Wohnfläche für 742 Personen von 34.855 m².

$$A = \frac{\dot{Q}_{Gesamt}}{\dot{q}_{Heizung,max} + \dot{q}_{Warmwasser}} = 34.855\ m^2 \tag{2}$$

Der sich daraus für das Warmwasser und die Heizung ergebende jährliche Wärmebedarf, einschließlich der maximalen Wärmeleistungen, kann Tabelle 1 entnommen werden

Tabelle 1: Wärmesenken - Annahmen und Kennwerte

Bezeichnung	Formelzeichen	Wert	Einheit	Quelle
Wärmesenke 1: Gebäudeheizung				
Heizgrenztemperatur	$T_{\mathrm{Heizgrenze}}$	15	°C	www.effizienzhaus-online.de
jährl. flächenspez. Wärmebedarf (Wohngebäude, Baujahr 2000)	q_{Heizung}	50	kWh/(m² a)	ASUE, 2017
temperatur- und flächenspez. Heizwärmeleistungsbedarf	$U \cdot a$	1,087439	W/(m² K)	Rechenwert (iterativ)
max. flächenspez. Wärmeleistungsbedarf	$\dot{q}_{\mathrm{Heizung,max}}$	27,2	W/m²	Rechenwert
Gesamtwohnfläche	A	34.855	m²	Rechenwert (iterativ)
jährl. Wärmebedarf	Q_{Heizung}	1.743	MWh/a	Rechenwert
max. Wärmeleistungsbedarf	$\dot{Q}_{\mathrm{Heizung,max}}$	948	kW	Rechenwert
Wärmesenke 2: Warmwasser				
personenspez. Warmwasserbedarf		40	l/(Person d)	www.energie-lexikon.info
effektive Temperaturdifferenz zum Kaltwasser		37	K	Annahme
jährl. personenspez. Wärmebedarf		619,6	kWh/(Person a)	Rechenwert
Wohnfläche pro Kopf		47	m²/Person	statistisches Bundesamt, 2019
jährl. flächenspez. Wärmebedarf	$q_{\mathrm{Warmwasser}}$	13,2	kWh/(m²*a)	Rechenwert
flächenspez. Wärmeleistungsbedarf	$\dot{q}_{\mathrm{Warmwasser}}$	1,5	W/m²	Rechenwert
jährl. Wärmebedarf	$Q_{\mathrm{Warmwasser}}$	460	MWh/a	Rechenwert
mittl. Wärmeleistungsbedarf (konst.)	$\dot{Q}_{\mathrm{Warmwasser}}$	52	kW	Rechenwert

4.3 Vorlauftemperatur- und Volumenstromregelung

Im Rechenmodell erfolgt die Regelung der Vorlauftemperatur in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur in Verbindung mit einer leistungsabhängigen Volumenstromregelung. Diese sogenannte Kombi-Fahrweise ist beispielhaft in Abbildung 4 dargestellt.

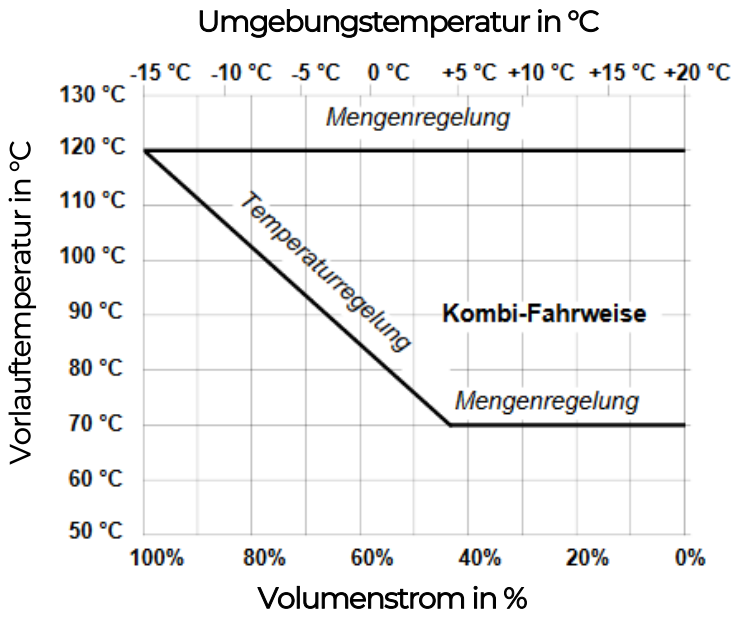

Abbildung 4: typische Vorlauftemperatur- und Volumenstromregelung eines Fernwärmenetzes[9]

Um die Tendenz[10] hin zu energieeffizienteren Wärmenetzen mit geringeren Netztemperaturen und somit reduzierten Wärmeverlusten abzubilden, wurde anstatt des dargestellten Vorlauftemperaturbereichs von 70 °C bis 120 °C ein Bereich von 70 °C bis 100 °C gewählt. Für Umgebungstemperaturen über 3 °C beträgt die Vorlauftemperatur demnach 70 °C und 100 °C für Umgebungstemperaturen unterhalb -15 °C. Für den Umgebungstemperaturbereich zwischen 3 °C und -15 °C wird die Vorlauftemperatur entsprechend linear interpoliert (vgl. Tabelle 2).

Der Volumenstrom wird in Abhängigkeit des Gesamtwärmeleistungsbedarfs für Heizung und Warmwasser geregelt. Unter der Vorgabe einer Spreizung zwischen Vor- und Rücklauftemperatur von 20 K beträgt der leistungsspezifische Volumenstrom $\dot{v}_{\mathrm{FW}}$ 40 m³/(h MW). Außerhalb der Heizperiode reduziert sich der Wärmebedarf lediglich auf die Warmwasserbereitstellung. Um der Bildung von Legionellen vorzubeugen, ist die Erwärmung des Warmwassers an der Übertragungsstation auf eine Temperatur oberhalb von 60 °C zu

[9] Quelle: Fraunhofer Umsicht, 1998

[10] Quelle: Nachhaltige Anforderungen an Wärmenetze der Zukunft, Agora Energiewende, 2019

gewährleisten. Um dies sicherzustellen, ist seitens des Fernwärmenetzes ein Mindestvolumenstrom bereitzustellen. Berechnet wird dieser unter der Annahme, dass die Fernwärmetemperatur am Eingang der Übertragungsstation noch mindestens 66 °C[11] beträgt und sich nach der Übertragung von $\dot{Q}_{\mathrm{Warmwasser}}$ (52 kW) an das Warmwasser auf 60 °C abgekühlt hat. Nach Gleichung (3) ergibt sich so ein Mindestvolumenstrom $\dot{V}_{\mathrm{FW,MIN}}$ von 7,7 m³/h.

$$\dot{V}_{FW,MIN} = \frac{\dot{Q}_{Warmwasser}}{c_{p,H_2O} \cdot \varrho_{H_2O} \cdot \Delta T} = 7{,}7\ \frac{m^3}{h} \tag{3}$$

Tabelle 2: Wärmequelle - Annahmen und Kennwerte

Bezeichnung	Formelzeichen	Wert	Einheit	Quelle
Wärmequelle 1: erdgasbetriebener Heißwassererzeuger				
Wirkungsgrad	$\eta_{\mathrm{Heißwassererzeuger}}$	0,95		Viessmann
Vorlauftemperatur Fernwärme	$T_{\mathrm{FW,Vorlauf}}$			
für $\mathrm{T_{Umgebung}} > 3\ °C$		70	°C	Annahme
für $3\ °C > \mathrm{T_{Umgebung}} > -15\ °C$		70...100	°C	linear interpoliert
für $-15\ °C > \mathrm{T_{Umgebung}}$		100	°C	Annahme
Volumenstrom Fernwärme	$\dot{V}_{\mathrm{FW}}$			
Mindestvolumenstrom	$\dot{V}_{\mathrm{FW,MIN}}$	7,7	m³/h	Rechenwert
Leistungsspezifischer Volumenstrom für eine Spreizung von 20 K	$\dot{v}_{\mathrm{FW}}$	40,0	m³/(h MW)	Planungshandbuch Fernwärme, S.12
maximaler Volumenstrom	$\dot{V}_{\mathrm{FW,MAX}}$	40,0	m³/h	Rechenwert

