

Abschlussbericht zum Forschungsprojekt „Innovative Abwärmennutzung aus Rechenzentren in Hessen am Beispiel von Offenbach“

Abschlussbericht

Aktenzeichenzeichen: E/531/71599348

Titel: Innovative Abwärmennutzung aus Rechenzentren in Hessen am Beispiel von Offenbach

Laufzeit: 01.03.2022 – 28.02.2023

Ausführende Stelle: Technische Hochschule Mittelhessen (THM)
Wiesenstraße 14
35390 Gießen

Autoren: Prof. Dr.-Ing. Stefan Lechner (Projektleitung)
M.Sc. Alexej Paul
M.Sc. Constantin Völzel
Dr. Ralph Hintemann
Simon Hinterholzer

Projektpartner: Energieversorgung Offenbach (EVO)
Lokale Agenda 21 Offenbach (LA21)
Bund für Umwelt und Naturschutz (BUND) – Landesverband Hessen e.V.

Förderprogramm: Energetische Förderung nach dem Hessischen Energiegesetz

Gefördert vom: Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen

Bearbeitungsstand: 31.03.2023

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage und geplante Zielsetzung des Vorhabens.....	5
2	Stand der Technik	6
2.1	Luftgekühlte Systeme	8
2.2	Flüssiggekühlte Systeme	10
2.3	Technische Systemoptionen zur Auskopplung von Abwärme	12
2.4	Best-Practice-Beispiele	15
3	Untersuchungsgebiet Offenbach	19
3.1	Recherche zu vorhandenen oder geplanten RZ	19
3.2	Übertragung der recherchierten technischen Ausführungen auf die RZ	20
4	Simulationsmodell und Auswertung	23
4.1	Modellierung des Gesamtsystems	23
4.1.1	Beschreibung der Referenzmodelle.....	24
4.1.2	Beschreibung der Modelle mit Abwärmeauskopplung	25
4.1.3	Relevante Kennzahlen zur Beschreibung des RZ-Betriebs	26
4.1.4	Bilanzgrenzen	27
4.2	Ergebnisdiskussion	28
4.2.1	Gegenüberstellung der Kühlmethoden.....	28
4.2.2	Speicherbedarf	31
4.2.3	Potenzielle CO ₂ Einsparung der Abwärmenutzung.....	33
4.2.4	Wirtschaftliche Potenziale der Abwärmenutzung.....	34
4.2.5	Bestandsaufnahme der Rechenzentrumslandschaft in Hessen	36
4.2.6	Technische und ökonomische Potenziale der Abwärmenutzung.....	39
4.2.7	Transformations-Roadmap „Abwärmenutzung aus Rechenzentren in Hessen“	44
5	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	49
6	Öffentlichkeitsarbeit	51
	Anhang	52

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Etablierte und innovative technische Umsetzungen der IT-Raumkühlung	7
Abbildung 2: Schematische Darstellung der CRAC-Kühlung mit luftgekühltem Kondensator	8
Abbildung 3: Schematische Darstellung der CRAH-Kühlung mit luft- und wassergekühlter KM	9
Abbildung 4: Schematische Darstellung der Frischluftkühlung in direkter und indirekter Ausführung mit adiabater Kühloption	9
Abbildung 5: Schematische Darstellung eines Systems mit Rückwandkühlung.....	10
Abbildung 6: Schematische Darstellung von indirekten flüssiggekühlten Systemen	11
Abbildung 7: Schematisches Schaubild der Abwärmeauskopplung aus dem warmen Abluftstrom eines indirekten Frischluftsystems	12
Abbildung 8: Schematisches Schaubild der Abwärmeauskopplung aus CRAH gekühlten RZ mit wassergekühlten KM.....	12
Abbildung 9: Schematisches Schaubild der Abwärmeauskopplung aus CRAH gekühlten RZ mit luftgekühlten KM	13
Abbildung 10: Schematisches Schaubild der Abwärmeauskopplung aus flüssiggekühlten Systemen..	14
Abbildung 11: Verortung der RZ im Untersuchungsgebiet und Visualisierung aggregierter Wärmebedarfe sowie großer Verteilleitungen des Fernwärmenetzes in Offenbach	22
Abbildung 12: Übersicht des Simulationsmodells für die CRAH-Kühlung in MATLAB Simulink.....	24
Abbildung 13: Schematische Darstellung der Zuordnung von Wärmepumpen innerhalb der Bilanzgrenzen	27
Abbildung 14: Gegenüberstellung der Kennzahlen für das Referenzmodell CRAH und der Auskopplungsoption 1 nach den zwei Ansätzen die Bilanz zu ziehen	28
Abbildung 15: Gegenüberstellung Referenzmodelle zur Kühlung eines 20 MW Rechenzentrums	29
Abbildung 16: Gegenüberstellung der Modelle mit Abwärmenutzung zur Kühlung eines 20 MW Rechenzentrums.....	30
Abbildung 17: Gegenüberstellung der drei Varianten der Engstelle ohne Engpass, als alleinige Einspeiser und beide zusammen bei der Einspeisung ins FW-Netz.....	32
Abbildung 18: Entwicklung der Rechenzentrumskapazitäten in Europa mit Anteil Cloud RZ [40]	37
Abbildung 19: Entwicklung des Energiebedarfs der Rechenzentren in Hessen in den Jahren 2010 bis 2021 und Prognose bis 2030 [40]	39
Abbildung 20: Verteilung der Kapazitäten der Rechenzentren in Hessen nach dem Temperaturniveau, auf dem die Wärme ausgekoppelt werden kann [40]	42
Abbildung 21: Transformations-Roadmap „Abwärmenutzung aus Rechenzentren in Hessen“	46

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auflistung recherchierter Beispiele zur Abwärmeauskopplung aus RZ.....	16
Tabelle 2: Informationen zu recherchierten RZ im Untersuchungsgebiet Offenbach.....	19
Tabelle 3: Verwendete Annahmen für die Bottom-Up Analyse des Gebäudewärmebedarfs im Untersuchungsgebiet.....	22
Tabelle 4: Übersicht der nutzbaren Abwärmemengen für die drei Varianten des Engpasses.....	32
Tabelle 5: Übersicht des Speicherbedarfs.....	33
Tabelle 6: Zuordnung der wesentlichen Komponenten zur Abwärmenutzung in RZ für die drei Finanzierungsvarianten.....	35
Tabelle 7: Übersicht der Wirtschaftlichkeitsberechnung und der resultierenden Gestehungskosten .	35
Tabelle 8: Gestehungskosten der Abwärme für zwei Strompreise	36
Tabelle 9: Übersicht über die Maßnahmen der Transformations-Roadmap „Abwärmenutzung aus Hessen“	47

1 Ausgangslage und geplante Zielsetzung des Vorhabens

Vor Beginn des Projekts entstanden eine informelle Kooperation und ein Ideenaustausch zur zukünftigen Handhabung der Abwärmenutzung aus Rechenzentren in Offenbach zwischen der THM in Person von Herrn Prof. Lechner, der Energieversorgung Offenbach (EVO), der Lokalen Agenda21 Offenbach (LA21) sowie dem Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND) – Landesverband Hessen e.V. Dieser informelle Austausch mündete in der Beantragung des vorliegenden Forschungsvorhabens, in dem die EVO als Projektpartner und die LA21 sowie der BUND als assoziierte Partner auftreten.

Das Land Hessen erfährt einen stetig wachsenden Zubau von Rechenzentren (RZ), deren Energiebedarf die lokalen Infrastrukturen zunehmend vor Herausforderungen stellt. Insbesondere im Rhein-Main-Gebiet ist die Neuansiedlung und der Ausbau von RZ aufgrund der Nähe zum international wichtigen Internetknotenpunkt DE-CIX in Frankfurt in den vergangenen Jahren immens gestiegen. Der gesamte Energiebedarf von RZ in Hessen steigerte sich zwischen 2010 und 2020 von 2,7 Mrd. kWh/a auf 4,3 Mrd. kWh/a [1]. Dieser Trend setzt sich nach aktuellen Studien von Marktbeobachtenden und Forschenden weiter fort, während neue Standorte für RZ zunehmend außerhalb der Stadt Frankfurt entstehen – so auch in Offenbach. In Deutschland (D.) besteht keine gesetzliche Verpflichtung für RZ, die durch den Betrieb der Server und weiterer Informationstechnik entstehende Abwärme weiter zu verwenden oder der Wärmeversorgung der umliegenden Besiedlung zuzuführen.

Ziel des vorliegenden Projekts ist es, technische und ökonomische Grundlagen rund um einen klimaschonenden und nachhaltigen Betrieb von RZ insbesondere in Hinsicht der Optionen zur Abwärmenutzung zu erarbeiten. Neben den übergreifend gültigen technischen Merkmalen soll konkret am Beispiel von Offenbach eine landesweit übertragbare Blaupause für bereits geplante und zukünftig entstehende RZ erarbeitet werden. Technisch machbare Varianten werden identifiziert und nach technisch-ökonomischen Kriterien verglichen und bewertet. Zu diesem Zweck ist die Entwicklung eines Rechenmodells zur Abbildung des Betriebs eines RZ und einer nachgelagerten Auskopplung der Abwärme geplant. Aus der energetischen Bilanzierung der berechneten Varianten der Abwärmeauskopplung soll anschließend in einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ein ökonomischer Vergleich der Varianten dieser technischen Ausgestaltungen aus Betreibersicht angestellt werden. Das Rechenmodell soll dazu an einem konkreten Beispiel eines RZ in Offenbach orientiert sein und dementsprechende Randbedingungen für den Betrieb sowie die Möglichkeiten zur Nutzung der Abwärme berücksichtigen.

Ergebnisse des Rechenmodells sollen, unterschieden nach Art und Umfang der Abwärmeauskopplung sowie der technischen Gegebenheiten der RZ, Einzug in eine hessenweit übertragbare Blaupause halten, um eine Hochrechnung der nutzbaren Abwärme zu ermöglichen. Diese Blaupause wird als Transformations-Roadmap vor Verantwortlichen der RZ-Branche, politischen Akteuren und Energieversorgern vorgestellt und enthält Handlungsempfehlungen zur Hebung der Abwärmepotenziale. Für die Durchführung dieser Aufgabe ist die Vergabe eines Unterauftrags an eine Institution oder ein Unternehmen mit entsprechender Expertise im RZ-Markt und mit Kenntnis verantwortlicher Stellen und Personen vorgesehen.

Das Projekt ist in die folgenden Arbeitspakete (AP) untergliedert:

<p>AP1: Technologien und Potenziale der Abwärmenutzung in RZ</p>	<p>Zeitraum Kurz- beschreibung</p>	<p>03/2022 – 05/2022</p> <ul style="list-style-type: none"> • Erarbeitung des Standes der Technik (inkl. Absehbarer Innovationen) über technische Ausführungen für die Auskopplung und die Nutzbarmachung von Abwärme aus Rechenzentren • Übertragung auf die im Untersuchungsgebiet vorhandenen Rechenzentren
<p>AP2: Exemplarische Auslegung eines Systems zur Abwärmenutzung in einem ausgewählten, geplanten oder nachzurüstenden RZ in Offenbach</p>	<p>Zeitraum Kurz- beschreibung</p>	<p>06/2022 – 11/2022</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aufbau eines Rechenmodells für die Analyse des Systems zur Abwärmenutzung an Rechenzentren • Erstellung von „Ausbauszenarien“ der Abwärmenutzung (Eigenbedarf, benachbarte Liegenschaften, Einspeisung in Wärmenetze) • Betrachtung des CO₂-Einsparpotenzials • Wirtschaftliche Bewertung der betrachteten Ausbauszenarien
<p>AP3: Übertragung der Ergebnisse auf den Bestand in Hessen und insbesondere im Rhein-Main-Gebiet anhand von zu entwickelnden technischen und standortbezogenen Kriterien, Abschätzung des Gesamtpotenzials im Untersuchungsgebiet, Transformations-Roadmap und Empfehlungen</p>	<p>Zeitraum Kurz- beschreibung</p>	<p>09/2022 – 02/2022</p> <ul style="list-style-type: none"> • Analyse des Rechenzentrumsmarktes in Hessen: Recherche und Zusammenfassung der Entwicklung des Rechenzentrumsmarktes in Hessen • Entwicklung einer Transformations-Roadmap zur möglichst weitgehenden Realisierung der Potenziale der Abwärmenutzung aus Rechenzentren in Hessen

2 Stand der Technik

In Abbildung 1 sind die Technologien zur RZ-Kühlung zusammengestellt. Es kann generell zwischen Luftgekühlten und Flüssiggekühlten Systemen unterschieden werden. Wobei das Medium entscheidend ist, welche die Abwärme direkt an den Serverkomponenten (Prozessoren, Speichermedien, Netzwerkgeräte, Netzgeräte) aufnimmt. Luftgekühlte Systeme stellen heutzutage noch immer den mit Abstand größten Anteil der Serversysteme in RZ. In diesen Systemen werden die zu kühlenden Serverkomponenten mit einem Luftstrom gekühlt, welcher durch die Serverschränke hindurchgeführt wird und die Abwärme aufnimmt.

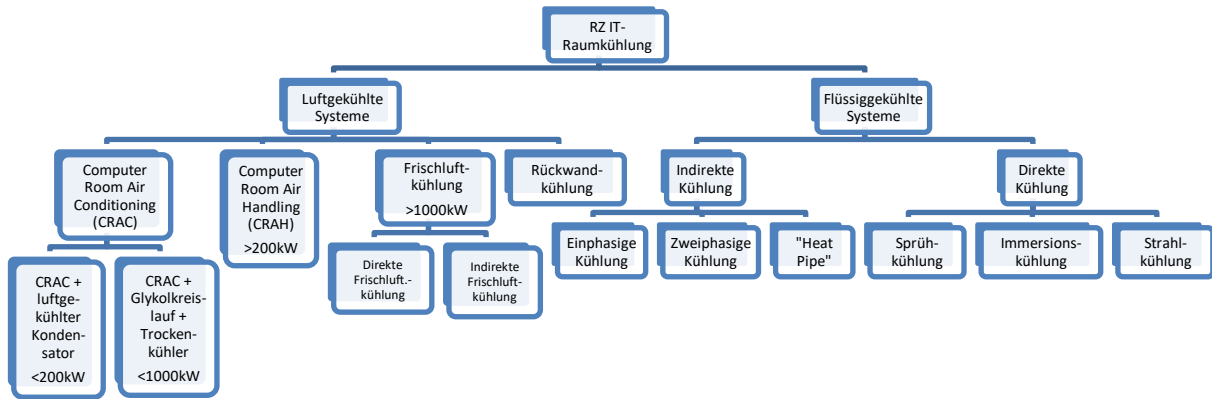


Abbildung 1: Etablierte und innovative technische Umsetzungen der IT-Raumkühlung

Maßgeblich für die Performance der Serverkühlmethoden sind die erzielbaren Wärmeübergangskoeffizienten durch konvektive Kühlung, die gewährleisten müssen, dass die zu schützenden Komponenten ihre maximalen Temperaturen im Betrieb möglichst nicht überschreiten. Typische maximale Prozessortemperaturen liegen bei ca. 85°C [2] [3]. Mehrere Servereinheiten sind heutzutage standardmäßig in Racks zusammengefasst. Die am häufigsten anzutreffende Rack-Architektur sind sogenannte 42U-Racks, wobei jeder der 42 Server bis zu 4 CPU aufnimmt. Abhängig von der Aufstellfläche und der Dichte der Server-Racks in den IT-Räumen können spezifische Wärmelasten von $6,5 - 10 \text{ kW/m}^2$ IT-Raumfläche erreicht werden [3], wobei meistens Werte zwischen $2 - 3 \text{ kW/m}^2$ üblich sind. Die Optimierung der Luftstromführung durch die Server-Racks und damit entlang der zu kühlenden Komponenten führte zur Etablierung von Warmgang- oder Kaltgang-Einhausungen, oft in Verbindung mit einem aufgeständerten Boden, auch Doppelboden genannt. Dadurch werden die warmen und kalten Bereiche der Luft in den Räumen physisch voneinander trennen, um Vermischungen und thermische Verluste zu verringern. Die kühle Luft wird dabei ohne große Verluste gezielt zu den Server-Racks geführt und dort zur Kühlung angesaugt. Bei Frischluftsystemen muss die warme Luft anschließend zusätzlich noch abführen, wodurch auch abgehängte Decken zum Einsatz kommen können. ASHRAE nennt Empfehlungen für die Klimatisierung in Kaltgängen, aus denen die konditionierte Luft für die Einlässe in die Server-Racks gezogen wird. Diese liegen bei Temperaturen zwischen $18 - 27^{\circ}\text{C}$, einer Feuchtigkeit zwischen $5,5^{\circ}\text{C}$ Taupunkttemperatur bei 60 % relative Feuchte und 15°C Taupunkttemperatur [4]. An diesen orientieren sich auch die Luftkonditionierungen in den meisten RZ: Kheirabadi und Capozzoli listen in ihren Übersichtsartikeln typische Einlasstemperaturen zwischen $16 - 27^{\circ}\text{C}$ sowie Auslasstemperaturen zwischen $30 - 45^{\circ}\text{C}$ bei einer Spreizung von 15 K auf [2], [5].

Flüssiggekühlte Serversysteme werden grundlegend in direkte und indirekte Systeme unterschieden. Mit indirekten Systemen werden in diesem Zusammenhang Kühlmethoden beschrieben, bei denen die zu kühlenden Komponenten nicht in direktem Kontakt zum Wärme abführenden Medium stehen. Diese Variante lässt sich weiter unterteilen in einphasige und zweiphasige Systeme, je nachdem, ob das Wärme abführende Medium beim Entzug der Wärme einen Phasenwechsel durchläuft. Flüssiggekühlte Serversysteme finden aktuell Anwendung im Bereich des High-Performance-Computing, da sie Vorteile gegenüber luftgekühlten Systemen hinsichtlich der erreichbaren Wärmeübergangskoeffizienten und damit einhergehend niedrigeren zulässigen Differenzen ($2 - 5 \text{ K}$ [3]) zwischen der Temperatur der zu kühlenden Komponenten und dem Wärme abführenden Medium aufweisen. Typische Systemtemperaturen liegen in dem Fall bei $45 - 60^{\circ}\text{C}$ für indirekte, einphasige Systeme und bei $55 - 65^{\circ}\text{C}$ für Wasser-Systeme [2] [5]. Die abführbaren Wärmeleistungen sind im

Vergleich zu luftgekühlten Systemen höher und können durch die höheren Systemtemperaturen ohne Kältemaschine (KM), direkt über einen Glykolkreislauf und Wärmeübertrager gegen die Umgebung abgeführt werden, was sich in einer Steigerung der Energieeffizienz flüssiggekühlter Systeme auswirkt. Auf IT-Raumbene sind für luftgekühlte und flüssiggekühlte Systeme ebenfalls unterschiedliche technische Ausführungen verbreitet, die in Abbildung 1 aufgelistet sind.

2.1 Luftgekühlte Systeme

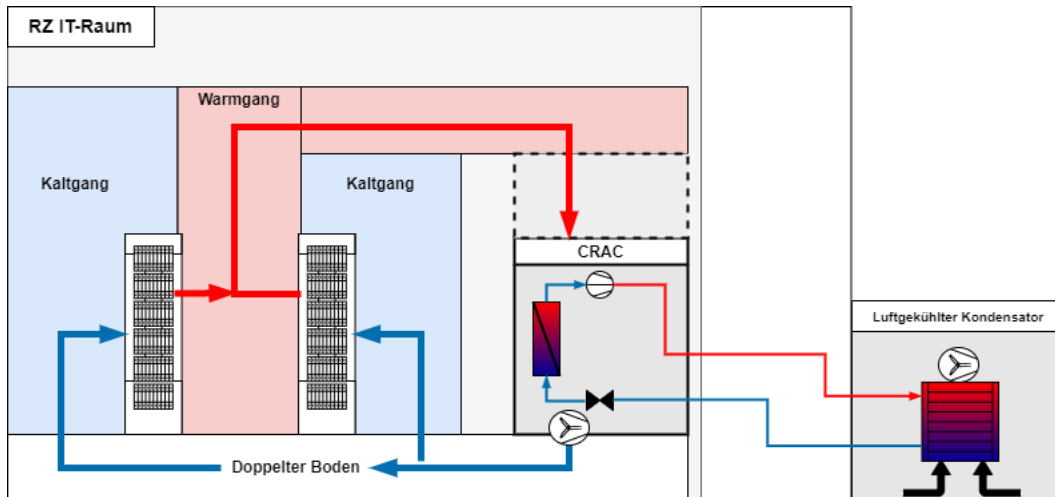


Abbildung 2: Schematische Darstellung der CRAC-Kühlung mit luftgekühltem Kondensator (Trockenkühler)

Bei **luftgekühlten Serversystemen** kann die erwärmte Abluft in CRAC- oder CRAH-Einheiten auf ein anderes Medium übertragen und einem Rückkühler (RK) gegen die Umgebung zugeführt werden. Beide Systeme weisen abgeschlossene Einheiten zur Aufstellung im IT-Raum auf, durch welche die warme Luft zirkuliert und abgekühlte Luft wieder den Servereingängen, etwa in einem Kaltgang, bereitgestellt wird. **CRAC-Systeme** werden weiterhin unterschieden in Split-Systeme für Gesamtkühlleistungen eines RZ kleiner als 200 kW und in solche mit einem Glykolkreislauf für Kühlleistungen bis etwa 1 MW [6]. Wie in Abbildung 2 dargestellt wird, beinhalten CRAC-Split-Systeme in innen aufgestellte Einheiten einen Verdampfer, in dem die warme Abluft der Server ein Kältemittel verdampft, das nach anschließender Komprimierung und Weiterleitung zur außen aufgestellten, luftgekühlten Kondensatoreinheit die Wärme gegen an die Umgebung abführt. Die Einheiten für höhere Kühlleistungen übertragen die Wärme vom Kältemittel noch innerhalb der innen aufgestellten Einheit in einem Kondensator auf einen Glykolkreislauf, der wiederum im außen aufgestellten RK die Wärme an die Umgebung abgibt. Diese leistungsstärkeren Systeme weisen zudem die Möglichkeit zur freien Kühlung ohne Nutzung der Kompressionskühlung auf, indem dieser Prozesskreislauf umgangen und das Glykol-Gemisch in separaten Kühlschlangen unmittelbar die Wärme der warmen Serverabluft aufnimmt.