4.4 Wärmeverluste

Die Wärmeverluste von unterirdisch verlegten Fernwärmerohrleitungen an das Erdreich lassen sich anhand von Gleichung (4) berechnen. Dabei ist $\dot{q}_{\mathrm{v}}$ der spezifische Wärmeverlust pro Trassenmeter Rohrleitung, L die Leitungslänge der Rohrleitung und ΔT die Temperaturdifferenz zwischen der Temperatur in der Rohrleitung T_{FW} und der Temperatur des Erdbodens T_{Erdboden}. Zudem gilt die Gleichung nur unter der Annahme, dass sich sowohl T_{FW} als auch T_{Erdboden} über den betrachteten Rohrleitungsabschnitt konstant sind. Eine Erwärmung des Erdbodens in der Nähe zur Rohrleitung wird demnach in der vorliegenden Rechnung nicht berücksichtigt.

$$\dot{Q}_V = \dot{q}_v \cdot L \cdot \Delta T = \dot{q}_v \cdot L \cdot (T_{FW} - T_{Erdboden}) \tag{4}$$

Der spezifische Wärmeverlust pro Trassenmeter Rohrleitung $\dot{q}_{\mathrm{v}}$ ist abhängig vom Rohrleitungsmaterial, dessen Wärmedämmung sowie dem Rohrleitungsdurchmesser d_{FW}. Der erforderliche Mindestrohrdurchmesser $d_{\mathrm{FW,MIN}}$ ergibt sich unter der Vorgabe einer für

[11] Annahme wurde im weiteren Verlauf bestätigt (vgl. T_2 in Abbildung 6 und Abbildung 11)

Fernwärmenetze typischen, maximalen Strömungsgeschwindigkeit $v_{\mathrm{FW,MAX}}$ von 2,0 m/s und des in Abschnitt 3.4 bestimmten maximalem Gesamtvolumenstroms $\dot{V}_{\mathrm{FW,MAX}}$ von 40 m³/h zu 84,1 mm. Infolgedessen wird der nächstgrößte, gebräuchliche Leitungsdurchmesser für Fernwärmeleitungen mit 100 mm (DN100) gewählt. Als Rohrleitungsmaterial wird von einem Kunstmantelverbundrohr der Isolationsklasse DS3 ausgegangen (s. Abbildung 5). Unter diesen Randbedingungen ergibt sich ein spezifischer Wärmeverlust pro Trassenmeter Rohrleitung $\dot{q}_{\mathrm{V}}$ 0,43 W/(m K) (vgl. Tabelle 3).

Abbildung 5: Beispiel eines Kunstmantelverbundrohres (KMR) mit der Isolationsklasse DS3[12]

Tabelle 3: Wärmeverteilnetz - Annahmen und Kennwerte

Bezeichnung	Formelzeichen	Wert	Einheit	Quelle
Wärmeverteilnetz				
Auslegungsparameter				
Vorgabe typ. Fließgeschwindigkeit	$v_{\mathrm{FW,MAX}}$	2,0	m/s	Planungshandbuch Fernwärme, S.13
Mindestrohrleitungsdurchmesser	$d_{\mathrm{FW,MIN}}$	84,1	mm	Rechenwert
Gewählter Rohrleitungsdurchmesser	d_{FW}	100	mm	Annahme
Fließgeschwindkeitsbereich für DN100		0,3...1,4	m/s	Rechenwert
Länge Vorlaufleitung	$L_{\mathrm{FW,Vorlauf}}$	1.000	m	Annahme
Länge Rücklauflaufleitung	$L_{\mathrm{FW,Rücklauf}}$	1.000	m	Annahme
Wärmeverluste				
spezifischer Wärmeverlust pro Trassenmeter Rohrleitung (KMR, Kunstmantelverbundrohr DS3)	$\dot{q}_{\mathrm{V}}$	0,43	W/(m K)	Planungshandbuch Fernwärme, S.206
Leitungsabschnittslänge für Verlustrechnung	$L_{\mathrm{FW,Abschnitt}}$	100	m	Annahme
Wärmeverlustleistung pro Leitungsabschnitt	$\dot{Q}_{\mathrm{V,Leitungsabschnitt}}$	1,8...3,8	kW	Rechenwert
max. Temperaturabfall in FW-Leitungsabschnitt	$\Delta T_{\mathrm{V,FW,MAX}}$	0,33	K	Rechenwert

[12] Quelle: Faktenblatt FW-Leitungen, Basler & Hofmann AG

Im Rahmen des Rechenbeispiels werden vereinfacht nur die Verluste der Vor- und Rücklaufleitung mit einer angenommenen Länge von jeweils 1.000 m betrachtet ($L_{\mathrm{FW,Vorlauf}}, L_{\mathrm{FW,Rücklauf}}$). Unter der Annahme einer pro Zeitschritt konstanten Erdbodentemperatur und der Unterteilung der Vor- und Rücklaufleitung in jeweils 100 m lange Rohrleitungsabschnitte für die die Annahme $T_{\mathrm{FW}} = konstant$ gilt, kann für jeden Zeitschritt des Rechenbeispiels die Verlustleistung der einzelnen Rohrleitungsabschnitte bestimmt werden.

4.5 Berechnung eines Zeitschrittes

Mit den in den vorherigen Abschnitten beschriebenen und hergeleiteten Größen werden die Wärmeströme und einzelnen Temperaturen des Fernwärmenetzes nun für ein Jahr in stündlicher Auflösung bestimmt und der Rechenablauf für einen einzelnen Zeitschritt n in Abbildung 6 dargestellt.

Zunächst werden die Parameter des Heißwassererzeugers (Vorlauftemperatur und Wassermassestrom) anhand der Eingangswerte bestimmt. Anschließend werden für die 1.000 m lange Vorlaufleitung pro Rohrleitungsabschnitt von 100 m die Wärmeverluste an den Erdboden und die danach noch verbleibende Temperatur im Fernwärmenetz berechnet. Basierend auf der Wärmeabgabe an der Übertragungsstation, die sich aus dem Heizungs- und Warmwasserwärmeleistungsbedarf zusammensetzt, wird die Temperatur im Fernwärmenetz an deren Ausgang ermittelt. Daraufhin erfolgt analog zur Vorlaufleitung die Berechnung der Verluste und der daraus resultierenden Fernwärmetemperaturen für die Rücklaufleitung. Die Temperatur am Ende der Rücklaufleitung entspricht wieder der Eintrittstemperatur am Heißwassererzeuger.

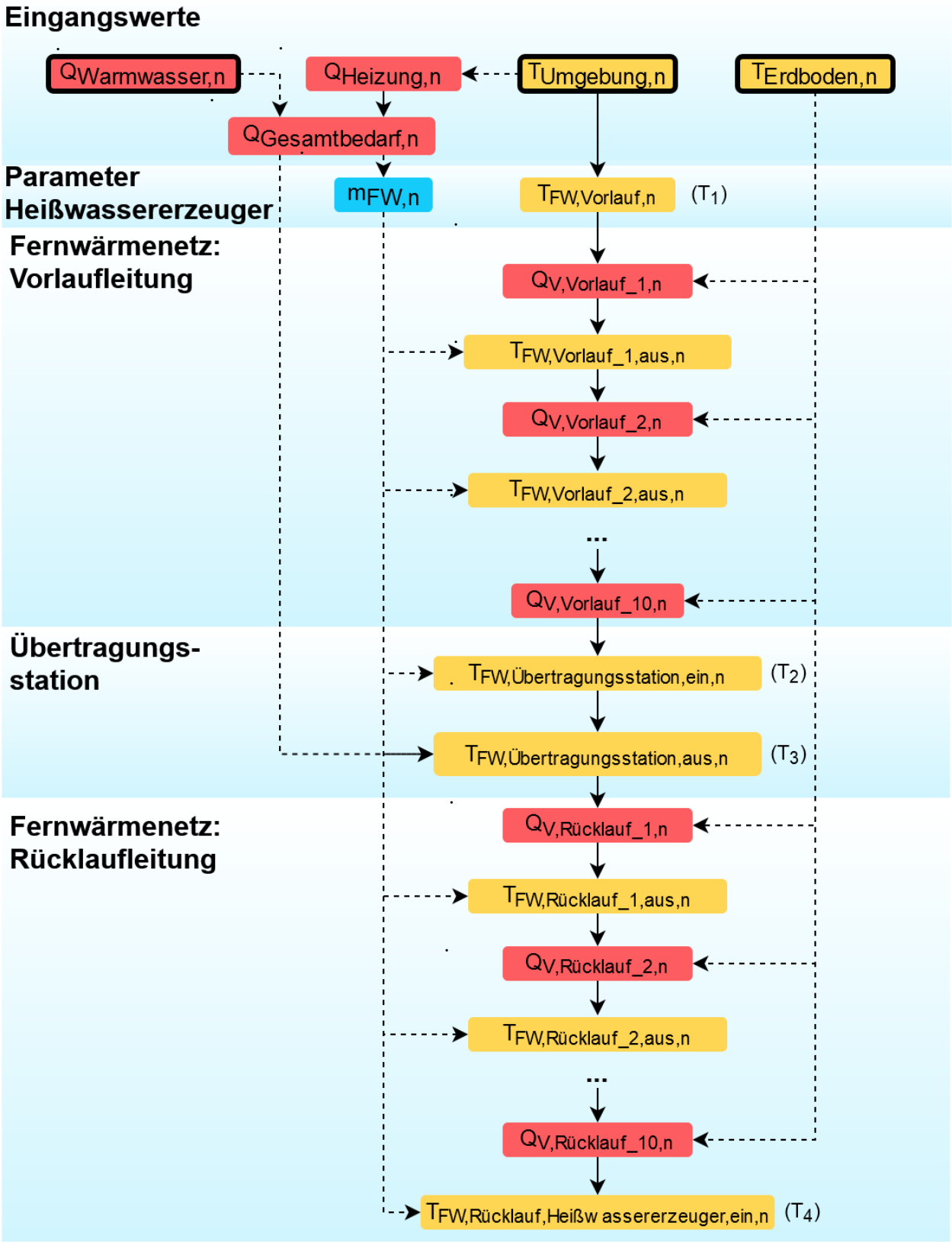

Abbildung 6: Berechnungsablauf zur Bestimmung der Wärmeströme und Temperaturen im Fernwärmenetz für den Zeitschritt n

4.6 Ergebnisse

Als Ergebnis des Fernwärmerechenmodells sind die Wärmeleistungsverläufe in Abbildung 7 dargestellt. Ersichtlich sind sowohl die Verluste des Heißwassererzeugers als auch die Verluste über die Rohrleitungen des Wärmenetzes an den Erdboden. Zudem verdeutlicht die Abbildung die Aufteilung des Wärmeleistungsbedarfs zwischen Heizung und Warmwasser. Ein weiteres Ergebnis des Rechenmodells sind die zeitlichen Temperaturverläufe an den verschiedenen Positionen im Fernwärmenetz. Diese bilden die Berechnungsgrundlage, um das Nutzungspotenzial von Rechenzentrumsabwärme in Fernwärmenetzen zu evaluieren (vgl. Abbildung 11). Der jährliche Primärenergiebedarf des hier betrachteten Fernwärmenetzes[13] mit einem Spitzenwärmeleistungsbedarf von 1 MW beträgt 2,69 GWh/a. Mit einem angenommenen, spezifischen Erdgaspreis von 4,5 ct/kWh ergeben sich jährliche Energiekosten von 121.040 €/a. Die zugehörigen CO_2-Emissionen belaufen sich auf 543 t pro Jahr[14].

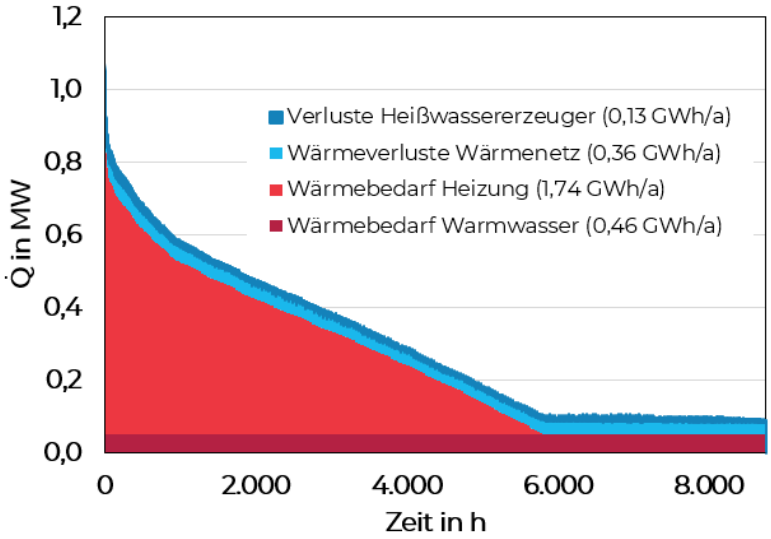

Abbildung 7: Wärmeleistungen des Fernwärmenetzes als Jahresdauerlinien

[13] benötigte Brennstoffenergie des Heißwassererzeugers ohne Berücksichtigung zusätzlicher Hilfsenergie wie Pumpen, etc.
[14] Emissionsfaktor für Erdgas: 202 g CO_2/kWh, Quelle: Merkblatt zu den CO_2-Faktoren, BAFA 2019

5 Potenzial der Abwärmenutzung wassergekühlter Rechenzentren

5.1 Abwärmenutzungspotenzial

Die vorliegende Potenzialanalyse für die Abwärmenutzung von Rechenzentren fokussiert sich auf Rechenzentren mit Direkt-Heißwasserkühlung, wie Sie aktuell von Cloud&Heat Technologies - z. B. in Form von Container-Rechenzentren (vgl. DCC20F in Abbildung 8) – angeboten werden.

Abbildung 8: DCC20F – wassergekühlter 20 ft. Rechenzentrumscontainer, max. Gesamtleistung: 275 kW, max. IT-Leistung: 240 kW (Cloud&Heat Technologies)

Abbildung 9 gibt dabei einen Überblick über den grundlegenden Kühlaufbau. Die der IT-Hardware zugeführte elektrische Energie wird vollständig in Wärme umgewandelt. In Abhängigkeit der verwendeten wassergekühlten IT-Hardware kann typischerweise ein Anteil von 83 % dieser Wärme mittels eines Heißwasserkreislaufes mit einer Spreizung von 63/53 °C[15] gekühlt werden. Aufgrund des hohen Temperaturniveaus von bis zu 63 °C steht diese Energie direkt als nutzbare Abwärme zur Verfügung. Die verbleibende Abwärme (17 %) wird zunächst an die Luft abgegeben und mittels Luft/Wasser-Wärmeübertrager (z. B. InRow-/Sidecooler, Door Cooler) einem Kaltwasserkreislauf zugeführt.