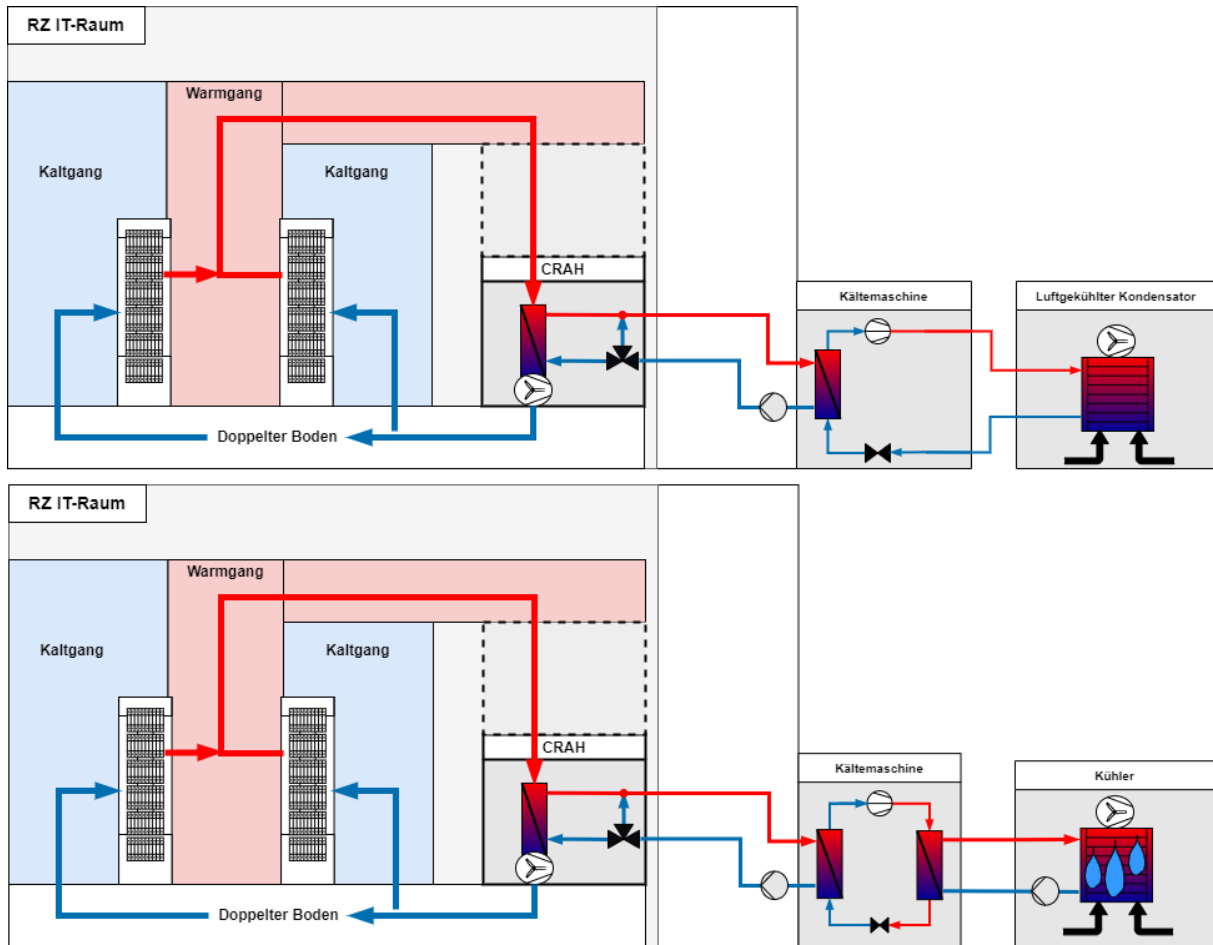


Abbildung 3: Schematische Darstellung der CRAH-Kühlung mit luft- (oben) und wassergekühlter (unten) KM

CRAH-Systeme übertragen die abzuführende Wärme von der Luft auf einen ersten Kaltwasserkreislauf, und anschließend über luft- oder wassergekühlte KM an die Umgebung (s. Abbildung 3). Finden wassergekühlte KM Anwendung, wird dieser zweite Kaltwassersatz RK zugeführt, die oft als Hybridkühler mit der Möglichkeit, durch Wasserbenetzung die Kühlleistung zu erhöhen, ausgeführt sind. Diese Systeme steigern gemeinhin ihre Wirtschaftlichkeit mit zunehmender Systemleistung und kommen in RZ mit notwendigen Kühlleistungen von mehreren MW zum Einsatz [6], [5].

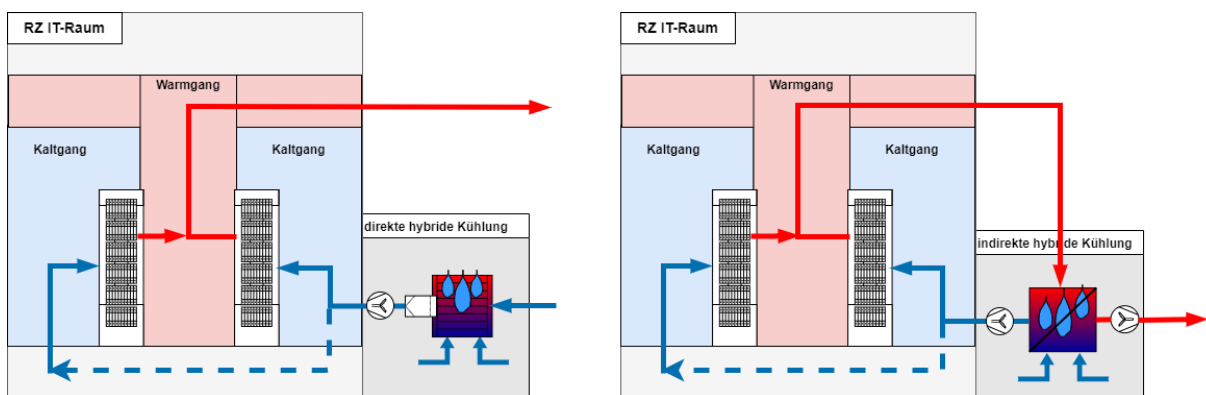


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Frischluftkühlung in direkter (links) und indirekter (rechts) Ausführung mit adiabater Kühlung

Bei noch größeren Systemleistungen der RZ werden häufig **Frischluftsysteme** eingesetzt. Ihre Funktion ist schematisch in Abbildung 4 dargestellt. Diese und CRAH-Systeme mit Kaltgang-Einhausung stellen

in D. gemeinsam bis zu 80 % der umgesetzten Kühlmethoden in RZ und sind somit hinsichtlich der technischen Reife und Marktdurchdringung am positivsten zu bewerten (Fa. Brendel: S. Hacke, T. Weis; persönliche Kommunikation, 02.03.2022). Direkte Frischluftsysteme saugen Umgebungsluft von außen an und führen diese nach einer ggf. notwendigen weiteren Konditionierung hinsichtlich Temperatur und Feuchtigkeit den Serverräumen zu. Die warme Abluft kann an kalten Tagen zur Beimischung in den Frischluftstrom genutzt und anschließend wieder in die Umgebung entlassen werden. Indirekte Frischluftsysteme hingegen weisen einen geschlossenen Kreislauf zirkulierender Kühlluft in den IT-Räumen auf, der in großen, außen aufgestellten Einheiten mit Rohrbündel-Wärmeübertrager von der Umgebungsluft gekühlt wird. Beide Ausführungen bieten die Möglichkeit, zusätzlich adiabate Kühlung durch das Einsprühen von Wassernebel auf den Wärmeübertrager (WÜ) oder direkt in die angesaugte Luft sowie einen zwischengeschalteten Kompressionskühlungsprozess zu integrieren, wenn die Umgebungsbedingungen das benötigte Temperaturniveau in den IT-Räumen allein mit freier Kühlung nicht gewährleisten.

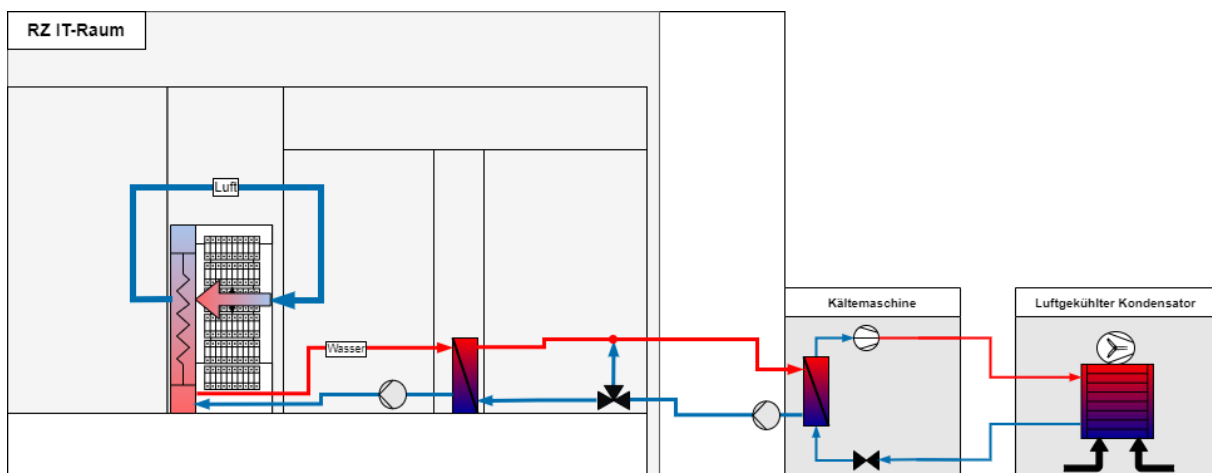


Abbildung 5: Schematische Darstellung eines Systems mit Rückwandkühlung

Systeme zur **Rückwandkühlung** von Servern werden oft als kompakte, in den Serverschrank integrierte Systeme vertrieben und in Hochleistungs-RZ genutzt. In den Rückwänden der Server werden große Luft-Wasser-WÜ verbaut, die Wärme aus der Abluft entsprechend nah an den zu kühlenden Komponenten auf einen Wasserkreislauf übertragen. Dieser wiederum wird über KM (und ggf. RK) gegen die Umgebung abgekühlt.

2.2 Flüssiggekühlte Systeme

In **flüssiggekühlten Serversystemen** wird eine Unterscheidung in direkte und indirekte Systeme getroffen. Diese bezieht sich auf die Art des Kontakts zwischen zu kühlenden Serverkomponenten und dem eingesetzten Kühlmedium. **Indirekt arbeitende Systeme mit einphasiger Kühlung** leiten Wasser als Kühlmedium durch spezielle Bauteile mit integrierten Kanälen zur Erhöhung der wärmeübertragenden Fläche und der Fließgeschwindigkeit, welche wiederum einen erhöhten Wärmeübergangskoeffizienten begünstigt. Diese Bauteile sind mit thermisch optimiertem Kontakt auf den zu kühlenden Komponenten innerhalb eines Servers angebracht und befinden sich damit besonders nah an den Wärmequellen (Microchannel Heat Sinks – MCHS). Hieraus wird bereits ersichtlich, dass ein solches flüssiggekühltes System die konstruktive Ausführung der Server mit beeinflusst, die Nutzung bislang etablierter Standardkomponenten und die Austauschbarkeit von Serverkomponenten gegenüber luftgekühlten Systemen erschwert.

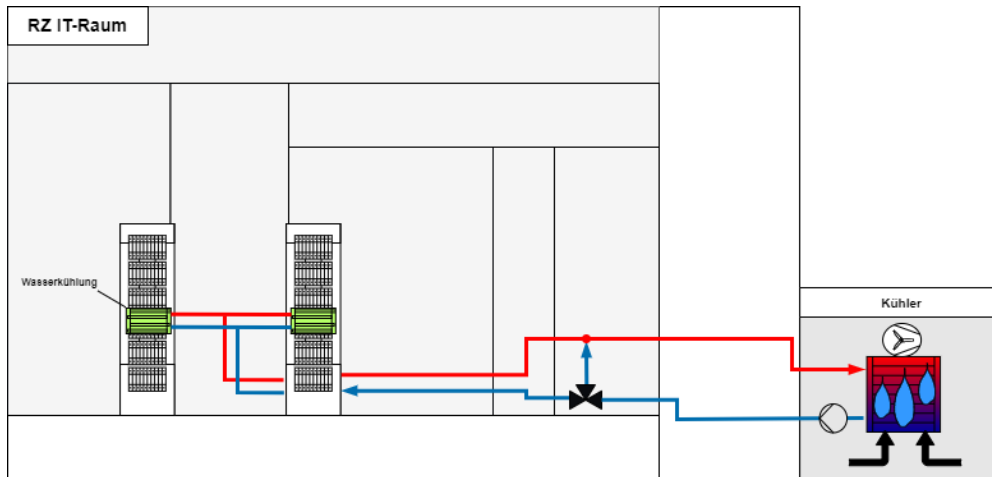


Abbildung 6: Schematische Darstellung von indirekten flüssiggekühlten Systemen

Systeme zur **Zweiphasenkühlung** sind in der Industrie zurzeit wenig verbreitet. Sie erlauben gegenüber der Einphasenkühlung verringerte Temperaturgradienten über die zu kühlenden Komponenten, da der Großteil der Wärmeabfuhr als latente Wärme des Kühlmediums gespeichert wird. Zweiphasensysteme werden häufig als Heat-Pipe-Systeme ausgeführt, in denen Wasser als Kühlmedium in vakuumierten Röhren durch die Wärmezufuhr der Serverkomponenten verdampft. Die Teile der Heat Pipes, in denen die Verdampfung stattfindet, befinden sich ähnlich zu MCHS-Systemen baulich sehr nah an den zu kühlenden Serverkomponenten. Der Wasserdampf wird anschließend gesammelt und außen aufgestellten, luft- oder wassergekühlten Kondensatoren zugeführt, um die Wärme an die Umgebung abzuführen. Andere Ausführungen der indirekten Zweiphasenkühlung ohne Einsatz eines Vakuums, in denen ein Kühlmedium durch Rohre nahe der Wärmequellen zirkuliert, müssen andere Kühlmedien als Wasser nutzen, deren Verdampfungstemperatur unterhalb der zulässigen Temperatur der Serverkomponenten liegt [2].

Als **direkte flüssiggekühlte Systeme**, die einen unmittelbaren Kontakt der zu kühlenden Serverkomponenten mit dem Kühlmedium implizieren, kommen Immersionskühlung, Sprüh- und Strahlkühlung zum Einsatz. Diese Technologien sind aktuell Gegenstand von Forschungsvorhaben und werden in einzelnen Hochleistungs-RZ angewendet. Eine industriell breite Anwendung ist noch nicht belegt, jedoch sind insbesondere für die Immersionskühlung Beispiele aus leistungsstarken RZ veröffentlicht. Aufgrund des direkten Kontakts zwischen Serverkomponenten und Kühlmedium werden nichtleitende Dielektrika für die Wärmeübertragung genutzt. Diese Systeme sind als ein- und zweiphasige Kühlmethode umsetzbar. Zu Veranschaulichung eines solchen Systems soll eine zweiphasige Immersionskühlung dienen: Die Server werden in ein geschlossenes Bad aus einem Dielektrikum eingetaucht, das die Wärme der Komponenten aufnimmt und bei Sättigungstemperatur zu sieden beginnt. Oberhalb des Bads sammelt sich die gasförmige Phase des Dielektrikums, in die ein Kondensator eingebracht ist, um die latent gespeicherte im Kühlmedium auf einen Wasserkreislauf zu übertragen, welcher wiederum gegen die Umgebung abgekühlt werden kann.

2.3 Technische Systemoptionen zur Auskopplung von Abwärme

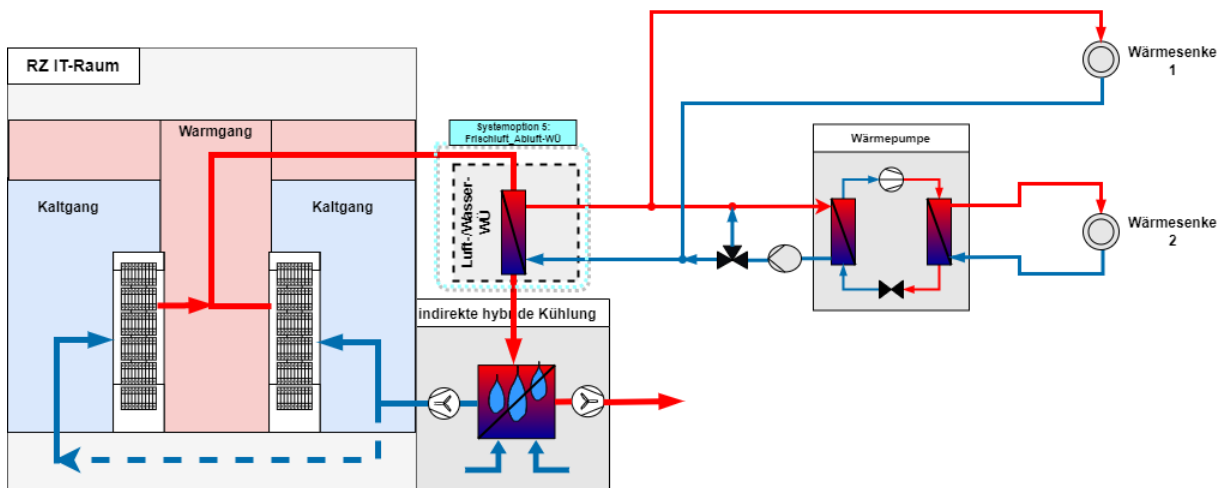


Abbildung 7: Schematisches Schaubild der Abwärmeauskopplung (Systemoption 5) aus dem warmen Abluftstrom eines indirekten Frischluftsystems

Aus den beschriebenen Kühlmethoden auf IT-Raumebene ergeben sich naheliegende **technische Ausführungen der Abwärmeauskopplung** aus RZ. Diese können sich wiederum je nach Baufortschritt oder Betrieb des RZ unterscheiden, da zusätzlicher Bauraum oder zusätzliche hydraulische Verschaltungen zur Abwärmeauskopplung notwendig werden, sofern diese nicht bereits im Bestand vorhanden sind. Generell kommen zusätzliche WÜ für die weiterführende Nutzung von Abwärme zum Einsatz, um die konventionellen Kühlsysteme und somit den RZ-Betrieb durch die Wärmeauskopplung so wenig wie möglich zu beeinflussen. Sie werden zwischen dem Wärmeträgermedium geschaltet, welche die Wärme von den Serverkomponenten abführt und dem, welches sie einer weiteren Nutzung zuführt.

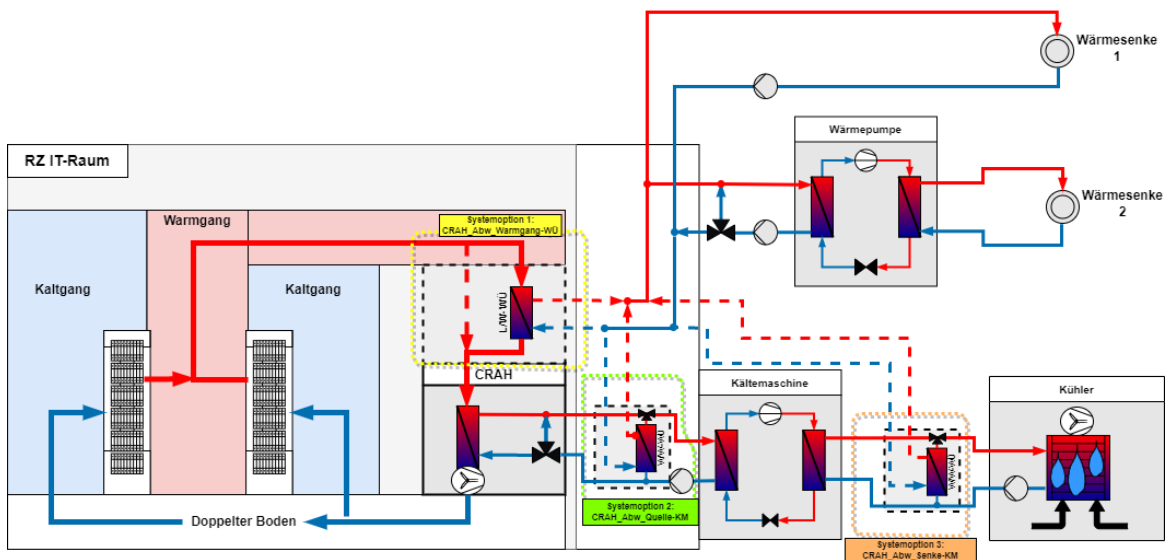


Abbildung 8: Schematisches Schaubild der Abwärmeauskopplung (Systemoptionen 1, 2 und 3) aus CRAH gekühlten RZ mit wassergekühlten KM

In luftgekühlten Systemen bestehen mehrere Möglichkeiten (Systemoptionen), die Abwärme an einen weiteren Medienkreislauf zur weitergehenden Nutzung zu übertragen. **Luft-Wasser-WÜ** können zu diesem Zweck im warmen Abluftstrom platziert werden. Nachteilig an dieser Lösung ist der notwendige Platzbedarf der Wärmeübertrager, die aufgrund der im Vergleich zu Wasser deutlich

geringeren Wärmeübergangskoeffizienten der Luft baulich groß ausgeführt sein müssen. Dieser Nachteil wirkt sich auch darauf aus, dass diese Variante als Nachrüstungsoption für bestehende RZ weniger praktikabel ist. Eine Integration in ein frischluftgekühltes System ohne Kaltwassersatz ist hierbei jedoch denkbar. Diese Ausführung ist in Abbildung 7 schematisch dargestellt.