Anschließend hebt eine Kompressionskältemaschine diese Niedertemperaturabwärme auf das Temperaturniveau des Heißwasserkreises an und sorgt so dafür, dass auch dieser Anteil der Abwärme genutzt werden kann. Die zum Betrieb der Nebenaggregate (Pumpen, Wärmepumpen, Sidecooler, etc.) benötigte elektrische Hilfsenergie wird in Form thermischer

[15] Die Temperatur des Heißwasserkreises mit der IT-Hardware beträgt im Vorlauf 53°C und im Rücklauf 63 °C.

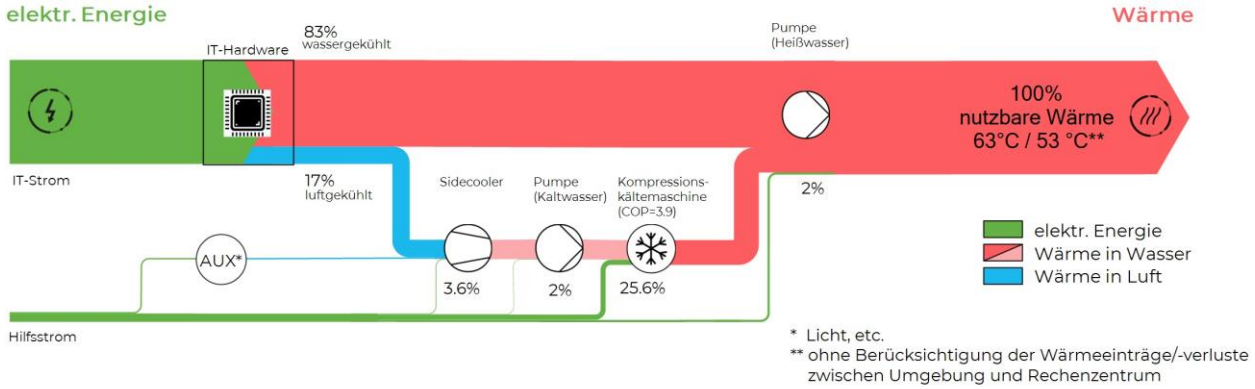

Abbildung 9: Energieflussdiagramm eines wassergekühlten C&H-Rechenzentrums (ohne Rückkühler) am Beispiel des DCC20F

Energie innerhalb des Rechenzentrums an Luft oder Wasser abgegeben, so dass final auch diese Wärme dem Abwärmestrom mit 63 °C hinzugefügt wird.

Erfahrungsgemäß liegen die Wärmeeinträge und -verluste eines DCC20F Rechenzentrums an die Umgebung ± 3 kW. Diese werden in den weiteren Betrachtungen vernachlässigt. Daher wird zunächst davon ausgegangen, dass 100 % der nach Abbildung 9 investierten elektrischen Energie in Form von Wärme zur potenziellen Weiterverwendung in nachgelagerten Prozessen genutzt werden können. Die Auskopplung der Rechenzentrumsabwärme wird mittels eines Wärmeübertragers realisiert. Je nach Betriebsbedingungen, Bauform und Ausführung weist dieser eine Temperaturdifferenz zwischen dem heißen (hier dem Heißwasserkreis des Rechenzentrums) und dem kalten Medium (beispielsweise einem Fernwärmenetz) auf. Für die vorliegende Rechnung wird vereinfacht ein Gegenstromwärmeübertrager mit einer konstanten Temperaturdifferenz von 3 K angenommen. Im Resultat wird die Wärmeabgabe durch zwei Randbedingungen limitiert:

1. Das kalte Medium kann maximal auf 60 °C (63 °C – 3 K) erwärmt werden.

2. Zur Kühlung der IT-Technik muss der Heißwasserkreis auf 53 °C abgekühlt werden. Liegt die Temperatur des kalten Mediums am Wärmeübertrager oberhalb von 50 °C (53 °C – 3 K), kann deren Abwärme nicht vollständig an das Fernwärmenetz übertragen werden, so dass eine zweite Wärmesenke (z. B. einen Rückkühler) benötigt wird.

In beiden Fällen kann die Rechenzentrumsabwärme nicht oder nur teilweise an die angeschlossene Wärmesenke abgegeben werden. Die Kühlung des Rechenzentrums muss jedoch unabhängig von der Weiterverwendung seiner Abwärme jederzeit sichergestellt werden. Die restliche Wärme muss deshalb über eine dem Wärmeübertrager nachgelagerte Wärmesenke, wie z. B. einen Rückkühler, an die Umgebung abgeführt werden. Dabei wird

auch die dem Rückkühler zugeführte elektrische Energie in Wärme umgewandelt. Da diese jedoch direkt an die Umgebung abgegeben wird, kann sie keiner Nachnutzung zugeführt werden. Der spezifische elektrische Energiebedarf eines Rückkühlers bezogen auf die von ihm zu transportierende Wärmemenge wird mit 3 % angenommen. Demnach müssen 2,9 % der Gesamtnennleistung des Rechenzentrums für den Rückkühler vorgehalten werden, so dass maximal 97,1 % der Gesamtnennleistung des Rechenzentrums in Form von Abwärme einer Nachnutzung zugeführt werden. Tabelle 4 fasst die Leistungsdaten eines wassergekühlten DCC20F Rechenzentrumcontainers zusammen.

Tabelle 4: wassergekühlter DCC20F Rechenzentrumscontainer - Leistungsdaten und Annahmen

Bezeichnung	Formelzeichen	Wert	Einheit	Quelle
Gesamtnennleistung	$P_{\mathrm{RZ,Gesamt,100\%}}$	275	kW	C&H
IT-Nennleistung	$P_{\mathrm{RZ,IT,100\%}}$	240	kW	C&H
Nennleistung Hilfsaggregate	$P_{\mathrm{RZ,Hilfsstrom,100\%}}$	35	kW	C&H
...davon Rückkühler	$P_{\mathrm{RZ,Rückkühler,100\%}}$	8	kW	Annahme
durchschnittliche Auslastung		50	%	Annahme
max. nutzbare Abwärme	$\dot{Q}_{\mathrm{RZ,Nutzwärme,100\%}}$	267	kW	Rechenwert
		(97,1	%)	bez. auf $P_{\mathrm{RZ,Gesamt,100\%}}$

5.2 Fernwärme & Rechenzentrum - getrennte und gekoppelte Nutzung im Vergleich

Die energetische Kopplung von Fernwärmenetzen und Rechenzentren mit Heißwasserkühlung ermöglicht es, den Primärenergiebedarf des Fernwärmenetzes sowie die für die Kühlung des Rechenzentrums benötigte Hilfsenergie zu reduzieren. Die Gegenüberstellung der jährlichen Energie- und Massenflüsse für die getrennte und gekoppelte Nutzung beider Systeme veranschaulicht diesen Zusammenhang in Abbildung 10. Grundlage des dargestellten Szenarios bilden zwei DCC20F Rechenzentrumscontainer (vgl. Abbildung 8) mit einer Gesamtnennleistung von 550 kW (IT-Leistung: 480 kW) und einer angenommenen konstanten Auslastung von 50 % sowie das in Kapitel 4 beschriebene Fernwärmenetz mit einer maximalen Wärmebedarfsleistung von 1 MW.

Bei getrennter Nutzung benötigt das Fernwärmenetz 2,69 GWh/a Primärenergie in Form von Erdgas zum Betrieb des Heißwassererzeugers. In Abbildung 10 entspricht diese Energiemenge bezogen auf das Fernwärmenetz stets 100 %. Nach der Umwandlung der chemischen Energie des Erdgases in thermische Energie stehen dem Fernwärmenetz am Ausgang des Heißwassererzeugers 95 % der ursprünglichen Energie auf dem Temperaturniveau T_1 zur Verfügung (s. Abbildung 11). Nach Abzug der thermischen Verluste der Vorlaufrohrleitung an das Erdreich (8 %) erreichen 87 % der Ausgangsenergie die Fernwärme-Übergabestation auf dem Temperaturniveau T_2. Nach der Erfüllung des Wärmebedarfs (Warmwasser 17 %, Heizung

65 %) sinkt die Temperatur im Fernwärmenetz am Ausgang der Fernwärme-Übergabestation auf das Temperaturniveau T_3. Die verbleibende Energie (5 %) wird als Verlustwärme des Rücklaufs an den Erdboden abgegeben, dabei kühlt sich das Wasser im Fernwärmenetz auf T_4 ab.

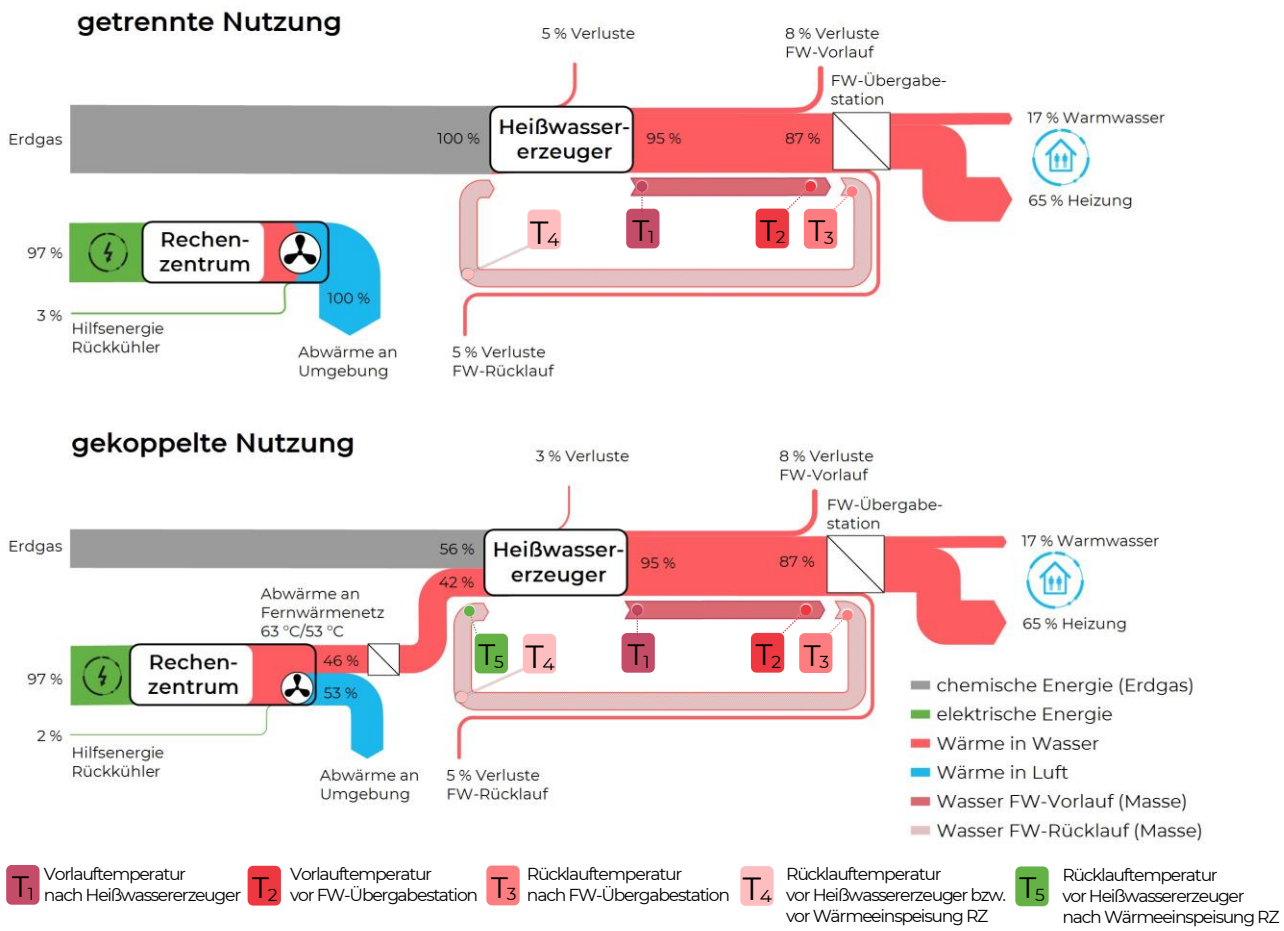

Abbildung 10: jährliche Energie- und Massenflüsse von Fernwärmenetz und Rechenzentrum bei getrennter und gekoppelter Nutzung

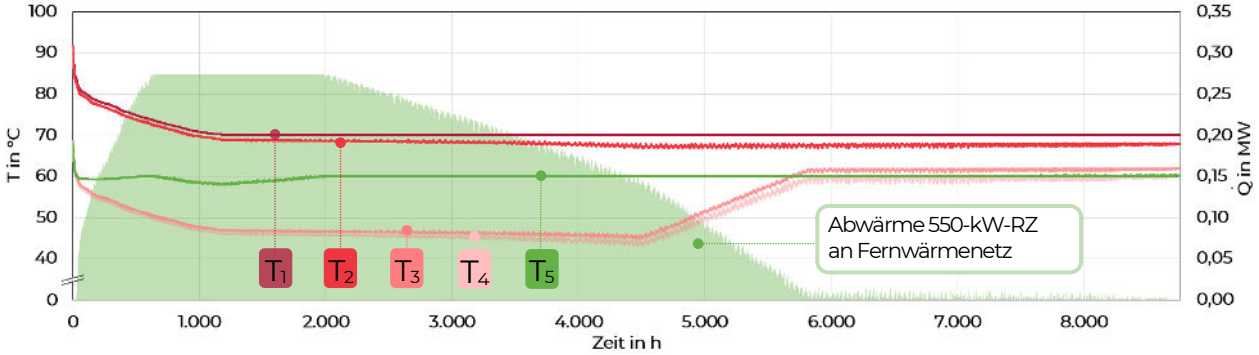

Abbildung 11: Temperaturverläufe im Fernwärmenetz und Leistungsverlauf der im Fernwärmenetz nutzbaren RZ-Abwärme

Mit einer Auslastung von 50 % weist der Betrieb des 550 kW-Rechenzentrums einen elektrischen Energiebedarf von 2,41 GWh pro Jahr auf. Dieser stellt für das Rechenzentrum in Abbildung 10 den Referenzwert für 100 % dar. 97,1 % entfallen dabei auf den Betrieb des

Rechenzentrums und 2,9 % auf den Betrieb des Rückkühlers. Wie in Abschnitt 5.1 beschrieben, wird diese Energie vollständig in thermische Energie umgewandelt und anschließend an die Umgebung abgegeben. Die Kopplung von Rechenzentrum und Fernwärmenetz erfolgt, indem Abwärme des Rechenzentrums über einen Wärmeübertrager in den Rücklauf des Fernwärmenetzes eingespeist und dessen Temperaturniveau von $T_{4,\mathrm{n}}$ auf $T_{5,\mathrm{n}}$ erhöht wird. Hierbei wird der übertragbare Wärmestrom durch die beiden in Abschnitt 5.1 beschriebenen Randbedingungen limitiert.