Als weitere Position der Abwärme Auskopplung kann die **hydraulische Verschaltung mit dem Kaltwassersatz** in CRAC- oder CRAH-Systemen genutzt werden. Eine Abzweigung am Kaltwasseraustritt aus der CRAH-Einheit und nachfolgendem Anschluss an einen Wasser-Wasser-WÜ oder an die Quellenseite einer Wärmepumpe bietet die Möglichkeit, die Abwärme auf einem Temperaturniveau von 20–30°C bereitzustellen (s. Abbildung 8). Diese Systemvariante der Abwärmeauskopplung ist die vorherrschende technische Ausführung in konventionell luftgekühlten RZ mit CRAH-/CRAC-Einheiten und ist hinsichtlich der technischen Reife, der Verfügbarkeit der eingesetzten Komponenten am Markt sowie der Erfahrungen aus der Praxis als am positivsten zu bewerten (Fa. Brendel: S. Hacke, T. Weis; persönliche Kommunikation, 02.03.2022 sowie Fa. Arup: K. Spengler, H. Zebner; persönliche Kommunikation, 14.09.2022). Sie lässt sich zudem auch in bestehenden RZ mit geringeren Anpassungen an der verbauten Verrohrung vornehmen oder bei der Planung neuer RZ mittels Abzweigungsstücken für den Anschluss eines Wärmeübertragers oder einer Wärmepumpe berücksichtigen.

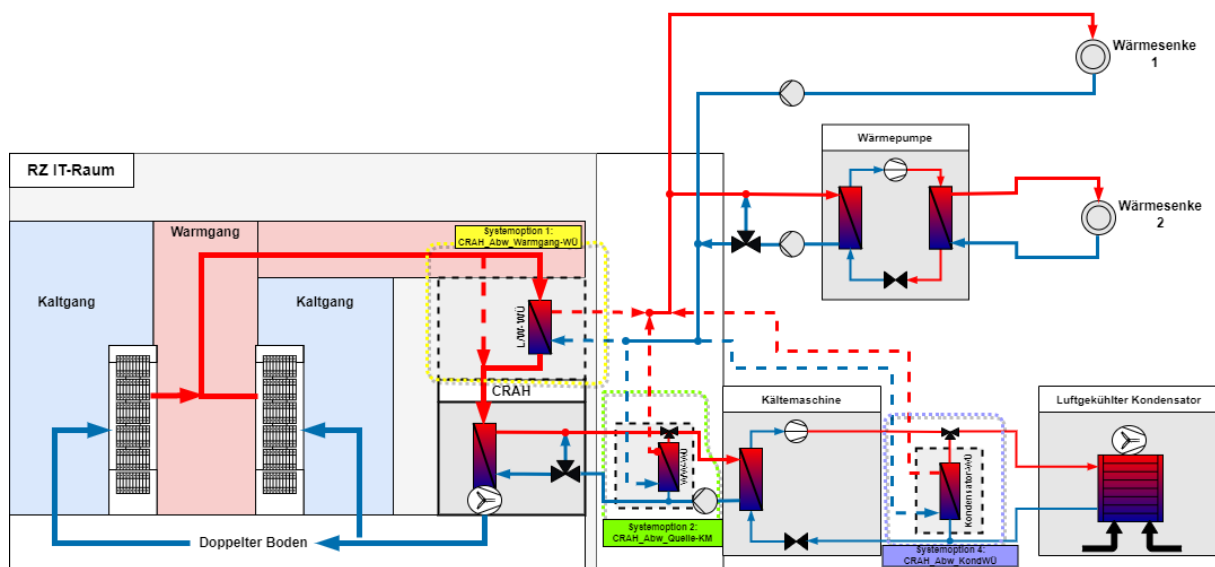


Abbildung 9: Schematisches Schaubild der Abwärmeauskopplung (Systemoptionen 1, 2 und 4) aus CRAH gekühlten RZ mit luftgekühlten KM

Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Abwärme am Kondensator der KM im RZ auszukoppeln [7]. Bei dieser Systemvariante ist die Gesamteffizienz in besonderem Maße davon abhängig, ob und in welchem zeitlichen Umfang im Jahr die KM eine Betriebsweise aufrechterhalten kann, in der ein Temperaturhub der Abwärme auf ein nutzbares Niveau bereits geleistet wird, um eine nachfolgende Wärmepumpe (WP) einzusparen. KM mit einem solcherlei integrierten Kreislauf zur Abwärmeauskopplung auf Temperaturen von 60°C und mehr sind auf dem Markt verfügbar [7], [8]. Abbildung 9 verbildlicht die zwei zuletzt beschriebenen Systemvarianten. Die zuvor erwähnte Rückwandkühlung ist hinsichtlich der übergeordneten Systembetrachtung der Abwärmeauskopplung sehr ähnlich zur Auskopplung aus CRAH- und CRAC-gekühlten IT-Räumen. Bei einer Abwärmeauskopplung bietet sich hierbei insbesondere auch der Anschluss an den Kaltwassersatz an.

In Flüssiggekühlten Systemen ist die Auskopplung der Abwärme an einer möglichst nahe dem Austritt des Kühlmediums aus den Servern gelegenen Stelle technisch und konstruktiv am naheliegendsten. Der hydraulische Anschluss eines WÜ oder, sofern noch höhere Temperaturen benötigt werden, der Quellenseite einer WP geschieht bei einer einphasigen indirekten Kühlung etwa zwischen dem Serveraustritt des Kühlmediums Wasser und der Wärmeabgabe an die Umgebung [9]. Diese Variante ist in Abbildung 10 dargestellt. Der Einsatz von KM ist aufgrund der höheren Abwärmepertemperaturen meistens nicht mehr notwendig [2].

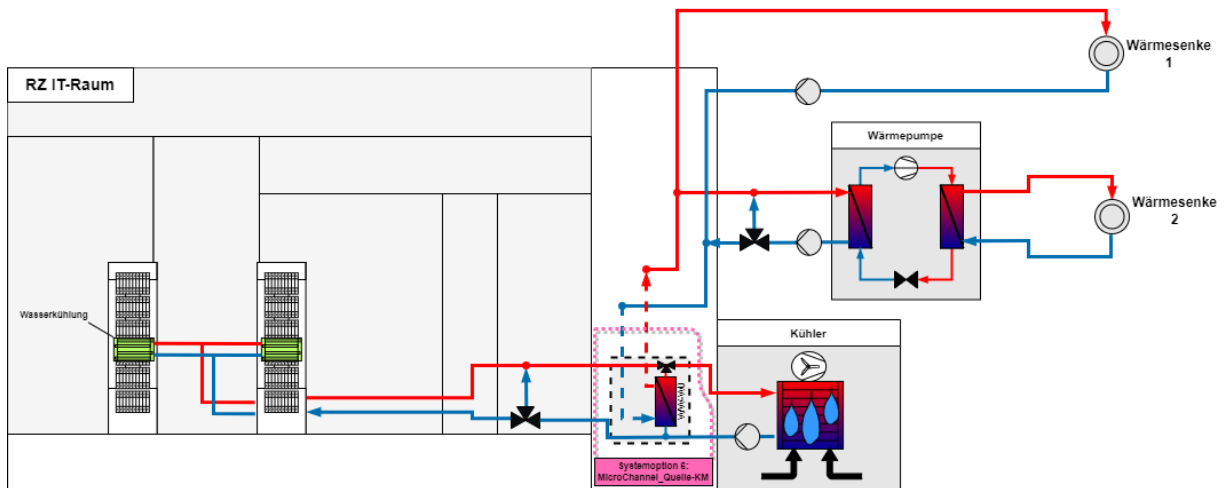


Abbildung 10: Schematisches Schaubild der Abwärmeauskopplung (Systemoptionen 6) aus flüssiggekühlten Systemen

Generell sind bei den Systemvarianten, die eine WP zur Anhebung des Temperaturniveaus der Abwärme nutzen, der Aufstellort und die Eigentumsverhältnisse einer der WP ein Diskussionspunkt, der projektspezifisch, z. B. zwischen RZ-Betreiber und dem Netzbetreiber, in dessen Netz die Abwärme eingespeist werden soll, verhandelt wird. RZ-Betreiber in D. verstehen sich nicht als Wärmelieferanten und stehen auch einer Verpflichtung zur Grundlastversorgung kritisch gegenüber und sind aus diesem Grund, aber auch aufgrund fehlender wirtschaftlicher Anreize wie zusätzlich vergünstigter Stromtarife zum Betrieb der WP oftmals nicht zu einer Abwärmeauskopplung bereit (Fa. Brendel: S. Hacke, T. Weis; persönliche Kommunikation, 02.03.2022).

Zur Nutzbarmachung der ausgekoppelten Abwärme bei Verbrauchern besteht eine Vielzahl möglicher oder in realisierten Beispielen umgesetzter Anwendungsfälle. Die **Deckung des Eigenbedarfs des RZ an Raumwärme und Trinkwarmwasser (TWW)** kann, je nach Größe des RZ und der darin noch vorhandenen Konferenz- und Büroräume, durch einen Teil der Abwärme geschehen. Der flächenspezifische Anteil an Raumwärme- und TWW-Bedarf ist in RZ bedeutend geringer zu erwarten als in Wohn- oder Bürogebäuden und die interne Wärmenutzung beläuft sich auf einen geringen einstelligen Prozentbereich der zur Verfügung stehenden Abwärmemenge [10]. Die Nutzung von Flächenheizsystemen mit Vorlauftemperaturen von ca. 35°C begünstigt dabei den Einsatz der Abwärme zur Raumbeheizung ohne zusätzlich notwendigen Temperaturhub durch eine Wärmepumpe.

Als weitere Anwendung kann die **Versorgung unmittelbar angrenzender Liegenschaften** genannt werden. Dies kann als Erweiterung der Anwendung zur Deckung des Eigenbedarfs des RZ, sinnvollerweise unter Einbeziehung von Speichern, für die Bereitstellung von Raumwärme und TWW-Bereitung geschehen. Hinzu kommen noch weitere, spezifischere Anwendungen für die Abwärme, zu denen bei direkter Nutzung (ohne WP) Gärtnereien/Gewächshäuser oder Schwimmbäder zählen.

Diese Verbraucher benötigen gemeinhin Wärme auf einem Temperaturniveau von ca. 30°C, die ohne Einsatz einer WP auch durch luftgekühlte RZ geliefert werden kann. Treten Verbraucher und RZ-Betreiber in einer direkten Vermarktung als Kunde und Wärmelieferant auf, können solche Konstellationen wirtschaftliche Vorteile für beide Seiten mit sich bringen [11]. Unter Einbeziehung einer WP und Bereitstellung der Abwärme auf einem Temperaturniveau von 60 – 90°C erschließen sich darüber hinaus noch mehr potenzielle Verbraucher als Wärmesenken für RZ-Abwärme. Zusätzlich zu Heizsystemen in angrenzenden Gebäuden, die auf höherem Temperaturniveau betrieben werden, können die Trocknung von Biomasse oder die Speisewasservorwärmung in örtlich nahe gelegenen Energieerzeugungsanlagen diese Abwärme nutzen.

Stehen keine geeigneten Wärmesenken in unmittelbarer Umgebung zur Verfügung oder liegen auch nach deren Versorgung noch weitere Potenziale zur Abwärmeauskopplung vor, stellt die **Einspeisung in Wärmenetze** eine weitere Möglichkeit zur Nutzbarmachung der Abwärme dar. Bundesweit übergreifende Statistiken zu den Temperaturniveaus von Wärmenetzen bestehen nicht [12], jedoch liegen typische Vorlauftemperaturen von Bestandsnetzen, die zu Wärmenetzen 3. Generation gezählt werden, bei 70 – 100°C [13] entsprechende Rücklauftemperaturen in den Netzen betragen 50 – 70°C. Die in ein Wärmenetz eingespeiste Wärmeleistung substituiert dabei die vom konventionellen Wärmeerzeuger aufzubringende Leistung, abzüglich der Wärmeverluste im Netz. Daher stellt die Einspeisung von unvermeidbarer Abwärme aus Industrieprozessen oder aus RZ einen wichtigen Baustein zur sukzessiven Dekarbonisierung von Wärmenetzen dar. Darüber hinaus erlaubt die Einspeisung in Wärmenetze auch die vorübergehende zeitliche Entkopplung von Wärmebedarf einzelner angeschlossener Verbraucher und Angebot aus Abwärmequellen. Die Integration großer saisonaler Speicher kann auch bei gesamtheitlicher Betrachtung des Netzes eine Substitution konventioneller Brennstoffe in Erzeugungsanlagen durch Abwärme aus RZ, die im Jahresverlauf nur geringe Schwankungen aufweist, ermöglichen. Stellt in bestehenden Wärmenetzen das Temperaturniveau des Vorlaufs ein Problem für den wirtschaftlichen Betrieb von Hochtemperatur-WP zur Abwärmeeinspeisung dar, kann auch eine Einspeisung in den Rücklauf betrachtet werden.

Niedertemperatur-Wärmenetze, beispielsweise in neu erschlossenen Bestandsgebieten oder Neubaugebieten, die ein Temperaturniveau von unter 70°C im Vorlauf aufweisen, bieten dahingehend immense Vorteile für den Betrieb einer WP, um Abwärme aus RZ einzuspeisen. Jedoch ist je nach Größe der Netze und dem Wärmebedarf der angeschlossenen Gebäude zu prüfen, wie viel Abwärme zur Bedarfsdeckung im Jahresverlauf eingespeist werden kann mit oder ohne Hinzunahme zusätzlicher Speicherkapazitäten. Dies gilt insbesondere für Niedertemperaturnetze, deren Anschlussnehmer vorwiegend energieeffiziente Neubaugebäude oder sanierte Siedlungen darstellen, deren Wärmebedarf gegenüber älteren Bestandsgebäuden reduziert ist.

2.4 Best-Practice-Beispiele

Eine umfangreiche Recherche zu umgesetzten Systemen dient dazu, die eingangs beschriebene Systematik der technischen Systemvarianten zur Auskopplung und Nutzbarmachung der Abwärme aus RZ in realen Beispielen wiederzufinden. In der nachfolgenden Tabelle sind einige recherchierte realisierte oder in Planung befindliche Beispiele zur Auskopplung von Abwärme aus RZ aufgeführt. Die aufgeführten Beschreibungen der Systeme umfassen zudem, soweit zugänglich und öffentlich kommuniziert, Daten zu Betriebswerten hinsichtlich der ausgekoppelten Wärmemenge und der eingesetzten technischen Anlagen wie WP etc.

Tabelle 1: Auflistung recherchierter Beispiele zur Abwärmeauskopplung aus RZ

Kühltechnologie	Abwärmtemperatur	Leistungsdaten	Nutzung der Abwärme	Systemkosten	Quelle
Bahnhof Thule (Stockholm, Schweden)					
Luftkühlung mit Umluftkühlgeräten (CRAC)	Kältenetz 5,5°C; Wärmenetz 65 – 100°C bei Umgebungstemperatur -18 – 0°C	3 MW IT-Last (zusammen mit Bahnhof Pionen); 1,6 MW Abwärmeleistung genutzt; 3 kaskadierte WP nutzen Rücklauf des Kältenetzes als Wärmequelle, um Wärmenetz zu versorgen – Abgekühlter Vorlauf des Kältenetzes führt über WÜ RZ-Abwärme ab	(Offenes) Wärme- und Kältenetz zur Quartiersversorgung in Stockholm Södermalm	5,3 Mio. Kronen seitens RZ-Betreiber (Kühlsystem inkl. 3 WP, Rohre, Verkabelung, Steuerung, Installation); 2,6 Mio. Kronen seitens Versorger Fortum (Verrohrung für Anschluss an Netze)	[14] [15]
Bahnhof Pionen (Stockholm, Schweden)					
Luftkühlung mit Umluftkühlgeräten (CRAC)	Kältenetz 5,5°C; Wärmenetz 65 – 100°C bei Umgebungstemperatur -18 – 0°C; Abwärmelieferung auf 68°C	600 kW dauerhafte Abwärmeauskopplung	(Offenes) Wärme- und Kältenetz zur Quartiersversorgung in Stockholm Södermalm	3,4 Mio. Kronen seitens RZ-Betreiber; 1,3 Mio. Kronen seitens Versorger Fortum	[14] [15]
Apple (Viborg, Dänemark)					
Frischluftekühlung	-	166.000 m ² IT-Fläche	Einspeisung ins Wärmenetz	33 Mio. € seitens Viborg Stadt	[16]
Telia Company (Espoo, Finnland)					
-	-	24 MW IT-Last, erweiterbar auf 100 MW; Ca. 200 GWh jährliche Abwärmennutzung (10 % des Bedarfs im Wärmenetz)	Einspeisung ins Wärmenetz Espoo	-	[16]
TelecityGroup (Helsinki, Finnland)					
-	-	7 MW IT-Last, davon 2 MW Abwärmeauskopplung für 4500 Block-Wohneinheiten + 500 Einzelhäuser	Einspeisung ins Wärmenetz	-	[16]

Tieto (Espoo, Finnland)					
Flüssigkühlung + CRAC mit Warmgang-Einhausung	17°C Abwärme Temperatur im Vorlauf zu WP, Temperaturhub auf 60°C	1.000 m ² IT-Fläche; 2 MW IT-Last; 30 GWh jährliche Abwärme	Einspeisung ins Wärmenetz	-	[17]
Yandex (Mäntsälä, Finnland)					
Frischluftekühlung	40°C Luftaustritt aus Servern, Abgabe an Wasserkreislauf in WÜ; 35°C Wassertemperatur; Temperaturhub durch WP auf 85°C	10 MW IT-Last; 20 – 30 GWh jährliche Abwärmeauskopplung; WP mit 4 MW Nennleistung und JAZ 2,7 - 4	Einspeisung ins Wärmenetz (Versorger Nivos)	3,5 Mio. € (Abwärmeauskopplung und Anschluss an Wärmenetz)	[18]
Eurotheum (Frankfurt, Deutschland)					
Indirekte Flüssigkühlung	60°C warmes Wasser	500 kW IT-Last; 250 – 400 kW als Abwärme nutzbar gemacht	70 % der abzuführenden Wärme in Heizungs-rücklauf des Gebäudes eingespeist (2/3 eines Jahreszeitraums); 30 % konventionell gegen die Umgebung gekühlt	-	[9]
Quartier West-Ville, Telehouse Deutschland GmbH (Frankfurt, Deutschland) In Planung/Bau					
Luftkühlung, CRAC	Warme Abluft auf 30°C, Temperaturhub durch WP auf 70°C	25.000 m ² IT-Fläche; Pufferspeicher und Fernwärme-Übergabestation in Heizzentrale des Areals integriert; Versorgtes Wohnquartier ca. 3,21 MW Heizlast, 4 GWh/a Wärmebedarf; 2 Großwärmepumpen, jeweils 320 kW thermische Heizleistung	Einspeisung ins Wärmenetz im angrenzenden Wohnquartier; Vorlauftemperatur 70 – 80°C (60 % Deckung durch RZ-Abwärme, 40 % Fernwärme-Beimischung)	-	[19]

Universität Greifswald (Greifswald, Deutschland)					
Freie Kühlung ohne Kältemaschinen	-	-	Deckung des Eigen-bedarfs von Seminar- und Verwaltungsräumen im RZ-Gebäude zu 100 % aus RZ-Abwärme	-	[20]
Hochleistungsrechner Lichtenberg 2, TU Darmstadt (Darmstadt, Deutschland)					
Indirekte Flüssigkühlung (+ konventionelle Luftkühlung unterstützend)	40 – 45°C warmes Wasser nach Auskopplung; Temperaturhub durch WP auf 55 – 80°C (je nach Einspeisung in Vorlauf-/Rücklauf des Wärme-netzes)	400 kW IT-Last, davon 360 kW als Abwärme nutzbar gemacht (Rest über konventionelle Luftkühlung abgeführt)	Benachbartes Wärmenetz des Campus Lichtwiese	-	[21]
Val d'Europe (Frankreich)					
Luftkühlung, CRAC	-	7,8 MW Abwärme; 20.000 MWh jährliche Abwärmeauskopplung	Einspeisung ins Wärme-netz (4 km Trassen-länge) auf 48 – 55°C	3,46 Mio. €	[22]
NorthC Aalsmeer DC (Alsmeer, Niederlande)					
CRAH, Nutzung freier Kühlung	25°C warme Abluft aus Servern; Übertragung auf Nieder-temperaturnetz mit 22°C Vorlauf (Temperaturhub mittels WP dezentral bei Verbrauchern)	4 MW IT-Last; Spitzenlast Netz 4,75 MW (keine Isolierung der Verteilleitungen)	Einspeisung in Niedertemperatur-Wärmenetz (Verbraucher Schule, Schwimmbad, Gärtnerei)	-	[23]

3 Untersuchungsgebiet Offenbach

3.1 Recherche zu vorhandenen oder geplanten RZ

Im Untersuchungsgebiet der Stadt und des Landkreises Offenbach sind sowohl im Betrieb befindliche als auch geplante oder im Bau befindliche RZ aufzufinden. Sie unterscheiden sich in Angaben zur Größe ihrer durch IT-Systeme besetzten Fläche und Anschlussleistung ebenso wie in der (geplanten) Nutzung der Abwärme. Tabelle 2 fasst die recherchierten Daten zu den im Untersuchungsgebiet gefundenen RZ zusammen und basiert auf Experteninterviews und Internetpräsenzen der RZ-Betreiber sowie veröffentlichte Zeitungsartikel.

Tabelle 2: Informationen zu recherchierten RZ im Untersuchungsgebiet Offenbach (Stadt und Landkreis)

RZ	Betreiber	Inbetriebnahme	Anschlussleistung (MW)	IT-Last (MW)	Typ	Kühlsystem	IT-Fläche (m ²)	Abwärmenutzung
Maincubes	maincubes one GmbH	2017 [24]	7,8	6 [24]	Colocation [24]	Frischluf tkühlung (Adiabatik + KM)	4200 [24]	Nein
Main DC1	Vantage Data Centers	2020 [25]	25 [26]	16	Colocation	Frischluf tkühlung (Adiabatik + KM)	8000 [26]	Eigenbedarf Gebäude mittels Temperaturhub WP
Cloud HQ (1)	Cloud HQ	vsl. 2022 [27]	86	56 [27]	Colocation	Luftkühlung	54000 [27]	Nicht vorgesehen [27]
Cloud HQ (2)	Cloud HQ	?	86	56 [27]	Colocation	Luftkühlung	54000 [27]	?
Main DC2	Vantage Data Centers	2024 [28]	24	16	Colocation	Luftkühlung (CRAH)	8000	Geplant [28], 20 – 25°C, Temperaturhub durch WP und Einspeisung in Fernwärmenetz
Main DC3	Vantage Data Centers	?	28	19	?	?	?	Geplante Auskopplung auf ca. 60°C

Bestehende RZ sind das durch maincubes one GmbH betriebene Maincubes nahe der Zentrale des Energieversorgers EVO und das ebenfalls nahe gelegene und durch Vantage DC betriebene Main DC1. Maincubes ist seit 2017 in Betrieb und weist von den beschriebenen RZ im Untersuchungsgebiet die geringste Anschlussleistung mit 7,8 MW auf. Es handelt sich um ein Colocation RZ mit einer Frischluf tkühlung, einer Kaltgang-Einhausung und Server-Zulufttemperaturen von 18 - 27°C. Die IT-Fläche von 4.200 m² ist auf drei Ebenen verteilt und beinhaltet ca. 2.140 Serracks. Eine Abwärmenutzung ist in diesem RZ nicht implementiert.

Main DC1 ist ehemals durch den Versorger EVO betrieben worden, steht mittlerweile jedoch unter der Verwaltung des Konzerns Vantage DC. Es ist seit 2020 in Betrieb und bietet ebenfalls Colocation Services an. Die Anschlussleistung beträgt 22,5 MW und die maximale IT-Last 16 MW. Es verfügt über ein Frischluft-Kühlsystem, das freie Kühlung bis zu einer Außentemperatur von 15°C nutzen kann. Bei höheren Temperaturen werden adiabatische Kühlung der Zuluft mittels Wasserbesprühung oder eine zusätzliche KM dazugeschaltet. Die Server-Zulufttemperatur aus der Kaltgang-Einhausung beträgt $22,5 \pm 4,5^\circ\text{C}$. Der IT-Bereich von 8.000 m² mit 3.300 Serverracks verteilt sich auf vier Ebenen. Eine Nutzung der Abwärme ist in diesem RZ in der Bereitstellung von Wärme für die Raumklimatisierung der Büroflächen im Gebäude unter Einsatz von WP umgesetzt.

Im Bau befindliche RZ sind das ebenfalls durch Vantage DC betriebene Main DC2, das auf dem gleichen „Campus“ nahe Zentrale der EVO entsteht sowie der erste von zwei Abschnitten des RZ von Cloud HQ im Osten von Offenbach. Main DC2 mit einer Anschlussleistung von 24 MW und einem wassergekühlten Umluftkühlsystem (CRAH) wird bis zu 9 MW Abwärme auf 25°C bereitstellen, die durch WP auf ein nutzbares Temperaturniveau für die Einspeisung in das benachbarte Fernwärmenetz der EVO gehoben wird. Die Inbetriebnahme ist für die erste Hälfte 2024 geplant.

Das erste Gebäude des RZ-Komplexes von Cloud HQ liegt östlich der Offenbacher Innenstadt und soll Ende 2022 in Betrieb gehen. Eine Anschlussleistung von 86 MW und IT-Last von 56 MW werden auf 54.000 m² IT-Fläche (Daten je Gebäude). Geplant sind der Einsatz eines nicht-verdampfenden Kühlsystems mit konventioneller Luftkühlung der Server, aus dem potenziell Abwärme mit 30°C ausgekoppelt werden könnten. Eine Nutzung der Abwärme ist jedoch nicht vorgesehen.

In der Planungsphase befindliche RZ im Untersuchungsgebiet sind Main DC3, das vom gleichen Konsortium wie Main DC1 und Main DC2 betrieben werden soll, sowie der zweite Abschnitt des Cloud HQ-Komplexes, der baugleich zum ersten Abschnitt ist. Die eingesetzte Kühltechnologie im RZ Main DC3, welches eine voraussichtliche Anschlussleistung von 28 MW aufweisen soll, ist noch nicht festgelegt. Die Auskopplung von Abwärme auf einem Temperaturniveau von 60°C ist jedoch eingeplant (EVO: D. Badoux; persönliche Kommunikation, 21.01.2022).

Weitere RZ ohne Colocation- oder Cloud-Dienstleistung, zu deren Spezifikationen keine belegbare Datenlage recherchiert werden konnte und die aufgrund ihrer deutlich geringeren Größe und Anschlussleistung für die Betrachtung der Abwärmeauskopplung eine untergeordnete Rolle spielen dürften, werden nicht weiter beschrieben. Nach unbeantwortet gebliebenen Rückfragen bei den Betreibern konnte zudem nicht geklärt werden, ob die Leistungen dieser RZ zwischenzeitlich z. B. in die bereits genannten Colocation RZ ausgelagert wurden.

3.2 Übertragung der recherchierten technischen Ausführungen auf die RZ

Für die Bewertung der Eignung einzelner recherchiertes RZ im Untersuchungsgebiet hinsichtlich der Abwärmeauskopplung wurden ihre **Standorte bezüglich vorhandener benachbarter Verbraucher mit passendem Wärmebedarf sowie vorhandener oder geplanter Wärmenetze untersucht**. Im ersten Schritt erfolgte eine Lokalisierung der RZ innerhalb des Untersuchungsgebiets in einer GIS-Software, wie in Abbildung 11 dargestellt ist. Aus Daten zur bestehenden Fernwärmeinfrastruktur wurden anschließend die größten Verteilleitungen des Fernwärmenetzes mit Mindestdurchmessern von DN200 extrahiert, da deren Transportkapazität das größte Potenzial zur Aufnahme weiterer Einspeisestellen beigemessen wird. Die Trassenabschnitte sind ebenfalls in Abbildung 11 zu sehen und als schwarze Linien visualisiert. Die Verteilung der RZ in Abbildung 11 zeigt eine Konzentration von zwei

bestehenden und einem geplanten RZ (Maincubes, Main DC1 und Main DC2) auf bzw. angrenzend an das Areal des lokalen Energieversorgers EVO im Nordwesten des Stadtgebiets. Auf diesem Gebiet befindet sich mit dem Heizkraftwerk Offenbach der EVO auch der leistungsstärkste und mengenmäßig größte Wärme Einspeiser ins Fernwärmenetz. In unmittelbarer Umgebung dieser RZ befinden sich vorwiegend Büro- und Wohngebäude, die selbst an das Fernwärmenetz angeschlossen sind und mit Abwärme auf einem Temperaturniveau von beispielsweise 30°C, das ohne Temperaturhub durch eine WP erreicht werden könnte, nicht versorgt werden können. Eine weitere Möglichkeit zur Abwärmenutzung besteht in der Speisewasservorwärmung für das benachbarte HKW, allerdings wird dieser Ansatz aufgrund der beabsichtigten und absehbaren Transformation des Fernwärmenetzes und der damit einhergehenden Ausphasung des Betriebs dieses Kohlekraftwerks nicht weiter betrachtet. Der Standort des im Bau befindlichen RZ von Cloud HQ östlich des Stadtgebiets liegt nicht innerhalb des Versorgungsgebiets des bestehenden Fernwärmenetzes. Die Distanz zum nächstgelegenen Trassenabschnitt mit einer Mindestnennweite von DN200 beträgt entlang der baulich möglichen Wege zur Verlegung etwa 2700 m. Durch eine Bahntrasse getrennt grenzt das Areal im Norden an ein Gewerbegebiet mit großen Laden-, Produktion- und Lagerflächen. Dortige Anfragen zu Angaben des Wärmebedarfs und der Art der Wärmeversorgung blieben jedoch unbeantwortet. Interessant im Zusammenhang mit dem noch ausstehenden Baubeginn für das zweite Gebäude des RZ-Komplexes von Cloud HQ ist die Nähe zum ebenfalls geplanten Neubaugebiet Offenbach Ost, das in Abbildung 11 gekennzeichnet ist. Hier wäre eine Integration der RZ-Abwärme als Bestandteil der Wärmeversorgung in einem Niedertemperatur-Wärmenetz für die Neubauten denkbar, allerdings sind etwaige Planungen dazu zum Zeitpunkt des Forschungsvorhabens noch nicht angestoßen.

Für die Abschätzung des Wärmebedarfs in direkter Umgebung der RZ wurde eine Bottom-Up Analyse durchgeführt, die auf öffentlich zugänglichen Daten zu Gebäudegrundrissen, -höhen und -nutzungstypen gründet [29]. Den jeweiligen Nutzungstypen der Gebäude wurden typische, in städtischen Bereichen anzutreffende spezifische Wärmebedarfe für den Bestand zugeordnet. Darüber hinaus wurden Annahmen zur durchschnittlichen Geschosshöhe und zum Verhältnis der tatsächlichen Nutzfläche zur Grundfläche der Gebäudegrundrisse getroffen. Aus diesen Daten und Annahmen konnten kumulierte Jahreswärmebedarfe der einzelnen Gebäude abgeschätzt und im GIS-System verortet werden. Die so errechneten Wärmebedarfe wurden zudem mit Angaben aus dem Energiebericht der Stadt Offenbach von 2019 für das Stadtgebiet Offenbach verglichen [30]. Der errechnete Gesamtwärmebedarf betrug ca. 981 GWh/a (entspricht -2 %) gegenüber ca. 1000 GWh/a als Vergleichswert aus dem Energiebericht 2019. Da innerhalb der einzelnen Nutzungstypen zwischen den verglichenen Datensätzen größere Differenzen als 2 % auftraten, wurden die spezifischen Wärmebedarfe für die Nutzungstypen Wohngebäude und Gewerbe so skaliert, dass sie den im Energiebericht ausgewiesenen Durchschnittswerten entsprechen. Der errechnete Gesamtwärmebedarf allein für das Stadtgebiet Offenbach liegt bei 1031 GWh/a, was einer relativen Differenz von gut 3 % zu den Daten aus dem Energiebericht entspricht. Die Verortung der Wärmebedarfe in den beiden Nutzungstypen Wohngebäude und Gewerbe wurde mit dieser Korrektur jedoch verbessert, weshalb der Gesamtfehler von 3 % als vertretbar hingenommen wird. Die nach der Korrektur genutzten spezifischen Wärmebedarfe und weiteren Annahmen zur Abschätzung der Jahreswärmebedarfe sind in Tabelle 3 für die drei hauptsächlich vertretenen Nutzungstypen zusammengefasst.

Tabelle 3: Verwendete Annahmen für die Bottom-Up Analyse des Gebäudewärmebedarfs im Untersuchungsgebiet

Gebäudenutzungstyp	Spez. Wärmebedarf (kWh/(m ² *a))	Geschoss- höhe (m)	Verhältnis Nutzfläche/Grundfläche
Wohngebäude	112	2,8	0,75
Gewerbe	127	3,3	0,7
Gebäude für öffentliche Zwecke	129	3	0,7

Das Ergebnis der Hochrechnung des Gebäudewärmebedarfs ist in aggregierter Form als flächenspezifische Wärmedichte in Abbildung 11 farblich in den Gebäudegrundrissen hinterlegt. Darin ist erkennbar, dass nördlich der Bahntrasse, die das Stadtgebiet teilt, aufgrund höherer Bebauungsdichte und einer größeren Anzahl mehrstöckiger Gebäude der Wärmebedarf insgesamt größer ist als in Gebieten außerhalb des Innenstadtbereichs. Die RZ Maincubes und Main DC1 sowie der zukünftige Standort von Main DC2 befinden sich in Gebieten, in denen der Wärmebedarf generell höher ausfällt als beispielsweise am Standort des RZ von Cloud HQ.

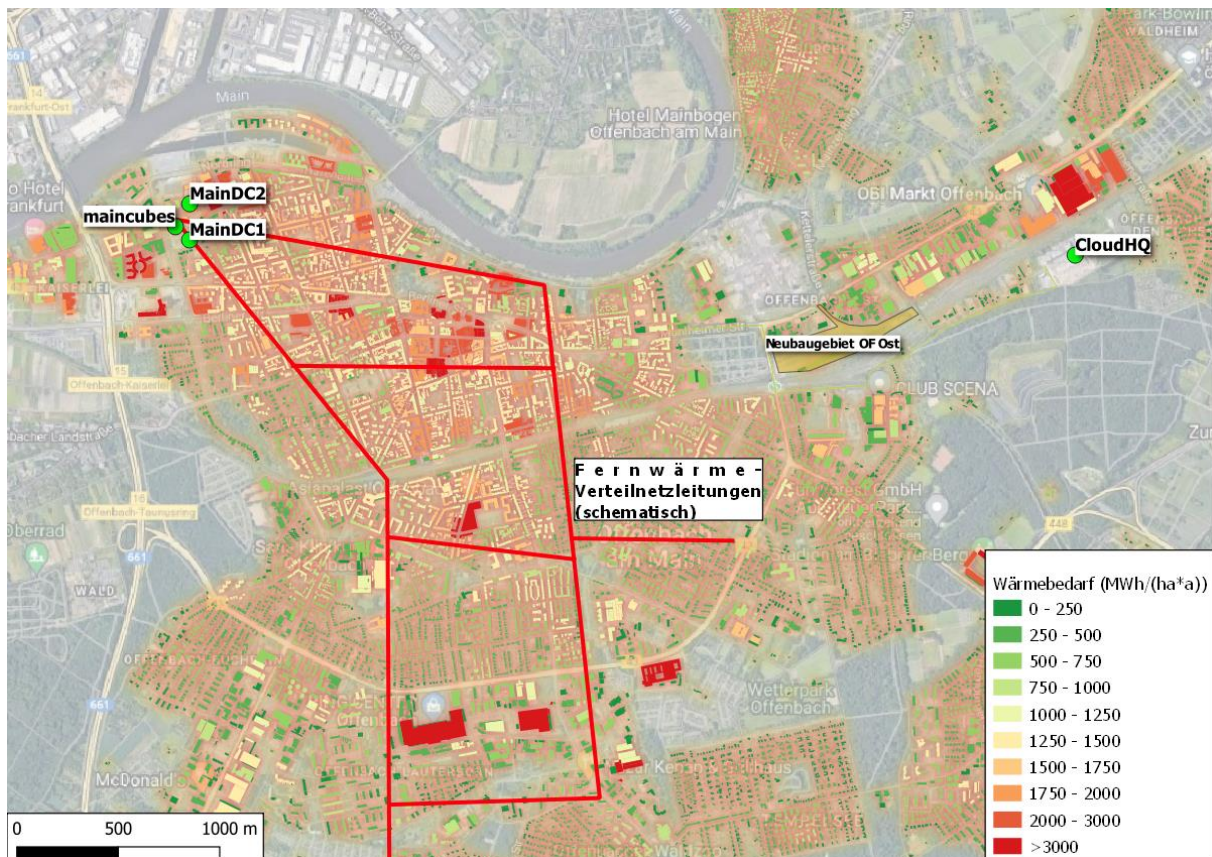


Abbildung 11: Verortung der RZ im Untersuchungsgebiet und Visualisierung aggregierter Wärmebedarfe sowie großer Verteilleitungen des Fernwärmenetzes in Offenbach

Diese RZ in Gebieten mit höherem Wärmebedarf und außerdem deutlich kürzeren Distanzen zu möglichen Anschlüssen an das bestehende Fernwärmenetz bieten sich vornehmlich für die Einspeisung der Abwärme ins Fernwärmenetz an. Eine Einspeisung in den Rücklauf des Fernwärmenetzes aufgrund der hohen Systemtemperaturen von ca. VL/RL 120/60°C. Da die im

Untersuchungsgebiet bestehenden RZ alle luftgekühlte Serversysteme verwenden, ist die Zuordnung der möglichen Varianten zur Abwärmeauskopplung eingegrenzt.

Main DC1 ist mit einer Frischluftkühlung ausgestattet, sodass eine Auskopplung der Abwärme prinzipiell nach dem Schema in Abbildung 7 erfolgen könnte. Das Kühlsystem ist in mehreren Anlagen von der Größe eines Standardcontainers außerhalb des RZ-Gebäudes angebracht, worin die Frischluft vor dem Eintritt in die IT-Räume konditioniert wird. Eine Nachrüstung dieser Anlagen mit Luft-Wasser-WÜ ist nach Erfahrungen der EVO schwierig bis unmöglich umzusetzen, insbesondere aufgrund des wirtschaftlichen Umfangs solcher Arbeiten. Ebenso ist ein nachträglicher Einbau von Luft-Wasser-WÜ innerhalb des Gebäudes, durch die warme Abluft aus den Servern gefördert und anschließend in die Anlagen zur Kühlung oder in die Umgebung entlassen wird wegen des erforderlichen Bauraums der WÜ nicht praktikabel.

Das **Maincubes** ist mit einer indirekten Frischluftkühlung ausgestattet, die Kyoto-Kühlung genannt wird. Dabei wird die zu kühlende Luft im Umluftprinzip umgewälzt und die abzuführende Wärme in einem Nebenraum der Serversysteme über ein Rotations-WÜ vom inneren auf den äußeren Luftstrom übertragen. Die Serverraumkühlung wird durch adiabate Kühlung unterstützt und die Spitzenlasten werden von KM gedeckt.

Die Möglichkeit zur Abwärmeauskopplung aus RZ mit Umluftkühlgeräten (CRAH-/CRAC) wie beispielsweise im RZ **Main DC2** könnte nach Systemoption 2 aus Abbildung 9 durch eine Anzapfung des Kaltwassersatzes erfolgen. Da keine Daten über im RZ Main DC2 geplanten KM und deren Möglichkeit zur Integration einer Abwärmeauskopplung aus dem Kondensator beschafft werden konnten, wird diese Option nicht weiter betrachtet. Es ist andererseits jedoch auch nicht bekannt, ob in diesem RZ bereits Armaturen verbaut sind, die eine Anzapfung des Kaltwassersatzes für die Abwärmeauskopplung erlauben würden. Da der hierfür notwendige Bauraum und der technische Aufwand für den nachträglichen Einbau für solche Abzweigungen jedoch als gering einzuschätzen ist, wird dies als die naheliegendste Variante angesehen. Mögliche Standorte und die Eigentumsverhältnisse für die WP, um den Temperaturhub für die Einspeisung in das Fernwärmenetz zu realisieren, wären bei der Planung einer derartigen Abwärmenutzung an anderer Stelle zu klären. Für das im Bau befindliche RZ von **Cloud HQ** liegen keine detaillierten Angaben zu verbauten KM oder etwaigen Vorkehrungen für die Nutzbarmachung des Kaltwassersatzes vor. Im geplanten RZ **Main DC2** ist die Abwärmeauskopplung schematisch entsprechend der Systemoption 2 in Abbildung 9 vorgesehen. Hier besteht die Planung, den Kaltwassersatz zwischen dem Umluftkühlgerät und den Anlagen zur Rückkühlung gegen die Umgebung anzuzapfen und einer nachfolgenden Nutzung in einer WP und Einspeisung in das Fernwärmenetz zuzuführen.

4 Simulationsmodell und Auswertung

4.1 Modellierung des Gesamtsystems

Die Modellierung des Gesamtsystems ist auf eine hohe Flexibilität zur Anpassung der darin befindlichen Komponenten ausgelegt, da die Datenlage zu verbauten Anlagen oder vorgesehenen Vorkehrungen zur Wärmeauskopplung unvollständig ist, auch weil einige RZ im Planungsstand noch nicht ausreichend fortgeschritten sind, um Angaben hierzu zu machen. Aus diesem Grund muss das Modell alle wichtigen Systemoptionen abbilden können. Der Aufbau des Modells erfolgt in der Programmierumgebung MATLAB Simulink. Es erlaubt eine stündlich aufgelöste Jahressimulation des RZ-Betriebs sowie die komponentenweise Auflösung von Energiebedarfen und Medienströmen, die

am Ende der Simulation zu Jahressummen aggregiert und für die Berechnung relevanter Kennzahlen verwendet werden. Die meisten der nachfolgend beschriebenen Komponenten wurden, da nicht in entsprechenden Bibliotheken der Software vorhanden, in Eigenentwicklung erstellt und modular aufgebaut, um sie an passender Stelle wiederverwenden zu können. Bei der Ausstattung der luftgekühlten RZ im Modell wird wie heutzutage üblich von einer Kalt- bzw. Warmgang-Einhausung im RZ ausgegangen und es werden die für große RZ (z.B. Colocation-RZ oder Hyperscaler) gängigen Kühlsysteme abgebildet. Darunter sind die **CRAH-Kühlung** und die **indirekte Frischluftkühlung**, welche wie bereits in Kapitel 2 beschrieben den Großteil der Bestandssysteme ausmachen sowie die **indirekte Wasserkühlung**, die eine bedeutende Alternative darstellt. Sowohl das Temperaturniveau der Abwärme als auch die Effizienz der Kühlung machen sie attraktiv und sie könnte deswegen in Zukunft stärkere Verbreitung finden.

Um für die modellierten Kühlsysteme jeweils den Einfluss einer zusätzlichen Abwärmeauskopplung zu bewerten, wird ein Referenzmodell mit dem entsprechenden Kühlsystem ohne Abwärmenutzung erstellt, dem Varianten der Abwärmeauskopplung mit und ohne Wärmespeicher gegenübergestellt werden.