Die erste Bedingung besagt dabei, dass der Rücklauf des Fernwärmenetzes durch die Abwärme des Rechenzentrums auf maximal 60 °C erwärmt werden kann. Mittels Gleichung (5) wird daher der zeitabhängige, maximale an das Fernwärmenetz applizierbare Wärmestrom $\dot{Q}_{\mathrm{FW,Abwärme,max,n}}$ bestimmt, der notwendig ist, um die Temperatur $T_{4,\mathrm{n}}$ auf $T_{4,\mathrm{soll}} = 60\,°\mathrm{C}$ zu erhöhen.

$$\dot{Q}_{FW,Abwärme,max,n} = c_{p,H_2O}(T)\,\dot{m}_{RZ,n}(T_{4,soll} - T_{4,n}) \tag{5}$$

Die zweite Bedingung gibt an, dass das Rechenzentrum nur so viel Wärme an das Fernwärmenetz abgeben kann, wie es die Eintrittstemperatur des kalten Mediums am Wärmeübertrager zulässt (Fernwärme-Rücklauftemperatur $T_{4,\mathrm{n}}$). Anhand von Gleichung (6) wird der entsprechende Wärmestrom $\dot{Q}_{\mathrm{RZ,Abwärme,n}}$ bestimmt. Dabei wird die Temperaturdifferenz $\Delta T_{\mathrm{RZ,n}}$ zwischen Vor- und Rücklauftemperatur im Heißwasserkreis (s. Tabelle 5) ins Verhältnis zur maximalen Temperaturdifferenz $\Delta T_{\mathrm{RZ,max}} = 10\ \mathrm{K}$ gesetzt und mit dem bei 50 % Auslastung zur Verfügung stehenden Nutzwärmestrom $\dot{Q}_{\mathrm{RZ,Nutzwärme,50\%}}$ multipliziert.

Tabelle 5: im Heißwasserkreis des Rechenzentrums erzielbare Temperaturdifferenz $\Delta T_{RZ,n}$ zwischen Vor- und Rücklauf in Abhängigkeit der Fernwärme-Rücklauftemperatur $T_{4,n}$

	$T_{4,\mathrm{n}}$ < 50 °C	50 °C < $T_{4,\mathrm{n}}$ < 60 °C	$T_{4,\mathrm{n}}$ > 60 °C°
$\Delta T_{\mathrm{RZ,n}}$ in K	10	60 °C – $T_{4,\mathrm{n}}$	0

$$\dot{Q}_{RZ,Abwärme,n} = \frac{\Delta T_{RZ,n}}{\Delta T_{RZ,Max}}\,\dot{Q}_{RZ,Nutzwärme,50\%} \tag{6}$$

Der tatsächlich an das Fernwärmenetz übertragene Wärmestrom $\dot{Q}_{\mathrm{RZ,Abwärme,real,n}}$ lässt sich anhand der Fallunterscheidung in Gleichung (7) bestimmen. Anschließend erfolgt die Berechnung der FW-Rücklauftemperatur $T_{5,\mathrm{n}}$ nach der Wärmeeinspeisung durch das Rechenzentrum anhand von Gleichung (8).

$$\dot{Q}_{RZ,Abwärme,real,n} = \begin{cases} \dot{Q}_{RZ,Abwärme,n}, & \text{für } \dot{Q}_{RZ,Abwärme,n} \leq \dot{Q}_{FW,Abwärme,max,n} \\ \dot{Q}_{FW,Abwärme,max,n}, & \text{für } \dot{Q}_{RZ,Abwärme,n} > \dot{Q}_{FW,Abwärme,max,n} \end{cases} \quad (7)$$

$$T_{5,n} = \frac{\dot{Q}_{RZ,Abwärme,real,n}}{c_{p,H_2O}(T) \cdot \dot{m}_{RZ,n}} + T_{4,n} \quad (8)$$

Die erforderliche elektrische Leistung, um den verbleibenden Kühlbedarf des Rechenzentrums über einen Rückkühler zu erfüllen, ergibt sich nach Gleichung (9).

$$P_{el.,Rückkühler,n} = 0{,}03 \cdot (\dot{Q}_{RZ,Nutzwärme,50\%} - \dot{Q}_{RZ,Abwärme,real,n}) \quad (9)$$

Aufgrund der geringeren Nutzung des Rückkühlers bei der gekoppelten Nutzung reduziert sich der Energiebedarf des Rechenzentrums um 0,03 GWh/a auf 2,38 GWh/a. Abbildung 11 zeigt den Leistungsverlauf der davon dem Fernwärmenetz in Form von Wärme zugeführten Energie. Diese summiert sich auf 1,11 GWh/a, was einem Wiedernutzungsfaktor der in das Rechenzentrum investierten Energie (ERF - Energy Reuse Factor) von 46,7 % entspricht.

Dieser Wärmebetrag wird folglich nicht mehr vom Heißwassererzeuger des Fernwärmenetzes bereitgestellt. Der jährliche Primärenergiebedarf des Heißwassererzeugers in Form von Erdgas reduziert sich somit auf 1,52 GWh/a, was einer Einsparung von 1,17 GWh/a beziehungsweise 43,4 % entspricht. Tabelle 6 gibt einen Überblick über die jährlichen Energiemengen bei getrennter und gekoppelter Nutzung von Rechenzentrum und Fernwärmenetz und den daraus resultierenden möglichen Einsparungen.

Tabelle 6: jährliche Energiemengen für getrennte und gekoppelte Nutzung eines 550 kW Rechenzentrums und eines 1 MW Fernwärmenetzes

	getrennte Nutzung		gekoppelte Nutzung		Einsparung	
Bezeichnung	Wert	Einheit	Wert	Einheit	Wert	Einheit
Heißwassererzeuger						
Primärenergie (Erdgas)	2,69	GWh/a	1,52	GWh/a	1,17	GWh/a
Verluste	0,13	GWh/a	0,08	GWh/a		
erzeugte Wärme	2,19	GWh/a	1,45	GWh/a		
Rechenzentrum						
elektr. Energiebedarf	2,41	GWh/a	2,38	GWh/a	0,03	GWh/a
...davon Rückkühler	*0,07*	*GWh/a*	*0,04*	*GWh/a*		
Wärme an Umgebung	2,41	GWh/a	1,27	GWh/a		
Wärme an FW-Netz	-	GWh/a	1,11	GWh/a		
Fernwärmenetz						
Wärme ins Fernwärmenetz	2,56	GWh/a	2,56	GWh/a		
Wärmeverluste FW-Vorlauf	0,21	GWh/a	0,21	GWh/a		
Wärme an Warmwasser	0,46	GWh/a	0,46	GWh/a		
Wärme an Heizung	1,74	GWh/a	1,74	GWh/a		
Wärmeverluste FW-Rücklauf	0,15	GWh/a	0,15	GWh/a		

5.3 Einsparpotenzial

5.3.1 Kohlendioxid-Emissionen

Das in Tabelle 6 aufgezeigte energetische Einsparpotenzial resultiert in einer Reduktion der durch den Betrieb von Rechenzentrum und Fernwärmenetz verursachten Kohlendioxid-Emissionen (CO_2). Abbildung 12 veranschaulicht die entsprechenden CO_2-Emissionen und die erzielbaren Einsparungen. Berechnet werden die Emissionen mit den zugehörigen Emissionsfaktoren von 0,202 kg/kWh[16] für Erdgas und 0,025 kg/kWh[17] für Ökostrom.

Mit CO_2-Emissionen von 367 t pro Jahr können mit der gekoppelten Nutzung von Rechenzentrum und Fernwärmenetz im Vergleich zur getrennten Nutzung 39,2 % (237 t) der jährlichen CO_2-Emissionen eingespart werden.