4.1.1 Beschreibung der Referenzmodelle

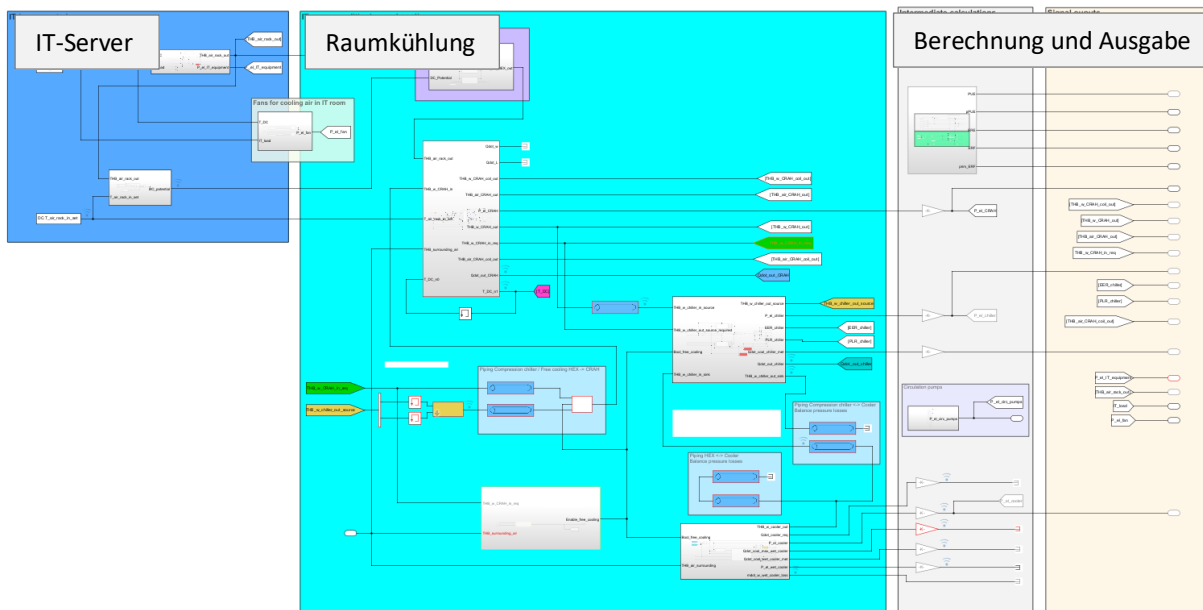


Abbildung 12: Übersicht des Simulationsmodells für die CRAH-Kühlung in MATLAB Simulink

Das **Referenzmodell** der **CRAH-Kühlung** ist nach Abbildung 12 aufgebaut und beinhaltet neben den IT-Serverracks eine CRAH-Einheit zur Abfuhr der Wärme aus dem Luftstrom, eine nachgeschaltete KM und einen RK zur Abfuhr der Wärme gegen die Außenluft. Der Strombedarf der IT-Racks und damit auch die erzeugte Abwärme ist abhängig von einem Lastprofil, welches entweder generisch erzeugt wird oder bei verfügbaren Daten als Zeitreihe eingelesen werden kann. Dieser Modellbaustein berücksichtigt auch eine Abhängigkeit des Strombedarfs der IT-Serverracks von der Lufteintrittstemperatur in die Racks. Grund dafür ist eine temperaturabhängige Anpassung der Drehzahl der Lüfter im Serverschrank [7]. Die CRAH-Einheit besteht aus einem Luft-Wasser-WÜ, dessen Übertragungseigenschaften mithilfe der Betriebscharakteristik abgebildet sind und einem Lüfter, der einen kühlleistungsspezifischen Strombedarf hat nach Oro et al. [31]. Wasserseitig wird der WÜ mit gekühltem Wasser (Kaltwassersatz) aus der KM versorgt, wobei die CRAH-Einheit den Massenstrom

und die erforderliche Kaltwasser-Eintrittstemperatur regelt, um die geforderte Soll-Zulufttemperatur ins RZ zu erreichen und die Kühllast abfahren zu können. Der Betrieb der KM folgt einem hinterlegten Anlagen-Kennfeld, das in Abhängigkeit der Kaltwassertemperatur und der Kühlwassertemperatur vom RK die „Energy Efficiency Ratio“ (EER) vorgibt. Darüber hinaus werden mit der benötigten Kühlleistung, die sich ergebenden Austrittstemperaturen und der Strombedarf berechnet. Die letzte Komponente im Referenzmodell ist der RK. Er kann abhängig vom abgebildeten System unterschiedliche optionale Funktionen nutzen. Im klassischen Kühlbetrieb bei höheren Außentemperaturen wird die Abwärme feucht oder trocken abgeführt. Daneben ist bei geringen Umgebungstemperaturen auch ein Freikühl-Betrieb möglich, welcher einer Kühlung ohne KM entspricht und dadurch eine Energieeinsparung ermöglicht. Der feuchte Kühlbetrieb kann abhängig von Außenbedingungen auch in stufenweiser Teillast betrieben werden und die maximale Kühlleistung ist immer durch die Außenfeuchte und einen maximalen Befeuchtungsgrad des RK begrenzt.

Das **Referenzmodell** der **indirekten Frischluftkühlung** basiert grundlegend auf dem CRAH-System. Daraus konnten Komponenten direkt wiederverwendet werden wie der Block der Serverracks. Der RK wurde zur Air Handling Unit (AHU) der Frischluftkühlung umgebaut. Die Funktionsweise der Kühlung entspricht dem Schema in Abbildung 4. Die Abwärme des Luftstroms im RZ wird mittels Luft-Luft-WÜ auf einen zweiten Luftstrom übertragen und anschließend abhängig von den Umgebungsbedingungen trocken oder feucht gegen die Umgebung abgefahren. Durch die zwei voneinander entkoppelten Luftströme ist ein zweiter Ventilator notwendig, wodurch der Energiebedarf für Ventilation erhöht wird. Die Anlage kann wie der RK aus dem CRAH-Modell bei geringen Außentemperaturen Freikühlung betreiben. Liegen Lufteinlasstemperaturen in die Server unterhalb einer definierten Grenztemperatur, die sich an den ASHRAE-Vorgaben [4] zur Klimatisierung von IT-Räumen orientiert, wird warme Abluft beigemischt. Bei höheren Außentemperaturen kann feuchte Kühlung genutzt werden, wobei die Kühlleistung ebenfalls von den Umgebungsbedingungen begrenzt wird. Eine KM deckt schließlich zu Spitzenlastzeiten fehlende Kühlleistung ab.

Die Modellierung des **Referenzmodells** für **indirekte Flüssigkühlung** basiert ebenfalls auf dem CRAH-System. Der Block der Serverracks wurde hier auf Flüssigkeitskühlung umgestellt. Das Kühlsystem wurde auf einen Trockenkühler reduziert. Das Funktionsprinzip ist schematisch in Abbildung 5 dargestellt. Im Betrieb zirkuliert Wasser zwischen den Racks und dem RK. Es strömt erwärmt aus den Racks und fließt zum RK. Durch die höheren Systemtemperaturen ist bei der Kühlung keine KM oder Befeuchtung mehr notwendig und die Abwärme wird dort direkt gegen die Umgebung abgefahren.

4.1.2 Beschreibung der Modelle mit Abwärmeauskopplung

Die **Varianten der Wärmeauskopplung** setzen sich wie in Kapitel 2 bereits angedeutet aus drei grundlegenden Auskopplungsmöglichkeiten/-Positionen zusammen:

- Luft-Wasser-WÜ direkt im Abluftstrom der IT-Serverracks
- Wasser-Wasser-WÜ im Kaltwasserkreis (Quellseite) KM
- Wasser-Wasser-WÜ im Kühlwasserkreis (Senkenseite), nur bei wassergekühlter KM

In den Varianten wird ein zusätzlicher WÜ in dem entsprechenden Kreislauf installiert. Unabhängig von der Position oder des Wärmeträgermediums im installierten Kreislauf wird das Medium über den WÜ geleitet und ihm dort nutzbare Wärme entzogen. Diese entzogene Wärme wird anschließend bei Bedarf mittels Wärmepumpe auf das notwendige Niveau der Wärmesenke angehoben und schließlich den Wärmeverbrauchern (Senke) im Modell bereitgestellt. Nach der in Abschnitt 3.2 durchgeführten

Analyse zu potenziellen Wärmesenken in der Umgebung der RZ im Untersuchungsgebiet Offenbach stellt sich das FW-Netz als weitaus größte verfügbare Wärmesenke für die Standorte heraus. Einzelverbraucher, die unter Umständen Wärme auch auf geringerem Temperaturniveau als dem Netzvorlauf verwerten könnten, sind fast ausschließlich selbst bereits am FW-Netz im Stadtgebiet angeschlossen. Dies gilt sowohl für Wohn- und Bürogebäude als auch für Verbraucher im Dienstleistungsgewerbe. Es wird daher in den folgenden Betrachtungen für die Jahressimulationen lediglich das FW-Netz im Stadtgebiet Offenbach als Wärmesenke für die Abwärme aus dem RZ-Betrieb berücksichtigt. Des Weiteren wird aufgrund der hohen Systemtemperaturen in dem betrachteten Netz von ca. 120°C Vorlauf und 60°C Rücklauf eine Einspeisung in den Rücklauf betrachtet. Abhängig vom Standort des betrachteten RZ und der dort verlegten Leitungskapazitäten wird anhand von realen Messdaten der bestehenden Einspeisung ins FW-Netz ein freies und durch Abwärme substituierbares Potenzial berechnet. Dieses wird durch die Rohrdimensionen und die Netztemperatur (Transportkapazität der Leitungen) sowie den realen Lastgang im Netz unter Berücksichtigung nicht substituierbarer Einspeiser wie einem Müllheizkraftwerk begrenzt.

4.1.3 Relevante Kennzahlen zur Beschreibung des RZ-Betriebs

Zur Bewertung der modellierten RZ sind Auswertungen relevanter **Kennzahlen** implementiert. Dazu werden für alle beteiligten Hauptkomponenten (CRAH, KM, Kühler, WP) sowie Teil- und Hilfskomponenten (z.B. Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV), Beleuchtung, Pumpen, Ventilatoren) Strombedarfe berechnet und die relevanten Energieströme erfasst und ausgewertet. Zu diesen Kennzahlen gehört die „Power Usage Effectiveness“

$$PUE = \frac{E_{RZ}}{E_{IT}} \quad (3),$$

welche den Energiebedarf des gesamten RZ E_{RZ} ins Verhältnis zum Energiebedarf der IT-Server E_{IT} setzt. Der PUE bewegt sich im Bereich von 3,0 (sehr ineffizient) bis 1,2 (sehr effizient) [32]. RZ mit neuen Kühltechnologien können auch Werte unter 1,2 erreichen, sind aber theoretisch auf 1,0 limitiert. Der PUE kann auch auf einzelne Komponenten angewandt werden, dann wird er zur „partial Power Usage Effectiveness“

$$pPUE = \frac{E_{Komp}}{E_{IT}} + 1 \quad (4).$$

Um eine Unterschreitung der 1,0 wird in der Formel eine eins aufaddiert. Damit kann die Effizienz von einzelnen Komponenten wie z.B. der Kühlung im Kontext des RZ bewertet werden. Es werden auch Kennzahlen zur Bewertung der Nutzung der Abwärme herangezogen. Die „Energy Reuse Efficiency“

$$ERE = \frac{E_{RZ} - E_{WE}}{E_{IT}} \quad (5),$$

die die Differenz des Energiebedarfs des gesamten RZ E_{RZ} und der wiederverwendeten Energie E_{WE} ins Verhältnis zum Bedarf der IT-Server E_{IT} setzt. Außerdem den „Energy Reuse Factor“

$$ERF = \frac{E_{WE}}{E_{RZ}} \quad (6),$$

der die wiederverwendeten Energie E_{WE} ins Verhältnis zum Gesamtbedarf des RZ E_{RZ} setzt. Wenn die Endenergiesummen aus Gleichung 6 durch Primärenergiesummen ersetzt werden, erhält man den „Primary Energy Reuse Factor“

$$ERF_{PE} = \frac{E_{WE} * f_{PE,FW}}{E_{RZ} * f_{PE,el}} \quad (7).$$

Die beiden Kennzahlen zur Bewertung der Abwärmenutzung, ERE und ERF, verbessern sich mit steigendem Anteil wiederverwendeter Energie E_{WE} , können ihr theoretisches Optimum aber nicht erreichen. Verluste bei der Wärmeübertragung und beim leitungsgebundenen Transport von Wärme abführenden Medien sowie die Tatsache, dass nicht die gesamte Energie des RZ wiederverwendet werden kann, stehen dem entgegen. Beispielsweise ist es nur unter erheblichem Aufwand möglich und im hier vorgestellten Rechenmodell nicht implementiert, Abwärme aus Leistungselektronik und Kabeln der unterbrechungsfreien Stromversorgung zu entziehen.

4.1.4 Bilanzgrenzen

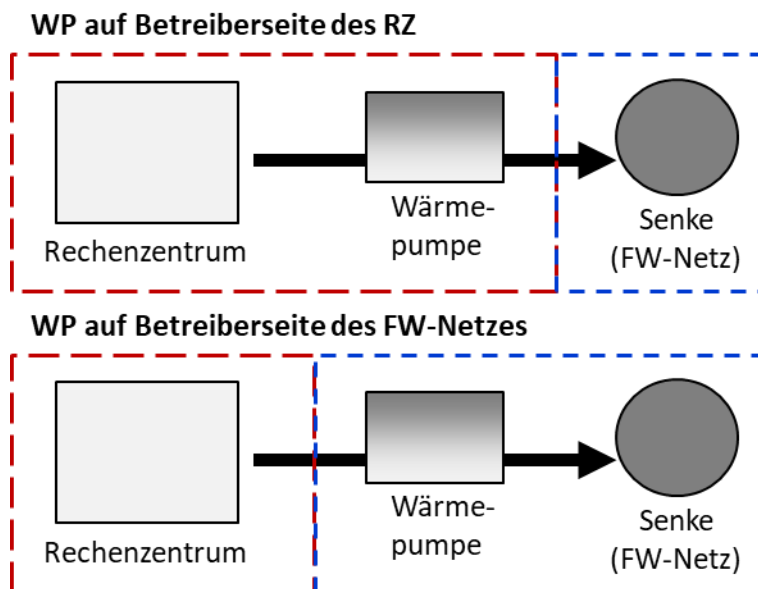


Abbildung 13: Schematische Darstellung der Zuordnung von Wärmepumpen innerhalb der Bilanzgrenzen

Bei der Bewertung der Abwärmenutzung ist die Bilanzgrenze entscheidend, da sie einen erheblichen Einfluss auf die Effizienzkennzahlen hat. Wie in Abbildung 13 erkennbar ist, kann die WP entweder dem RZ oder der Wärmesenke (FW-Netz) zugeordnet werden. Durch die dem Kühlsystem des RZ vorgeschaltete Wärmeauskopplung reduziert die Abwärmenutzung den Kühlbedarf und damit auch den Gesamtstrombedarf des RZ. Wird die WP in die Bilanz des RZ einbezogen, erhöht sich der Gesamtstrombedarf durch die zusätzliche Stromaufnahme der WP. Der Einbezug der WP in die Bilanzgrenze hat also einen negativen Einfluss auf die PUE und einen positiven den ERF. Um dies zu verdeutlichen, ist in Abbildung 14 ein Beispiel dargestellt, das einen Referenzfall ohne Abwärmenutzung und einen Fall mit Abwärmenutzung enthält. Bei letzterem wird die Bilanzgrenze nach beiden Verfahren gezogen, so dass insgesamt drei Varianten verglichen werden. Sowohl PUE als auch ERF sinken in der Bilanzierung ohne Abwärmenutzung im Vergleich zu einer mit Abwärmenutzung. Der ERE bleibt unverändert, da die nutzbare Abwärmemenge und der Bedarf des RZ um den Strombedarf der WP steigt. Ein erster inoffizieller Referentenentwurf des Energieeffizienzgesetzes (EnEg) vom Oktober 2022 bezieht die WP nicht in die Bilanzierung ein. Dieser

wird derzeit überarbeitet und es ist keine andere gültige Regelung bekannt, ob im Falle einer Abwärmenutzung eine dafür eingesetzte WP in den Gesamtbedarf des RZ einbezogen werden muss. Im Folgenden wird der Ansatz verfolgt die WP in die Bilanz des RZ einzubeziehen.

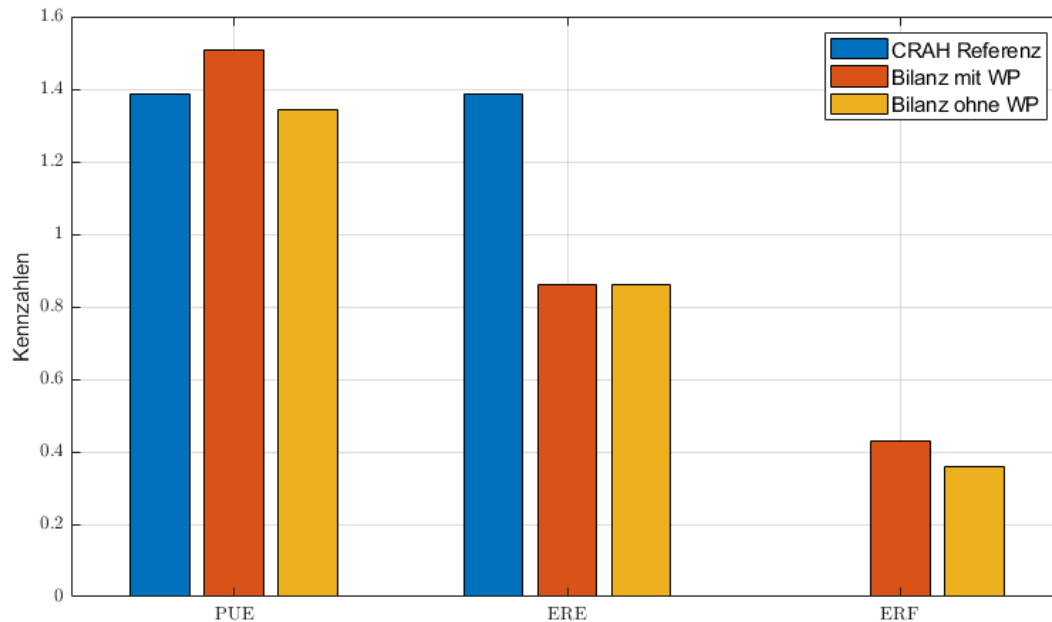


Abbildung 14: Gegenüberstellung der Kennzahlen für das Referenzmodell CRAH (ohne Abwärmenutzung) und der Auskopplungsoption 1 (CRAH-Kühlung) nach den zwei Ansätzen die Bilanz zu ziehen

4.2 Ergebnisdiskussion

4.2.1 Gegenüberstellung der Kühlmethode

Die Ergebnisse der Jahressimulationen der Referenzmodelle sind in Abbildung 15 dargestellt. Als Grundlage dient hier ein fiktives RZ innerhalb des Versorgungsgebietes der Offenbacher FW, welches sich in den Varianten lediglich durch die Kühlmethode unterscheidet. Die Simulationsparameter orientieren sich dabei an ASHRAE Vorgaben und Rechercheergebnissen zu gängigen Kühloptionen aus AP1 (s. Anhang A-1 für detaillierte Auflistung)

- IT-Last: 20 MW mit Wochenlastgang
- Serverraumklima: 18 – 27°C
- Senke: FW-Netz Rücklauf
- Kühlmethode abhängig vom Modell
- Kühloptionen (Freikühlung | Nasskühlung):
 - CRAH mit KM: $\leq 10^\circ\text{C}$ | $\geq 20^\circ\text{C}$
 - Frischluftkühlung: $\leq 22^\circ\text{C}$ | $\geq 24^\circ\text{C}$
 - Indirekte Wasserkühlung: stets Freikühlung

Im linken Diagramm sind für die drei untersuchten Kühltechnologien die jährlichen Strombedarfe der an der Kühlung beteiligten Komponenten und weiterer, nicht zum Strombedarf des IT-Equipments zählbaren Anlagen, dargestellt. Zu den vertretenen Komponenten gehören die KM ($W_{el,KM}$), der RK ($W_{el,Kuehler}$), die Ventilatoren ($W_{el,Vent.}$) sowie die Pumpen ($W_{el,Pumpen}$) und die Summe der verschiedenen Analgen wie der unterbrechungsfreien Stromversorgung, peripherer Komponenten und

Transformatorverluste ($W_{el,Versch.}$). Die PUE liegt bei den Kühlmethoden zwischen 1,16 (indirekte Wasserkühlung) und 1,39 (CRAH-Kühlung), was den Zusammenhang zwischen Effizienz und Kühlmethode verdeutlicht. Das rechte Diagramm zeigt die Relation des Summenbedarfs der Kühlkomponenten ($W_{el,Kuehlung}$) und der Summe verschiedener Analgen ($W_{el,Versch.}$) zum Bedarf des IT-Equipments ($W_{el,IT}$). Die Unterschiede im Bedarf des IT-Equipments zwischen der einzelnen Kühlmethode ist bedingt durch den bereits bei der Modellierung beschriebenen temperaturabhängigen Bedarf dieser IT-Komponente. Die Rack Lüfter erhöhen ihre Drehzahl bei höherer Lufttemperatur und ihr Strombedarf steigt an. Durch die effizientere indirekte Frischluftkühlung resultiert eine im Jahresmittel geringere Zulufttemperatur in die Racks.

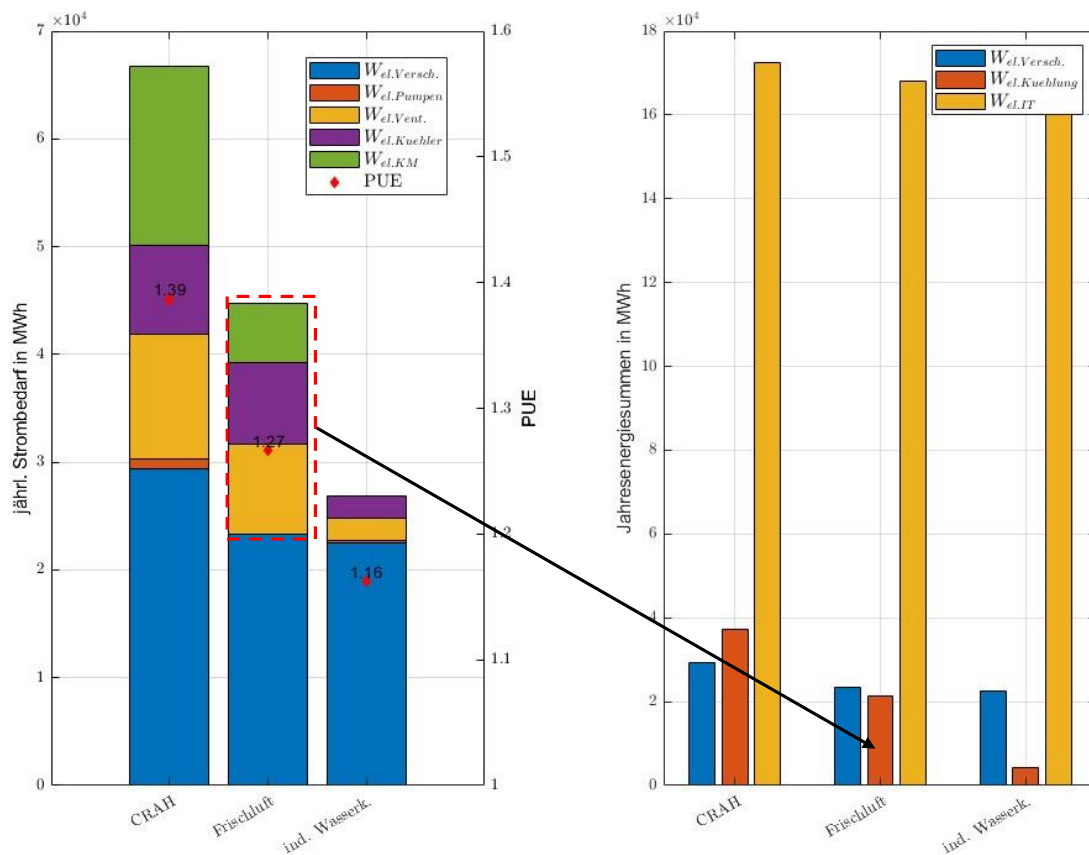


Abbildung 15: Gegenüberstellung Referenzmodelle zur Kühlung eines 20 MW Rechenzentrums

Zur Gegenüberstellung der Kühlmethoden im Hinblick auf die Abwärmenutzung wird das bereits betrachtete fiktive RZ im Versorgungsgebiet des Offenbacher FW-Netzes platziert, da das Wärmenetz das größte Potenzial zur Nutzung von Abwärme bietet. Allerdings hat es begrenzte Kapazitäten und kann besonders im Sommer durch einen saisonalen Engpass nur begrenzt Wärme aufnehmen. Dieser Umstand wird durch einen Grundlastversorger (Müllheizkraftwerk) verstärkt. Dadurch wird die Einspeisung besonders im Sommer maßgeblich begrenzt. Die modellierten Kühlsysteme bieten wie in Kapitel 2 bereits erläutert aus technischer Sicht mehrere (System-)Optionen, Abwärme auszukoppeln. Für die Gegenüberstellung der Kühlmethoden wird bei der CRAH-Kühlung die Wärme direkt in der Abluft (Variante „CRAH Option 1“) sowie im Kaltwassersatz quellseitig der KM (Variante „CRAH Option 2“) ausgekoppelt. Für die Frischluftkühlung wird nur die Option betrachtet, Abwärme direkt aus der Abluft der Server zu entziehen (Variante „Frischlufft Option 5“) und bei der indirekten Wasserkühlung wird Abwärme aus dem Zufluss zur Rückkühleinheit entzogen (Variante „ind. Wasserk. Option 6“).

Sowohl die Kühlmethode als auch die Position der Abwärmeauskopplung haben Einfluss auf die Effizienz und entziehbare Wärmemenge (s. Abbildung 16).

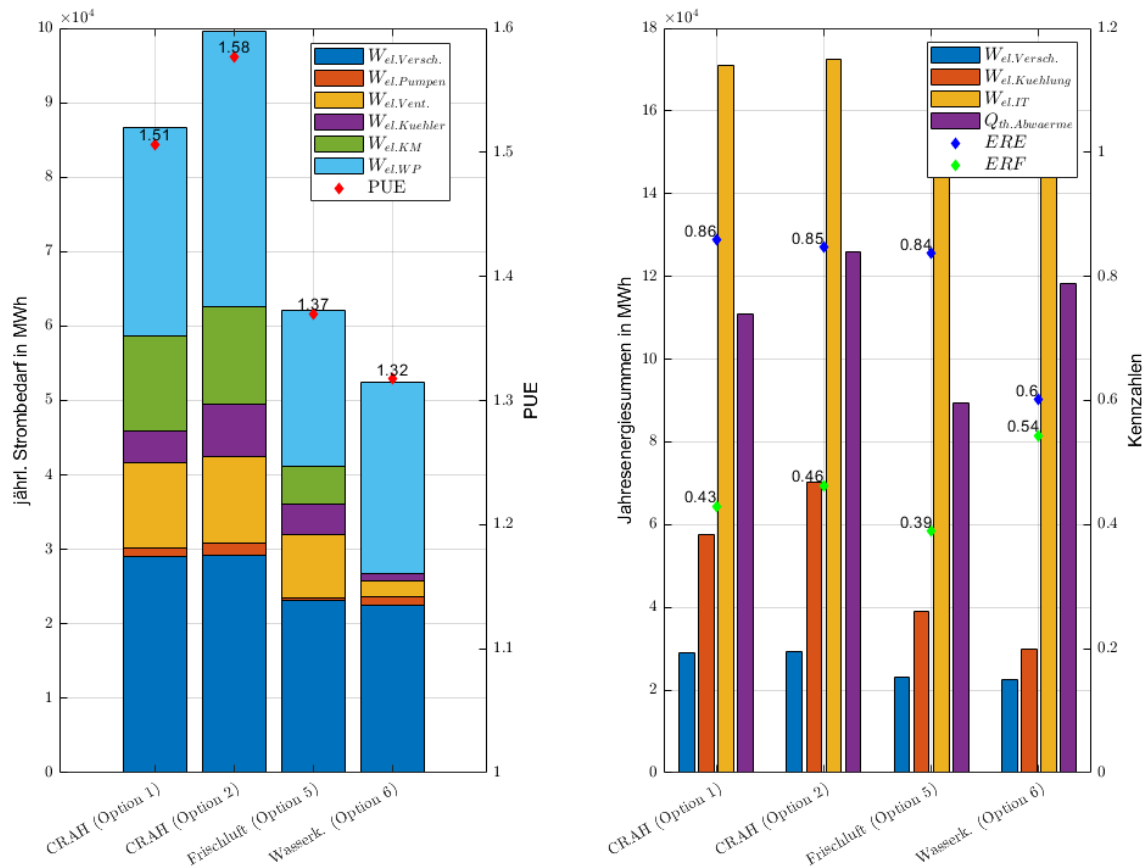


Abbildung 16: Gegenüberstellung der Modelle mit Abwärmenutzung zur Kühlung eines 20 MW Rechenzentrums

Die CRAH-Kühlung mit Wärmeauskopplung im quellseitigen Kaltwassersatz der KM (Systemoption 2) hat einen höheren Bedarf an elektrischer Arbeit der einzelnen Kühlkomponenten als die Auskopplung in der Abluft (Systemoption 1) der Server. Allerdings ist bei ersterer auch eine höhere Wärmemenge für die Auskopplung erzielbar. Es fällt auf, dass die Frischluftkühlung einen deutlich geringeren Gesamtstrombedarf hat als die CRAH-Kühlung. Nur die indirekte Wasserkühlung ist noch effizienter und hat den geringsten Gesamtstrombedarf. Mit der Nutzung der Abwärme liegen die CRAH-Varianten, wie auch die Frischluftkühlung, bei der ERE im Bereich von knapp über 0,8. Die Wasserkühlung liegt hier mit 0,6 noch niedriger. Die Auswertung des ERF zeigt, dass alle Varianten der Kühlsysteme und Optionen der Wärmeauskopplung einen Anteil von etwa 40 % des gesamten Bedarfs an elektrischer Energie des RZ wiederverwenden. Die indirekte Wasserkühlung erreicht sogar über 50 % und ist damit auch in Bezug auf die Abwärmenutzung die effizienteste Variante. Da es im hier betrachteten Fall keine weiteren Abwärme ins FW-Netz einspeisenden RZ gibt und die örtliche Dichte an RZ im Rhein-Main-Gebiet hoch ist [1], sind die Ergebnisse eher als Maximalwerte zu sehen. Mit weiteren einspeisenden RZ, die an das FW-Netz angeschlossen sind, nimmt das Potenzial der Wärmesenke für alle RZ ab, was sich im Anteil der wiederverwendbaren Energie niederschlagen wird. Aus diesem Grund ist eine Betrachtung des Speicherbedarfs an einem konkreten Beispiel sinnvoll.

4.2.2 Speicherbedarf

Zur Betrachtung des Speicherbedarfs werden zwei am gleichen Standort (EVO-Campusgelände) liegenden RZ gewählt, die sich sowohl in ihrer installierten Kühlkapazität als auch in Parametern der Betriebsführung unterscheiden. Beide RZ sind luftgekühlt und fallen unter die Frischluft-Kühlung, weswegen auch nur die Systemoption 5 zur Abwärmenutzung in Frage kommt. Das kleinere RZ „Maincubes“ hat eine Kühllast von ca. 6 MW und eine sogenannte Kyoto-Kühlung, die hier als reine indirekte Frischluft-Kühlung behandelt wird. Daneben liegt das größere Main DC1 mit einer angesetzten Kühllast von 16 MW. Es verfügt über Lüftungsgeräte zur Kühlung, welche neben der indirekten auch die Option zur direkten Kühlung bieten. Im vorliegenden Fall wird es aufgrund der höheren angegebenen Effizienz als rein direkte Frischluftkühlung behandelt. Beide nutzen zur Minimierung der KM-Laufzeit eine adiabate Kühloption.

Die zwei RZ sind besonders interessant für die Bestimmung eines Speicherbedarfs, da sie beide auf dem Gleichen Grundstück stehen und somit den gleichen Einspeisepunkt in die Senke hätten. Als Wärmesenke dient hierbei der Rücklauf des FW-Netzes, da eine reguläre Einspeisung eine Anhebung des Abwärme Temperaturniveaus auf über 100°C erfordern würde. Das freie Potenzial für die Einspeisung ins FW-Netz ist abhängig vom Bedarf der angeschlossenen Verbraucher. Da die Verbraucher über das verzweigte Netz verteilt sind, ist die freie Kapazität zur Einspeisung am Anschlusspunkt auch von den verfügbaren Kapazitäten der Rohrleitung abhängig. In diesem Projekt wurde ein vereinfachtes Verfahren als Alternative zur detaillierten Netzberechnung angewandt. Mit Hilfe von Einspeisedaten der EVO und eines Netzplans (s. vereinfachte Darstellung in Abbildung 11) wurde der Massenstrom für die Rohrleitung am Anschlusspunkt abgeschätzt. Mit Hilfe der Rücklauftemperatur des FW-Netzes (ca. 60°C) und der Zieltemperatur, auf welche die WP die Abwärme anhebt (80°C) wird die freie Kapazität für diese Einspeisestelle berechnet. Dadurch reduziert sich die freie Kapazität zur Einspeisung vom gesamten Jahresbedarf (abzüglich eines Müllheizwerkes) des FW-Netzes von etwa 370 GWh auf etwa 70 GWh. Es folgt ein Auszug der Simulationsparameter für die Betrachtung des Speicherbedarfs (s. Anhang A-2 für vollständige Parameterliste):

- IT-Last: 6 bzw. 16 MW mit Wochenlastgang
- Serverraumklima: 18 – 27°C
- Frischluftkühlung indirekt/direkt
- Freikühlung und Nasskühlung
- Senke: Rücklauf FW-Netz

Abbildung 17 zeigt den Einfluss der Engstelle in der Wärmesenke (FW-Netz) auf die Effizienz und Menge der nutzbaren Abwärme. Sie stellt das maximale Potenzial (links) den Varianten als alleinige Einspeiser (mittig) und der gemeinsamen Einspeisung gegenüber. Beim Vergleich der drei Varianten wird deutlich, wie sich die Strombedarfe und nutzbaren Abwärmemengen abhängig von der Ausprägung der Engstelle verändern. Im Optimalfall (Variante „max. Potenzial“), d.h. ohne Einschränkungen bei der Einspeisung und theoretisch jederzeit möglicher Auskopplung der im RZ abzuführenden Wärmeleistung, können ca. 70 bis 80 % des gesamten RZ-Strombedarfes als Abwärme genutzt werden. Wenn das RZ, abhängig vom Standort, die entsprechende Engstelle im FW-Netz zur alleinigen Einspeisung zur Verfügung hat, kann jedes RZ 35 % (Main DC1) bzw. 44 % (Maincubes) des Gesamtbedarfs als Abwärme nutzen. Diese Unterschiede lassen darauf schließen, dass der Engpass das leistungsstärkere RZ stärker beeinflusst als das leistungsschwächere. Sobald jedoch beide RZ gleichzeitig einspeisen (Variante "geteilte Einspeisung"), sinkt das Potenzial für beide

erwartungsgemäß und der Anteil der nutzbaren Abwärme zum Gesamtbedarf verringert sich auf 22 % (Main DC1) bzw. 28 % (Maincubes).

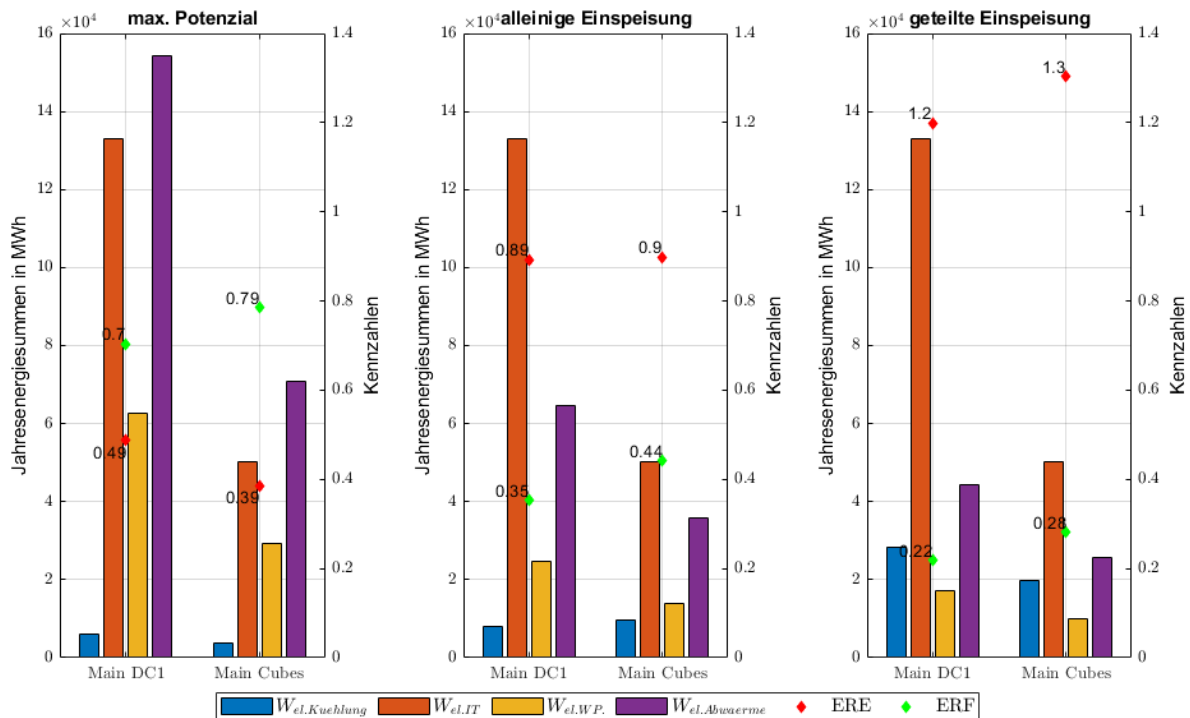


Abbildung 17: Gegenüberstellung der drei Varianten der Engstelle ohne Engpass (max. Potenzial), als alleinige Einspeiser (alleinige Einspeisung) und beide zusammen (geteilte Einspeisung) bei der Einspeisung ins FW-Netz

Abschließend lässt sich sagen, dass sich die auskoppelbaren Abwärmemengen bei mit zunehmender Speicherkapazität erhöhen und mit ihnen die Effizienzkennzahlen bis zum Niveau der Variante „max. Potenzial“ verbessert werden. Der theoretisch notwendige Speicherbedarf thermischer Energie $Q_{th,Sp}$ ergibt sich aus der Differenz der Summen nutzbarer Abwärme zwischen den Varianten "alleinige Einspeisung" und "geteilte Einspeisung" im Vergleich zum "maximalen Potenzial":

$$Q_{th,Sp} = \Sigma Q_{th,Potenzial} - \Sigma Q_{th,Abwaerme,Var} \quad (8)$$

Tabelle 4 zeigt die nutzbaren Wärmemengen an Abwärme der drei betrachteten Varianten des Engpasses im FW-Netz. Wenn man die freie Kapazität am Einspeisepunkt (Jahressumme: 71,4 GWh) hinzunimmt, wird deutlich, dass nur Maincubes als alleineinspeisendes RZ ihr volles Potenzial zur Abwärmennutzung ausschöpfen könnten. Damit beide RZ ERF von 30 – 40% erreichen können, muss die freie Kapazität am Einspeisepunkt des Netzes erhöht werden. Dies kann durch die Einbindung zusätzlicher Speicherkapazitäten für die zeitliche Entkopplung von Abwärmepotenzial und Wärmebedarf im Netz erreicht werden. Zudem kann durch bauliche Eingriffe und eine Vergrößerung der Rohrdimensionen die Transportkapazität der Leitungen erhöht werden, während Druckverluste in einem zum bestehenden Aufbau vergleichbaren Rahmen bleiben.

Tabelle 4: Übersicht der nutzbaren Abwärmemengen für die drei Varianten des Engpasses

Abwärmemenge	Main DC1	Maincubes
Variante max. Potenzial	154,3 GWh	70,8 GWh
Variante alleinige Einspeisung	64,7 GWh	35,9 GWh

Variante geteilte Einspeisung

44,4 GWh

25,7 GWh

Eine Übersicht des Speicherbedarfs für die Einspeisung der Abwärme ist in Tabelle 5 aufgelistet. Daraus folgt ein Bedarf je nach betrachtetem Fall von etwa 35 bis 155 GWh. Dieser Bedarf kann durch einen saisonalen Speicher gedeckt werden, um die Abwärme aus der Sommerperiode im Herbst/Winter verfügbar zu machen.

Tabelle 5: Übersicht des Speicherbedarfs

Speicherbedarf	Main DC1	Maincubes
alleinige Einspeisung	89,6 GWh	34,9 GWh
geteilte Einspeisung	155,0 GWh	

Es besteht noch erhebliches Optimierungspotenzial hinsichtlich der Energieeffizienz der Abwärmenutzung (ERE), da das Optimum bei null liegt und in beiden RZ ein Wert von lediglich 0,39 bis 0,49 erreicht wird, selbst ohne den Engpass bei der Wärmesenke. Dies ist auf die hohen Systemtemperaturen des zugrunde liegenden Fernwärmenetzes zurückzuführen. Um Abwärme darin nutzbar zu machen, muss diese auf einem Niveau über 60°C ausgekoppelt und deutlich darüber erhöht werden, um die Wärmemenge zu steigern. Dadurch wird der Betriebspunkt der Wärmepumpe verschlechtert, was zu einem höheren Strombedarf führt und sich auf den Gesamtbedarf des RZ auswirkt. Eine Lösung hierfür bieten Wärmenetze der 4. oder 5. Generation mit niedrigeren Temperaturen unter 70°C [33], welche die Abwärmenutzung in RZ wesentlich effizienter gestalten. Je nach Systemtemperatur haben die in diesen Wärmenetzen eingesetzten Wärmepumpen einen deutlich geringeren Strombedarf oder können bei geringerer Netztemperatur oder höherer Abwärmtemperatur aus den RZ sogar ganz entfallen.

4.2.3 Potenzielle CO₂ Einsparung der Abwärmenutzung

Als Ausgangslage zur Bestimmung des Potenzials der Einsparung von CO₂ wird das bereits erläuterte RZ mit 16 MW IT-Kühllast als alleiniger Einspeiser im Offenbacher Fernwärmeversorgungsgebiet ohne Speicher im Netz betrachtet. Die Jahressimulation liefert folgende Ergebnisse der Energiesummen:

- Freie Kapazität im FW-Netz: 71,4 GWh
- Gesamtbedarf des RZ: 183,4 GWh
- Abwärmemenge: 64,7 GWh
- Strombedarf der WP: 24,6 GWh

Es wird mit den entstehenden Emissionen bei der Erzeugung für Fernwärme gerechnet, da sie durch die Nutzbarmachung der Abwärme verdrängt wird. Dem entgegen gesetzt wird der Strom für den Betrieb der Wärmepumpen, welcher die Einsparung an Emissionen je nach verwendetem Strommix mindert. Für die Ausweisung von Emissionsfaktoren der Wärme aus einem FW-Netz wird seitens der Netzbetreiber häufig die Stromgutschriftmethode nach dem FW 309 Teile 1 und 7 mit Verwendung von Emissionsfaktoren aus dem Gebäudeenergiegesetz (GEG) verwendet. Diese Methode ist umstritten, weil sie im Vergleich zu anderen Methoden sehr geringe Werte liefert. Dabei wird die durch Kraft-Wärme-Kopplung erzeugte Wärme mit Emissionsfaktoren der eingesetzten Brennstoffe belegt und parallel wird der ins Netz eingespeiste Strom mit Emissionsfaktoren des Verdrängungsstrommixes

gegengerechnet und von den Emissionen für die Wärmebereitstellung subtrahiert. Der Emissionsfaktor nach dem GEG des Verdrängungsstrommixes basiert darauf, dass der eingespeiste Strom an anderer Stelle im Netz „nicht erzeugt“ werden muss und liegt deswegen bedeutend höher als der Emissionsfaktor des eigentlichen Strommixes:

- Verdrängungsstrommix (GEG): 860 g/kWh [34]
- Strommix (GEG): 560 g/kWh [34]
- Strommix in D. 2021 (UBA): 420 g/kWh [35]

Dadurch entstehen sehr geringe, teilweise sogar negative Emissionsfaktoren für die Wärme aus dem FW-Netz, die aber auf null begrenzt werden. So kann der Anschein entstehen, dass die Wärmeversorgung bereits CO₂-neutral ist, obwohl dafür weiterhin fossile Energieträger genutzt werden. Für die Berechnung werden hier Emissionsfaktoren der Kreditbank für Wiederaufbau (KfW) [36] angesetzt:

- Fernwärme: 270 g/kWh
- Strom: 366 g/kWh (Strommix) bzw. 0 g/kWh (erneuerbare Quelle)

So berechnet sich die potenzielle Einsparung für die Verdrängung fossiler Anteile in der Erzeugung von FW nach folgender Gleichung:

$$CO_2 - \text{Einsparung} = Q_{th,Abw\u00e4rme} * f_{CO_2,FW} - W_{el,WP} * f_{CO_2,Strom} \quad (8)$$

Unter Maßgabe der oben angegebenen Werte führen die eingespeisten Abwärmemengen aus dem RZ zu CO₂-Einsparungen von:

- Strommix: 9.027 t_{CO2}/a
- Strom aus erneuerbaren Quellen: 18.126 t_{CO2}/a

Werden diese Einsparungen ins Verhältnis zum gesamten Strombedarf des RZ gesetzt, folgt eine spezifische Einsparung von:

- Strommix: 49,2 g/kWh/a
- Strom aus erneuerbaren Quellen: 98,8 g/kWh/a

Hier muss darauf hingewiesen werden, dass diese Einsparung direkt von der ausgekoppelten Abwärmemenge und damit wie bereits in den Kapiteln 4.1.2 und 4.2.2 beschrieben, abhängig vom Kühlsystem und besonders vom Potenzial zur Wärmeeinspeisung in der Wärmesenke ist.