Um die gleiche Menge CO_2 zu kompensieren, müssten über 18.900 Laubbäume gepflanzt werden.[18] Da der deutsche Wald je Hektar und Jahr durchschnittlich ca. 11 Tonnen CO_2 absorbiert[19], wären dazu 21 Hektar bzw. 30 Fußballfelder Wald erforderlich.

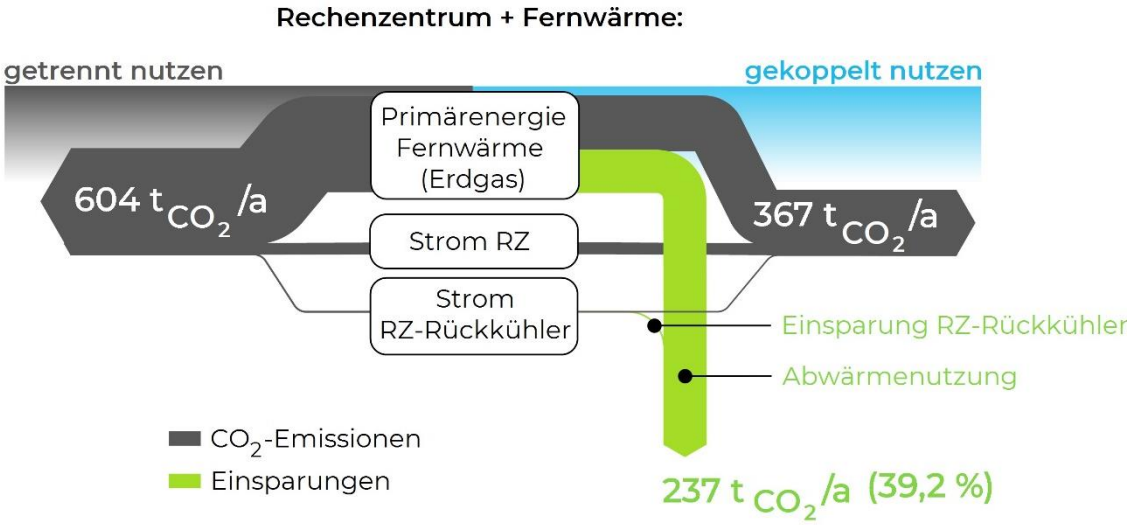

Abbildung 12: CO_2-Emisionen für getrennte und gekoppelte Nutzung eines 550 kW Rechenzentrums und eines 1 MW Fernwärmenetzes und mögliche Einsparungen bei gekoppelter Nutzung

[16] Merkblatt zu den CO_2-Faktoren, Bafa 2019
[17] Ökostrommix mit äquivalenten Anteilen von Photovoltaik, Wind- und Wasserkraft; Quelle: Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger, Umweltbundesamt 2018
[18] Quelle: co2online.de
[19] Quelle: Bayrische Staatsforsten AöR

5.3.2 Betriebsenergiekosten

Neben den CO_2-Emissionen reduziert die gekoppelte Nutzung zusätzlich die Betriebsenergiekosten. Die Einsparung ist dabei maßgeblich von den spezifischen Energiepreisen abhängig. Für Industriekunden in Deutschland wird vereinfachend für Erdgas ein spezifischer Energiepreis von 4,5 ct/kWh und für elektrische Energie einen Preis von 20,0 ct/kWh angenommen. Abbildung 13 stellt die Kostenflüsse und Einsparungen für die getrennte und gekoppelte Nutzung eines 550 kW Rechenzentrums und eines 1 MW Fernwärmenetzes unter den definierten Randbedingungen einander gegenüber. Im Vergleich zur getrennten Nutzung mit jährlichen Betriebsenergiekosten von 602,8 T€ weist die gekoppelte Nutzung Kosten von 543,7 T€ pro Jahr auf. Die sich daraus ergebende Einsparung von 59,1 T€/a beträgt 9,8 % der jährlichen Betriebsenergiekosten. Davon entfallen 89 % (52,5 T€/a) auf die Reduktion des Erdgasbedarfs um 43,4 % und 11 % (6,6 T€/a) auf die Verminderung des elektrischen Energiebedarfs des Rückkühlers.

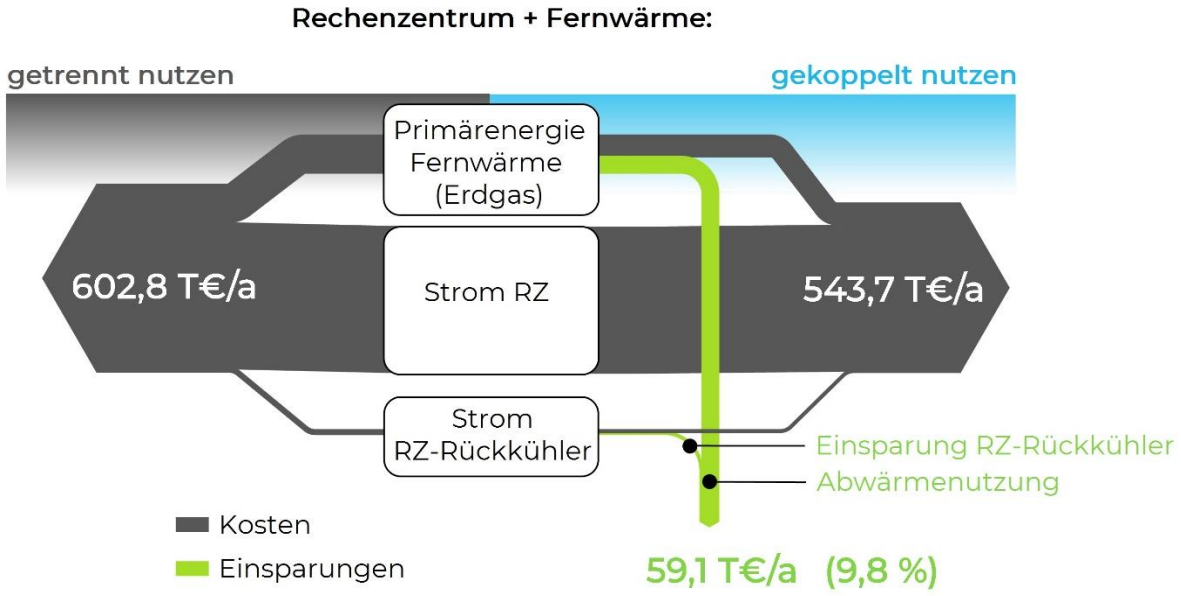

Abbildung 13: Energiekosten für getrennte und gekoppelte Nutzung eines 550 kW Rechenzentrums und eines 1 MW Fernwärmenetzes und mögliche Einsparungen bei gekoppelter Nutzung

5.3.3 Einfluss des Leistungsverhältnisses Rechenzentrum zu Fernwärmenetz

Wie die bisherigen Ergebnisse (vgl. Abbildung 11) nahelegen, existiert ein Grenzwert der Abwärmemenge, die ein Rechenzentrum in ein gegebenes Fernwärmenetz einkoppeln kann. Maßgeblich verantwortlich sind dafür die unter Abschnitt 4.1 genannten Restriktionen. Für das beschriebene Fernwärmenetz kann das maximale Potenzial einzukoppelnder Wärme durch ein Rechenzentrum mit einer elektrischen Anschlussleistung von 758 kW und 50 % konstanter Auslastung realisiert werden (vgl. Abbildung 14, links). Dadurch lässt sich die Primärenergiekosten Einsparung für Erdgas auf 45,5 % und die Gesamtkosteneinsparung auf 62 T€ erhöhen.