4.2.4 Wirtschaftliche Potenziale der Abwärmenutzung

Um die Wirtschaftlichkeitspotenziale der Abwärmenutzung in Offenbacher RZ zu bewerten, werden die Gestehungskosten der nutzbar gemachten Abwärme für drei Finanzierungsvarianten bestimmt. Es wird wie bereits bei der Bestimmung der technischen Kennzahlen des RZ-Betriebs beschrieben an der Bilanzgrenze differenziert. Dazu gehört die Unterscheidung, zu welchem Anteil zwischen 0 und 1 die wesentlichen Komponenten zur Abwärmenutzung dem RZ-Betreiber oder dem Betreiber des Fernwärmenetzes zugeordnet werden soll (s. Tabelle 6).

Tabelle 6: Zuordnung der wesentlichen Komponenten zur Abwärmenutzung in RZ für die drei Finanzierungsvarianten

Zuordnung Investitionen	Variante 1	Variante 2		Variante 3
	RZ-Betreiber	RZ-Betreiber	Netzbetreiber	Netzbetreiber
Energiezentrale	1	0	1	1
Wärmepumpe	1	0	1	1
FW-Übergabestation	1	0	1	1
Wärmeübertrager	1	1	0	1
Leitungsführung	1	0,5	0,5	1
Armaturen	1	0,5	0,5	1
Pumpen inkl. Druckhaltung	1	0,5	0,5	1

Für die entsprechenden Komponenten werden zunächst die aus kapital-, bedarfs-, und betriebsgebundenen Kosten bestehenden Annuitäten nach VDI 2067 Teil 1 [37] bestimmt und im geförderten Fall mit Fördermöglichkeiten nach der „Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft“ sowie der „Bundesförderung für effiziente Wärmenetze“ (BEW) verrechnet. Die Fördersummen sind allerdings sowohl mit maximalen absoluten Förderbeträgen sowie (beim BEW) mit der Wirtschaftlichkeit gedeckelt ist. Bei Letzterem wird dadurch eine Überförderung ausgeschlossen. Die Betrachtungszeiträume wurden entsprechend für den FW-Netzbetreiber mit 20 – 30 Jahren und für den RZ-Betreiber, wie es bei RZ-Ausstattung üblich ist, entsprechend kürzer angesetzt.

Die Gestehungskosten sind in besonderem Maße vom Strompreis für den Betrieb der Wärmepumpen und von den zuletzt stark gestiegenen Preisen und daraus resultierenden hohen Investitionen abhängig. Der Strompreis ist durch die aktuellen Entwicklungen im Osten Europas auf einem sehr hohen Niveau. Im Jahr 2022 lag der Großhandelspreis laut der Bundesnetzagentur [38] im Mittel bei 23,5 Ct/kWh in der reinen Beschaffung (netto). Im Vergleich dazu lag er im Jahr 2021 bei 9,7 Ct/kWh (netto). Es ist davon auszugehen, dass sich der Markt im Verlauf des aktuellen Jahres etwas beruhigt und der Preis wieder fällt. Das zeichnet sich bereits im aktuell laufenden ersten Quartal ab. Aufgrund der unsicheren Lage der Strompreise werden für die Berechnung zwei Preise herangezogen, um zwei Stufen der Preissenkungen zu betrachten. Das ist zum einen der Mittelwert aus 2019/20 mit einem reinen Beschaffungspreis (netto) von 6,4 Ct/kWh (netto) und zum anderen der Mittelwert aus 2021/22 mit 16,6 Ct/kWh (netto). Auf diese Preise werden noch Abgaben, Steuern und Umlagen aufgeschlagen und die Stromkosten belaufen sich somit auf 13,6 bzw. 25,8 Ct/kWh brutto. Falls der Wärmenetzbetreiber die WP betreibt, kann er mit geringeren Kosten kalkulieren, weil er z.B. aufgrund einer vorhandenen Vorsteuerabzugsberechtigung keine MwSt. zahlen muss.

Tabelle 7: Übersicht der Wirtschaftlichkeitsberechnung und der resultierenden Gestehungskosten mit Förderung für das Strompreinsniveau 2021/22

Zusammenfassung		Variante 1	Variante 2		Variante 3
			RZ-Betreiber	Netzbetreiber	
Betrachtungszeitraum	a	10	10	20	20
Kapitalgebundene Kosten	€/a	2.746.028	319.120	1.891.760	2.172.165
Gesamtinvest Jahr 1	€	37.432.518	4.672.500	28.309.511	31.459.511
Bedarfsgebundene Kosten	€/a	7.616.856	34.105	6.941.405	6.972.625
Betriebsgebundene Kosten	€/a	1.391.693	188.364	1.383.966	1.519.559
Annuitäten	€/a	11.754.577	541.588	10.217.131	10.664.350
Gestehungskosten Abwärme	Ct/kWh	18,2	0,8	16,6	16,5

Mit Einbezug der Jahressumme der nutzbaren Abwärme können die Gestehungskosten für die Abwärme für die drei Finanzierungsvarianten bestimmt und aktuellen Preisen für Fernwärme gegenübergestellt werden. In Tabelle 7 sind die Investitionssummen und die einzelnen jährlichen Kosten mit den Annuitäten für das Strompreisniveau von 2021/22 aufgeführt. Hier ist besonders zu erwähnen, dass der Gestehungspreis in der Variante 2 auf der RZ-Betreiber-Seite als Kosten bei der Netzbetreiber-Seite berücksichtigt werden.

Bei dem hier betrachteten Fall mit Förderung betragen die Gestehungskosten der Abwärme ca. 17 – 18 Ct/kWh. Sie liegen damit auch ohne Gewinnmarge über aktuellen Preisen für Fernwärme, die sich am Offenbacher Beispiel bei ca. 15,3 Ct/kWh (Jahresverbrauch 30.000 kWh/a) belaufen [39]. Bei Annahme einer Gewinnmarge von 10 % bleibt ein Gestehungspreis von ca. 13,8 Ct/kWh. Damit ist für das betrachtete Preisniveau auch mit Einbezug einer Förderung die Abwärmenutzung unwirtschaftlich. Es folgt eine um den Strompreis für 2019/20 und die ungeforderte Version mit dem Preisniveau von 2021/22 erweiterte Übersicht der Berechnungen (s. Tabelle 8). Detailliertere Ergebnisse und Ansätze zu allen berechneten Varianten sind dem Anhang A-3 bis A-6 zu entnehmen.

Tabelle 8: Gestehungskosten der Abwärme für zwei Strompreise mit Preisniveaus der Jahre 2019/20 sowie 2021/22 mit (m.F.) und ohne berücksichtigter Förderung (o.F.)

Gestehungskosten in Ct/kWh	Variante 1	Variante 2		Variante 3
		RZ-Betreiber	Netzbetreiber	
Preis 2021/22 (o.F.)	20,9	1,36	19,1	18,7
Preis 2021/22 (m.F.)	18,2	0,84	16,6	16,5
Preis 2019/20 (o.F.)	15,9	1,34	14,6	14,2
Preis 2019/20 (m.F.)	13,2	0,81	12,2	12,0

Das deutlich geringere Preisniveau führt dazu, dass die Gestehungskosten ohne Förderung auf ca. 14 – 16 Ct/kWh und mit Förderung auf ca. 12 – 13 Ct/kWh für die drei Finanzierungsvarianten sinken. Die Abwärmenutzung ist nach der ersten Finanzierungsvariante ohne Förderung nicht wirtschaftlich darstellbar und die Varianten 2 und 3 bieten noch eine Gewinnmarge von 0,8 – 1,2 Ct/kWh. Mit Einbezug der Förderung steigt auf den ersten Blick die Gewinnmarge auf 2,2 – 3,4 Ct/kWh. Allerdings ist hier nochmal darauf hinzuweisen, dass die Förderung in den Varianten 2 (Netzbetreiber) und 3 (nach der BEW) auf die Wirtschaftlichkeit gedeckelt ist. Dadurch wird die Fördersumme so weit herungesetzt, dass die Abwärmenutzung gerade noch wirtschaftlich ist und der Gestehungspreis auf die 13,8 Ct/kWh steigt.

Als besondere Einschränkung ist hier die Förderung auf Seiten des RZ-Betreibers zu nennen, da diese bei den Fördersummen auf 15 Mio. € beschränkt ist und bei einem RZ der Größenordnung wie dem hier betrachteten die maximale Fördersumme schnell ausgeschöpft ist. In diesem Fall ist für die Finanzierungsvariante 1 dadurch der geförderte Anteil am förderfähigen Gesamtinvestment deutlich von 55 % auf 29 % gesunken.

4.2.5 Bestandsaufnahme der Rechenzentrumslandschaft in Hessen

Im Folgenden werden die Ergebnisse zur Untersuchung des Rechenzentrumsmarkts in Hessen im Überblick dargestellt. Die detaillierten Ergebnisse sind im Rahmen einer Kurzstudie veröffentlicht worden [40].

4.2.5.1 *Entwicklungen im internationalen Rechenzentrumsmarkt*

Die zunehmende Digitalisierung in Gesellschaft und Wirtschaft führt zu einem deutlich steigenden Bedarf an Leistungen digitaler Infrastrukturen wie Telekommunikationsnetze und Rechenzentren. Weltweit werden daher diese Kapazitäten deutlich ausgebaut. So sollen beispielsweise nach Angaben der Analysten von IDC der Umsatz der weltweiten Serververkäufe zwischen 2021 und 2026 etwa 60 % ansteigen [40]. Das Wachstum im Rechenzentrumsmarkt wird praktisch ausschließlich durch die Cloud-Unternehmen getragen [41]. In diesem Markt ist eine deutliche Marktkonzentration auf wenige Anbieter zu verzeichnen, die ständig zunimmt. Im Jahr 2021 haben die großen drei amerikanischen Anbieter AWS, Google und Microsoft Azure zusammen einen Marktanteil von 55 % – zusammen mit den größten vier chinesischen Anbietern liegt der Marktanteil bei fast 80 %. Im Jahr 2020 lag der Marktanteil dieser Unternehmen zusammen noch bei 70 % [42].

Auch in Europa wachsen die Rechenzentrumskapazitäten sehr deutlich (Abbildung 18). Zwischen 2020 und 2025 wird mit einem durchschnittlichen Wachstum der Kapazitäten um 30 % gerechnet. Dabei ist auch hier das Wachstum der Kapazitäten fast ausschließlich durch den Aufbau von neuen Cloud-Rechenzentren begründet [43], [44]. Die Kapazitäten von traditionellen Rechenzentren sind in den vergangenen Jahren weitgehend konstant geblieben. Bis 2025 ist von einem leichten Rückgang der Kapazitäten von traditionellen Rechenzentren auszugehen.

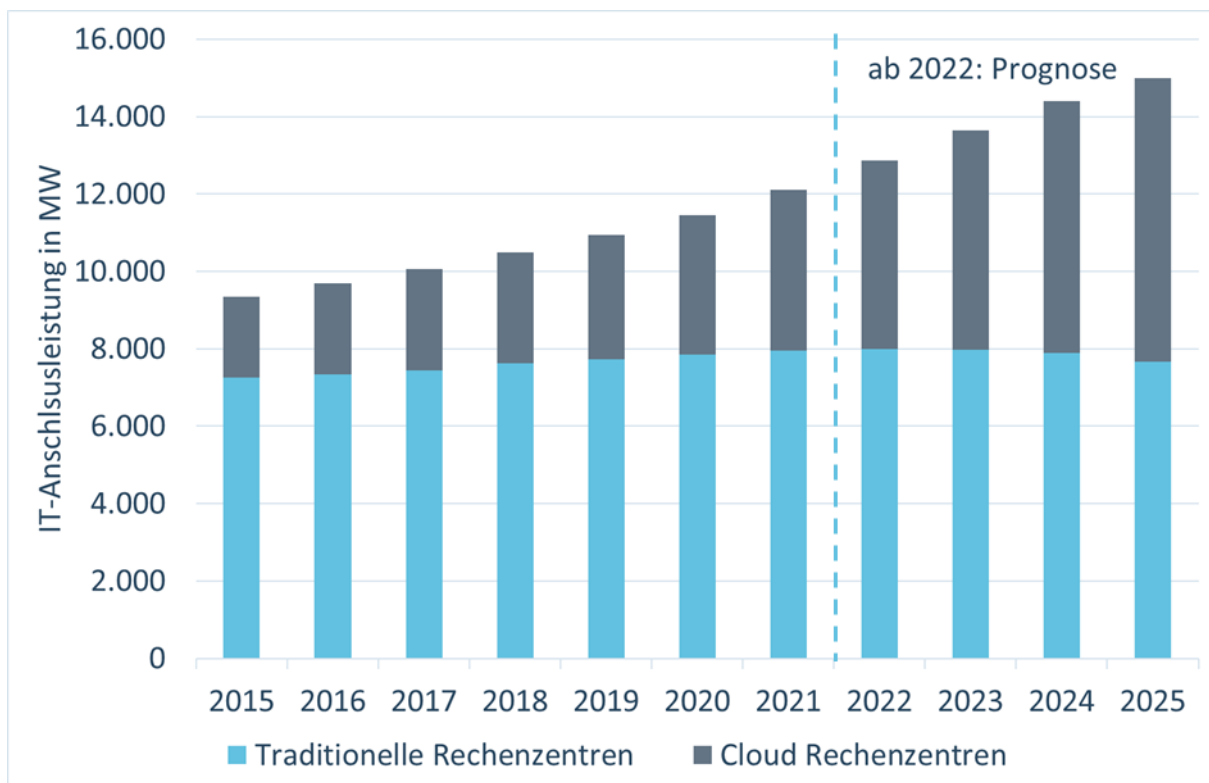


Abbildung 18: Entwicklung der Rechenzentrumskapazitäten in Europa mit Anteil Cloud Rechenzentren [40]

4.2.5.2 *Entwicklung der Kapazitäten der Rechenzentren in Hessen*

Auch in Deutschland ist ein deutlicher Boom beim Ausbau der Rechenzentrumskapazitäten festzustellen. Gemessen an der IT-Anschlussleistung stiegen die Kapazitäten zwischen 2016 und 2021 um 30 %. Aktuell werden pro Jahr ca. 2,5 Mrd. € für Gebäude und technischen Gebäudeausrüstung investiert. Damit stiegen die Investitionen in den vergangenen fünf Jahren um 150 % [41].

Die Region Frankfurt/Rhein-Main ist der Top-Standort in Deutschland und gemeinsam mit London der größte Rechenzentrumsstandort in Europa. Das Bundesland Hessen hat verglichen mit anderen Ländern die deutlich höchste Dichte an Rechenzentren in Deutschland. Die Rechenzentrumsdichte ist dreimal höher als in den Stadtstaaten Hamburg und Berlin. Verglichen mit Flächenstaaten wie Bayern, Nordrhein-Westfalen oder Baden-Württemberg ist die Dichte etwa fünfmal so hoch [45].

Zwischen 2010 und 2021 haben sich die Kapazitäten der Rechenzentren in Hessen – gemessen an der IT-Anschlussleistung um mehr als den Faktor 2,5 erhöht. Insbesondere ab 2019 ist ein deutliches Wachstum der Rechenzentrumskapazitäten in Hessen festzustellen. Aktuell gibt es etwa 200 Rechenzentren in Hessen mit einer IT-Anschlussleistung von mehr als 40 kW. Von diesen Rechenzentren ist ein hoher Anteil Großrechenzentren im Raum Frankfurt/Rhein-Main. Insgesamt wird davon ausgegangen, dass 50 % der Großrechenzentren Deutschlands sich in Hessen befinden. Aktuell werden ca. 1 Mrd. € jährlich in den Aufbau neuer Rechenzentrumsinfrastrukturen in Hessen investiert [46].

Gründe für die hohe Rechenzentrumsdichte in Hessen sind vor allem die Nähe zum Internetaustauschknoten DE-CIX in Frankfurt, die zentrale Lage in Europa, die gute Verfügbarkeit von leistungsstarken und zuverlässigen Zulieferern und Dienstleistern, die zuverlässige Stromversorgung sowie die Nähe zu wichtigen Kunden z. B. aus dem Bereich der Finanzdienstleistungen [41], [47], [1]. Diese Faktoren gehören zu den wesentlichen Standortfaktoren für Rechenzentren. Allerdings wird Deutschland und damit auch Hessen bei den Standortfaktoren „Strompreise“ und der „Zügige Genehmigungsprozesse“ im internationalen Vergleich eher schlecht bewertet [41]. Dies führt dazu, dass Rechenzentren, bei denen z. B. aufgrund geringer Latenzanforderungen die geographische Lage nicht so bedeutend ist, oft an Standortorten in Nordeuropa gebaut werden, wo die Strompreise deutlich niedriger sind und die Genehmigungsprozesse in der Regel deutlich schneller ablaufen [47].

Die Rechenzentrumskapazitäten, die aktuell in Hessen neu aufgebaut werden, sind im wesentlichen Cloud-Rechenzentren großer internationaler Cloud-Anbieter [46]. Im Vergleich zum europäischen Durchschnitt (Abbildung 18) ist der Anteil von Cloud-Rechenzentren mit 60 % an den Gesamtkapazitäten in Hessen im Jahr 2021 deutlich höher.

Auch hinsichtlich des Anteils von Colocation-Rechenzentren liegen die Werte in Hessen deutlich über dem Durchschnitt. Während bundesweit etwa 40 % der Rechenzentrumskapazitäten in Colocation-Rechenzentren vorhanden sind, sind dies in Hessen etwa 50 %. Aktuell ist allerdings eine Tendenz festzustellen, dass große internationale Cloud-Anbieter nicht mehr ausschließlich auf Colocation-Angebote setzen, sondern zunehmend auch auf Whole-Sale-Angebote zurückgreifen [41].

4.2.5.3 Entwicklung des Energiebedarfs

Die deutlich ansteigenden Rechenzentrumskapazitäten haben zu einem Anstieg des Energiebedarfs der Rechenzentren in Hessen geführt – trotz deutlich steigender Energieeffizienz (Abbildung 19). Die PUE der Rechenzentren in Hessen sank zwischen 2010 und 2021 von 1,8 auf 1,5. Die PUE ist wie in Kapitel 4.1.3 erläutert, ein Maß für die Effizienz der Rechenzentrumsinfrastruktur. Je niedriger die PUE ist, desto effizienter ist die Rechenzentrumsinfrastruktur.

Im Jahr 2021 lag der Energiebedarf der Rechenzentren in Hessen bei etwa 4.900 Gigawattstunden. Geht die Entwicklung beim Ausbau der Rechenzentrumskapazitäten so weiter wie bisher, so kann der Energiebedarf der Rechenzentren bis zum 2030 bei über 8.000 Gigawattstunden liegen. Da

physikalisch der in den Rechenzentren verbrauchte Strom vollständig in Wärme umgewandelt wird, steht diese Energiemenge als theoretisches Maximum für Wärmeanwendungen zur Verfügung.

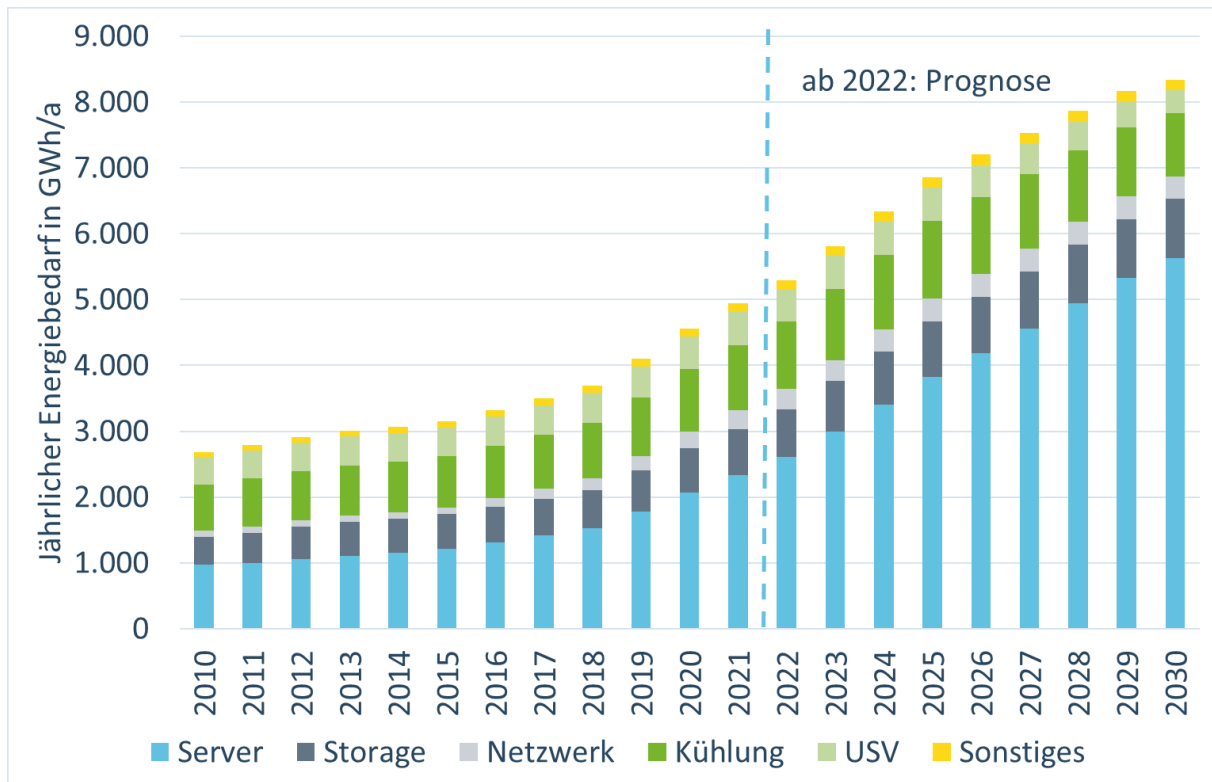


Abbildung 19: Entwicklung des Energiebedarfs der Rechenzentren in Hessen in den Jahren 2010 bis 2021 und Prognose bis 2030 [40]

Wie oben schon angesprochen, konzentrieren sich die Rechenzentren in Hessen insbesondere im Rhein-Main-Gebiet. Vor allem im Stadtgebiet Frankfurt a.M. gibt es eine Vielzahl von Rechenzentren. Zwischen 2017 und 2021 stieg der Stromverbrauch der Rechenzentren im Stadtgebiet von etwas über 1.000 GWh/a auf über 1.900 GWh/a. Da die Flächen in Frankfurt aber begrenzt sind und aktuell auch der Magistrat eine Flächennutzungsplanung vorgenommen hat, die den weiteren Ausbau der Rechenzentren in Frankfurt begrenzt [48], werden zunehmend auch Rechenzentren im Umland von Frankfurt aufgebaut, z. B. in Offenbach, Hanau, Hattersheim, Darmstadt oder in den angrenzenden Landkreisen [46]. So gab es nach Zahlen der Wirtschaftsförderung im Kreis Groß-Gerau 28 Anfrage nach insgesamt über 300 ha Fläche in den Jahren 2019 und 2021. Zum Vergleich: Im gesamten Zeitraum 2007 bis 2018 gab es nur 8 Anfragen nach insgesamt knapp 70 ha Fläche.