Wie Abbildung 14 (rechts) verdeutlicht, ist das Größenverhältnis zwischen Fernwärmenetz und Rechenzentrum somit ein entscheidender Faktor für die erzielbare Primärenergieeinsparung (Erdgas) des Fernwärmenetzes sowie den damit verbunden Kosteneinsparungen. Darüber hinaus beeinflusst das Verhältnis auch den Wärmenutzungsgrad des Rechenzentrums (ERF).

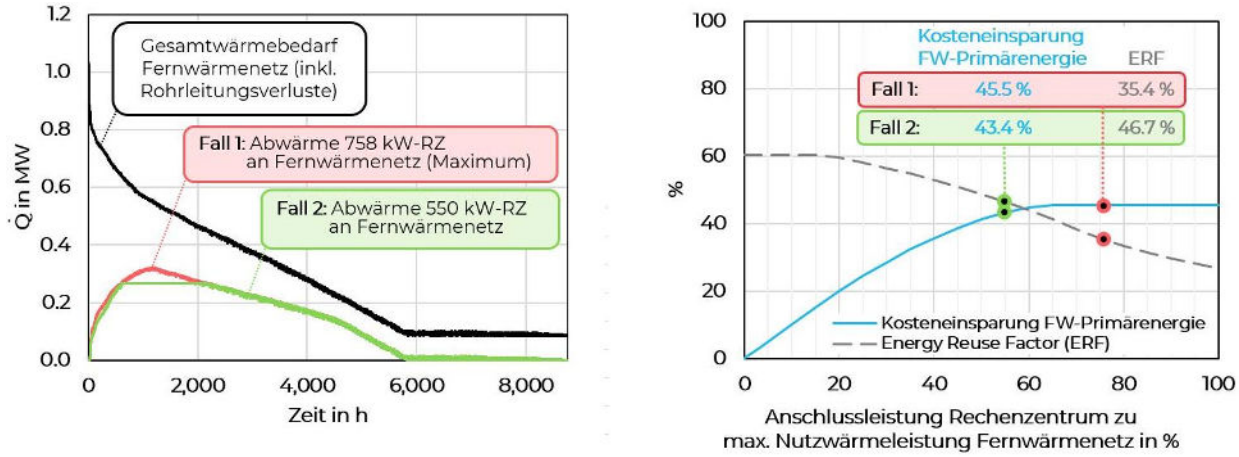

Abbildung 14: links - Jahresdauerline des Gesamtwärmeleistungsbedarf des Fernwärmenetzes und der einspeisbare Wärmeleistungsverlauf für ein 758 kW und ein 550 kW-Rechenzentrum mit einer mittleren Auslastung von 50 %; rechts - Kosteneinsparung der Fernwärme-Primärenergie (Erdgas) und Wärmenutzunggrad des Rechenzentrums in Abhängigkeit des Verhältnisses der Anschlussleistung eines Rechenzentrums zur max. Nutzwärmeleistung des Fernwärmenetzes

Zu Gunsten der Skalierbarkeit der Ergebnisse auf andere Anwendungsfälle wurden dabei als Größenindikatoren für das Fernwärmenetz die max. Nutzwärmeleistung und für das Rechenzentrum die elektrische Anschlussleistung (konst. Auslastung 50 %) gewählt. Es wird ersichtlich, dass mit einer Steigerung des Größenverhältnisses auf bis zu 60 % auch eine deutliche Anhebung der prozentualen Kosteneinsparung für die Fernwärme-Primärenergie einhergeht. Im Gegensatz dazu weist der Wärmenutzungsgrad des Rechenzentrums seinen Maximalwert mit 60 % im unteren Größenverhältnisbereich bei 0...20 % auf.

Ist ein Rechenzentrum im Verhältnis zum Fernwärmenetz klein, kann ein Großteil seiner Abwärme genutzt werden. Die prozentuale Kosteneinsparung bezüglich der Primärenergie des Fernwärmenetzes ist dabei allerdings gering. Bis zu einem Größenverhältnis (Rechenzentrum zu Fernwärmenetz) von 65 % können höhere Kosteneinsparungen durch eine Erhöhung der Anschlussleistung des Rechenzentrums erzielt werden.

Die zukünftig ansteigende Relevanz der Abwärmenutzung erhöht die Komplexität von Standortentscheidungen für Rechenzentrumsneubauten. Die in diesem White Paper aufgezeigte Methodik bietet hierbei eine wertvolle Hilfestellung, um beispielsweise zu prüfen in welchem Umfang lokale Wärmenetze zusätzlich anfallende Abwärme noch aufnehmen können.

6 Fazit und Ausblick

Der Erfolg von Energieversorgern am energieintensiven Cloud-Markt hängt nicht zuletzt davon ab, wie stark sie sich in den Bereichen technische Innovation, Betriebskosten und Nachhaltigkeit von bestehenden Anbietern absetzen können. Dabei können gerade Energieversorger vorhandene Synergien nutzen und so einen bedeutenden Beitrag zur Klimaneutralität leisten, indem z. B. die Abwärme von Rechenzentren in vorhandene Wärmenetze eingespeist wird.

Die vorliegende Modellberechnung zeigt das Einsparpotenzial der Kopplung eines 550-kW-Rechenzentrums (Standort: Frankfurt, durchschnittliche Auslastung: 50 %) mit einem Fernwärmenetz mit einem Spitzenleistungswärmebedarf von 1 MW.

Die getrennte Nutzung beider Infrastrukturen verursacht einen Energiebedarf von 2,69 GWh/a für das Fernwärmenetz (Erdgas) und 2,41 GWh/a elektrische Energie für das Rechenzentrum. Durch die gekoppelte Nutzung lässt sich der Energiebedarf des Fernwärmenetzes um 1,17 GWh/a auf 1,52 GWh/a und der des Rechenzentrums um 0,03 GWh/a auf 2,38 GWh/a reduzieren.

Die CO_2-Emissionen reduzieren sich entsprechend von 604 t/a bei getrennter Nutzung auf 367 t/a bei gekoppelter Nutzung. Die so eingesparten 237 t Kohlendioxid pro Jahr entsprechen einer Emissionsminderung von 39,2 %. Damit einher geht eine Reduktion der Betriebsenergiekosten um 9,8 % von 602,8 T€ auf 543,7 T€ pro Jahr[20]. Die absolute Kosteneinsparung beträgt demnach 59,1 T€/a. Abgesehen von Fernwärmenetzen verfügen Energieversorger über weitere Infrastrukturen, wie beispielsweise regenerative Energiequellen, deren Kopplung mit Rechenzentren signifikante Synergieeffekte aufzeigen.

Im Zuge der Energiewende befindet sich Deutschland hinsichtlich Energieversorgung und -nutzung im Wandel. Hierbei sind regenerative Energiequellen (z. B. Wind, Solar), verlustarme Wärmenetze (z. B. Niedertemperaturwärmenetze, Nahwärmenetze, Quartierslösungen) in Kombination mit alternativen Heißwassererzeugern (Biomasse, Wasserstoff) und ein sinkender spezifischer Wärmebedarf von Wohngebäuden[21] elementare Bestandteile. Diese Faktoren nehmen Einfluss auf die Nachhaltigkeit des Betriebs von Rechenzentren und deren Abwärmenutzung, dessen Untersuchung sich für weitere Betrachtungen anbietet.

[20] spezifische Energiepreise: Erdgas: 4,5 ct/kWh, elektrische Energie: 20,0 ct/kWh
[21] ASUE, 2017

WIR BAUEN DIE ENERGIEEFFIZIENTESTEN RECHENZENTREN. WELTWEIT.

Kontakt:

Cloud&Heat Technologies GmbH
Königsbrücker Straße 96
01099 Dresden, Germany

www.cloudandheat.com
info@cloudandheat.com
+49 351 479 367 00