4.2.6 Technische und ökonomische Potenziale der Abwärmenutzung aus Rechenzentren in Hessen

Betrachtet man die Rahmenbedingungen der Abwärmenutzung aus Rechenzentren, so ist es nicht verwunderlich, dass es bislang in Deutschland nur wenige Pilotprojekte gibt, bei denen im größeren Umfang Abwärme aus Rechenzentren genutzt wird. Da in vielen Fällen der Betrieb eine Wärmepumpe notwendig ist, um Abwärme aus Rechenzentren nutzen zu können, führten in der Vergangenheit die hohen Stromkosten für den Wärmepumpenstrom und die vergleichsweise niedrigen Preise für die fossilen Energieträger dazu, dass die Abwärmenutzung aus Rechenzentren in Deutschland wirtschaftlich nicht rechnete [49].

Auch wenn sich die Rahmenbedingungen am Energiemarkt verändern, müssen vor allem in drei Themenfeldern noch Hemmnisse überwunden werden, um künftig in größerem Umfang Abwärme aus Rechenzentren nutzen zu können. Zum einen müssen überhaupt **geeignete Nutzungsmöglichkeiten für die Wärme identifiziert** und geschaffen werden. Zum zweiten müssen die **technischen Voraussetzungen** geschaffen werden, um die Abwärme im Rechenzentrum auszukoppeln und dahin zu transportieren, wo sie genutzt werden kann. Und zum dritten bedarf es **verbesserter wirtschaftlicher Rahmenbedingungen**, damit sich diese Form der Wärmenutzung auch für die Beteiligten rechnet. Im Folgenden werden diese drei Themenfelder etwas ausführlicher betrachtet.

4.2.6.1 *Nutzungsmöglichkeiten für Abwärme aus Rechenzentren*

Entscheidend für die künftige Nutzung von Abwärme aus Rechenzentren ist die Frage, wer die Wärme nutzen kann. Mehr als jeder zweite Rechenzentrumsbetreibende gibt das Nicht-Vorhandensein von Wärmeabnehmenden als Grund an, warum bislang keine Abwärme genutzt wird [41]. Eng mit der Beantwortung der Frage nach den Nutzungsmöglichkeiten ist die Frage verbunden, ob das Rechenzentrum bereits existiert oder ob ein neues Rechenzentrum geplant wird. Bei vorhandenen Rechenzentren müssen potenzielle Abwärmenutzungen in der Nähe identifiziert werden. Bei einem Neubau könnten die Rechenzentren den Standort gezielt so wählen, dass ein Wärmebedarf in der Nähe vorhanden ist. In beiden Fällen ist eine enge Zusammenarbeit des Rechenzentrums mit der kommunalen und regionalen Stadt- und Raumplanung, den örtlichen Energieversorgern und möglichen Wärmenutzenden notwendig. Die Strukturen für eine solche Zusammenarbeit existieren bisher kaum und müssen erst geschaffen werden.

Eine hohe Bedeutung als Nutzungsmöglichkeit hat Raumwärme und Warmwasser. Hier ist aktuell der Problemdruck, Alternativen zu Öl und Gas zu finden, sehr hoch. Herausforderungen bestehen hier insbesondere darin, die Wärme vom Rechenzentrum zu den Wohnungen oder Bürogebäuden zu transportieren und ein ausreichend hohes Temperaturniveau bereitzustellen. Zwar reicht für moderne Flächenheizungen wie Fußboden- oder Wandheizungen das Temperaturniveau von Rechenzentren meist aus, für bestehende Gebäude und für die Warmwasserbereitung ist aber meist der Betrieb einer Wärmepumpe notwendig.

Auch wenn in vorhandene Fern- und Nahwärmenetze eingespeist werden soll, ist eine Aufbereitung der Wärme mit Hilfe von Wärmepumpen notwendig. Die in Hessen vorhandenen Fernwärmenetze arbeiten meist hohen Temperaturen im Verhältnis zur Wärmequelle. Es bedarf also zusätzlich hoher Mengen an elektrischer Energie für den Betrieb der Wärmepumpen. Bei sogenannten Dampfnetzen, wie sie z. B. in Frankfurt teilweise vorhanden sind, ist eine Einspeisung von Wärme auf dem niedrigen Temperaturniveau von Rechenzentren nicht sinnvoll.

Sind noch keine Wärmenetze vorhanden, so ist zu prüfen, ob der Aufbau eines entsprechenden Netzes sinnvoll sein kann. Hier stellt sich dann auch die Frage, auf welchem Temperaturniveau das neue Wärmenetz arbeiten kann. Vorteilhaft ist, dass neue Wärmenetze in der Regel mit niedrigeren Temperaturen arbeiten als die vorhandenen Wärmenetze. Beim Neubau eines Netzes ist auch ein „kaltes Wärmenetz“ denkbar, bei dem die Wärme auf dem vom Rechenzentrum gelieferten Temperaturniveau zu den Abnehmenden transportiert wird und erst dort mittels einer Wärmepumpe auf die notwendige Temperatur erhöht wird.

In der Praxis stellt sich oft die Frage, wer z. B. die Wärmepumpe betreibt und wer für den Wärmetransport zuständig ist, die Rechenzentrumsbetreibenden, die Abwärme-Nutzenden oder ein Energieversorger?

Neben der Verwendung für Raumwärme oder Warmwasser bieten sich im Einzelfall auch andere Nutzungsarten an. So ist das Temperaturniveau der Rechenzentren sehr gut für Gewächshäuser geeignet. Wissenschaftliche Untersuchungen zeigen, dass diese Verwendung insbesondere in Regionen mit niedrigen Außentemperaturen wie Nordschweden [50], [51] oder Quebec/Kanada [52] geeignet erscheint. In den Niederlanden hat das Start-up Blockheating die Nutzung von Abwärme aus Rechenzentren zum Geschäftsmodell gemacht. In Schleswig-Holstein wird die Abwärme des Rechenzentrums des Cloud-Anbieters Windcloud für die Algenproduktion genutzt. Bisher haben solche Projekte allerdings noch Pilotcharakter – eine umfangreiche Nutzung von Abwärme aus einem Großrechenzentrum für die Pflanzenzucht gibt es bis heute nicht.

Auch andere Nutzungsformen, wie die Verwendung von Abwärme aus Rechenzentren für Schwimmbäder oder als Prozesswärme für die Industrie kommen bis heute über einen Pilotcharakter nicht hinaus [11].

Eine generelle Herausforderung bei der Nutzung der Wärme aus Rechenzentren liegt darin begründet, dass im Sommer weniger Wärme benötigt wird als im Winter, Rechenzentren aber das ganze Jahr über Wärme liefern. Gut wäre es also, Nutzungsmöglichkeiten auch für den Sommer zu finden. Denkbar ist es beispielsweise, aus der entstehenden Wärme im Sommer mit Hilfe von Adsorptionstechnik Kälte zu erzeugen [53]. Hierzu ist allerdings ein hohes Temperaturniveau ($\geq 80^\circ\text{C}$) [Quelle] der Abwärme erforderlich, welches bislang nur bei flüssiggekühlten IT-Systemen erreicht wird.

4.2.6.2 Technische Rahmenbedingungen

Aus technischer Sicht besteht aktuell vor allem noch die Herausforderung, dass große Rechenzentren zwar hohe Mengen an Abwärme erzeugen, dies aber auf einem verhältnismäßig niedrigen Temperaturniveau. Abhängig von der genutzten Kühltechnologie im Rechenzentren liegt das zu nutzende Temperaturniveau theoretisch zwischen 22 und 65°C. In den großen kommerziellen Rechenzentren ist sogar schon bei etwa 35 bis 40°C Schluss, da hier bis heute fast ausschließlich nur luftgekühlte Server eingesetzt werden. Wie Abbildung 20 zeigt, decken auch die Rechenzentren in Hessen eine große Spannbreite von Temperaturniveaus ab.

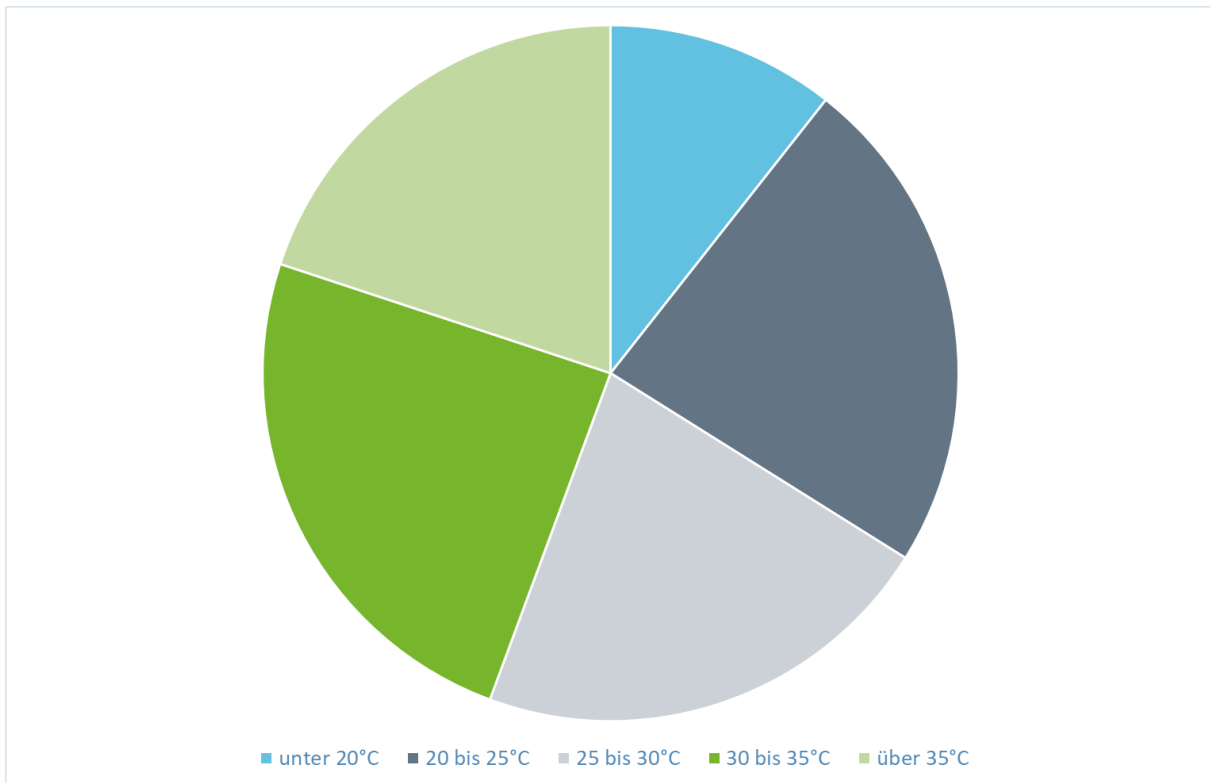


Abbildung 20: Verteilung der Kapazitäten der Rechenzentren in Hessen nach dem Temperaturniveau, auf dem die Wärme ausgekoppelt werden kann [40]

Je nach Aufbau und Art der Kühlanlagen kann die Wärme aus dem Rechenzentrum besser oder schlechter ausgekoppelt werden. Wichtig ist es bei Neubauprojekten auf jeden Fall, wenn die Auskopplung vor Anfang an mitgedacht ist. Nachträglich kann der Einbau der notwendigen technischen Anlagen enorme Aufwände bedeuten. Ganz abgesehen davon, dass meist nur sehr ungern im laufenden Rechenzentrumsbetrieb Umbaumaßnahmen an den technischen Anlagen vorgenommen werden – das Risiko eines Ausfalls wird als zu hoch eingeschätzt.

Grundsätzlich kann aber festgestellt werden, dass aus technischer Sicht keine unüberwindbaren Hürden bestehen, Abwärme aus Rechenzentren zu nutzen. Die notwendigen Technologien sind verfügbar – auch wenn die konkreten Anlagen und Wärmenetze in vielen Fällen erst aufgebaut werden müssen.

4.2.6.3 Wirtschaftliche Rahmenbedingungen

Der Hauptgrund dafür, dass bislang in Deutschland die Abwärme aus Rechenzentren nicht in nennenswertem Umfang genutzt wird, liegt in den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen. Insbesondere die hohe Stromkosten für den Betrieb von Wärmepumpen haben in der Vergangenheit dazu geführt, dass andere – insbesondere auf fossile Energieträger beruhende – Wärmeerzeugung deutlich billiger war [49]. Wie der Blick nach Schweden zeigt, ist die Heizung mit Abwärme aus Rechenzentren unter anderen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen problemlos möglich – in Stockholm werden systematisch Rechenzentren an das Fernwärmenetz angeschlossen [54], [55]. In Deutschland wird die Nutzung von Abwärme aus Rechenzentren auf absehbare Zeit wohl in den meisten Fällen nur mit einer staatlichen Förderung wettbewerbsfähig sein, vor allem wenn neue Wärmenetze aufgebaut werden müssen.

4.2.6.4 *Mögliche Szenarien zur künftigen Entwicklung der Abwärmenutzung aus Rechenzentren in Hessen*

Wie sich die künftige Nutzung der Abwärme aus Rechenzentren entwickeln wird, hängt deutlich davon ab, wie sich die Rahmenbedingungen in den genannten Feldern „Nutzungsmöglichkeiten für Abwärme“, „Technische Rahmenbedingungen“ und „Wirtschaftliche Rahmenbedingungen“ entwickeln. Durch geeignete Maßnahmen der verschiedenen AkteurInnen kann die Entwicklung so beeinflusst werden, dass ein deutlicher Ausbau der Abwärmenutzung aus Rechenzentren möglich ist. Um die Spannweite der möglichen zukünftigen Entwicklungen darstellen zu können, wurden zwei Szenarien für das Jahr 2035 entwickelt. Das **Szenario „Business as usual“** basiert auf dem aktuellen Stand von Technologie und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen und schreibt die absehbaren Entwicklungen in die Zukunft fort. Im **Szenario „Forcierte Abwärmenutzung“** werden dagegen in Zusammenarbeit aller Beteiligten umfangreiche Maßnahmen ergriffen, die Abwärmenutzung aus Rechenzentrum zu forcieren.

Als Basis für die Szenarien wird zum einen die oben dargestellte Prognose der Entwicklung des Rechenzentrumsmarktes in Hessen bis 2035 fortgeschrieben. Geht die Entwicklung so weiter, so ist für das Jahr 2035 in den hessischen Rechenzentren ein Energiebedarf von knapp 10.000 GWh zu erwarten. Weitere Grundlagen für die Szenarien sind die bestehenden Fernwärmenetze in Hessen. Hierzu konnten Daten vom **„AGFW – Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.“** genutzt werden. **Danach beträgt die Wärmelieferung aus hessischen Fernwärmenetzen aktuell etwa 3.500 GWh im Jahr. Die größten Fernwärmenetze befinden sich in Frankfurt, Gießen, Kassel, Offenbach, Baunatal und Darmstadt. Insbesondere in Frankfurt ist ein Großteil der Netze noch als Dampfnetz ausgelegt und daher für Abwärmenutzung aus Rechenzentren sehr schlecht geeignet. In den Heißwassernetzen in Hessen liegt die Rücklauftemperatur in der Regel zwischen 50 ° und 65 ° C. Für die möglichen künftigen Potenziale zur Abwärmenutzung in Hessen wurden die Daten des Projektes „Pan-European Thermal Atlas 5.2“¹ genutzt. Für den Anteil der möglichen Nutzung der in den Rechenzentren entstehenden Wärme werden die Ergebnisse der von der THMH durchgeführten Simulationen genutzt.**

Für das **Szenario Business as usual** wird davon ausgegangen, dass die Fern- und Nahwärmenetze in Hessen so wie aus aktueller Sicht absehbar modernisiert und erweitert werden. Das Thema Abwärmenutzung aus Rechenzentren wird an Bedeutung gewinnen. Die europäische und deutsche Gesetzgebung verlangt, dass bei neuen Rechenzentren geprüft wird, ob eine Abwärmenutzung wirtschaftlich möglich ist. Es wird aber keine Verpflichtung zur umfangreichen Abwärmenutzung für neue und bestehenden Rechenzentren geben. Aufgrund der schwierigen Rahmenbedingungen und wird nur bei einem Teil der neuen aufgebauten Rechenzentren Abwärme genutzt. Es wird davon ausgegangen, dass bei der Hälfte der ab 2025 neu aufgebauten Rechenzentren in Hessen eine Abwärmenutzung im größerem Umfang vorgenommen und hier im Durchschnitt etwa 30% der Abwärme genutzt werden kann. In diesem Fall könnten im Jahr 2035 bis zu 500 GWh Wärme aus Rechenzentren genutzt werden.

Szenario Forcierte Abwärmenutzung

Das Szenario „Forcierte Abwärmenutzung“ stellt ein optimistisches Zukunftsszenario dar. Aufgrund einer künftigen engen Zusammenarbeit aller Akteure werden sowohl die Nah- und Fernwärmenetze

¹ <https://euf.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=8d51f3708ea54fb9b732ba0c94409133>

ist Hessen deutlich ausgebaut als auch ein hoher Anteil der in Rechenzentren entstehenden Wärme genutzt. Ab 2025 wird in nur noch in Ausnahmefällen neue Rechenzentrumsprojekte in Hessen geben, bei denen keine Abwärmenutzung vorgesehen ist. Auch bei den schon bestehenden Rechenzentren wird die Abwärme dort genutzt, wo es technisch sinnvoll ist. Die bestehenden wirtschaftlichen Hemmnisse werden durch die Möglichkeit, die eingesparten CO₂-Emissionen zu bilanzieren und zu handeln sowie staatliche Förderung abgebaut. Neben der Nutzung von Abwärme in Wärmenetzen werden auch weitere Nutzungsquellen, insbesondere in der Landwirtschaft, erschlossen. Welche Maßnahmen insgesamt ergriffen werden sollten, um dieses Szenario zu erreichen, stellt die im Folgenden dargestellte Transformations-Roadmap „Abwärmenutzung aus Rechenzentren in Hessen“ dar. In diesem Szenario wäre eine jährliche Nutzung von bis zu 3.000 GWh Wärme aus Rechenzentren in Hessen möglich.

4.2.7 Transformations-Roadmap „Abwärmenutzung aus Rechenzentren in Hessen“

Wie die obigen Analysen zeigen, sind die bestehenden Herausforderungen und Hemmnisse so hoch, dass im Szenario „Business as usual“ abhängig vom weiteren Ausbau der Rechenzentrumsinfrastruktur im Jahr 2035 eine jährliche Wärmelieferung von Rechenzentren in Nah- und Fernwärmenetze von etwa 500 GWh zu erwarten ist. Gelingt es jedoch, die Herausforderungen und Hemmnisse durch entsprechende Maßnahmen zu bewältigen, so könnten im Szenario „Forcierte Abwärmenutzung aus Rechenzentren“ im Jahr 2035 bis zu 3.000 GWh Wärme aus Rechenzentren bereitgestellt werden.

Mit dem Verfahren des Szenario-basierten Roadmappings konnte eine Roadmap für Hessen entworfen werden, deren Maßnahmen es erlauben, eine künftige Entwicklung gemäß dem Szenario „Forcierte Abwärmenutzung“ zu erreichen. Dazu wurden neben den oben dargestellten Analysen der technischen, ökonomischen und organisatorischen Rahmenbedingungen insbesondere ein StakeholderInnen-Meeting durchgeführt, auf dem mit Expertinnen und Experten von Rechenzentren, Kommunen, Wärmeversorgern, Wissenschaft, Landes- und Bundesbehörden sowie der Zivilgesellschaft mögliche Maßnahmen zur Förderung der Abwärmenutzung aus Rechenzentren diskutiert wurden.

Wie die Analysen der Rahmenbedingungen zeigen, muss eine Strategie zur Förderung der Abwärmenutzung aus Rechenzentren an drei Punkten ansetzen: der **Beseitigung von Ausführungshürden**, der **Verbesserung der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen** und dem **Abbau von technischen Hemmnissen**. Auf dem StakeholderInnen-Workshop wurden in World Cafés diese drei Ansatzpunkte diskutiert.

Im World Café „Ausführungshürden“ wurde diskutiert, welche Hürden in der konkreten Durchführung von RZ-Abwärmenutzungsprojekten bestehen. Konkret: Woran scheitern Abwärmenutzungsprojekte in der Praxis? Gibt es bürokratische Hemmnisse? Wie kann die Kommunikation zwischen Rechenzentren und Wärmeversorgern verbessert werden?

Das World Café „Wirtschaftliche Rahmenbedingungen“ beschäftigte sich mit der Frage, wie die wirtschaftlichen Rahmenbedingen so verändert werden können, dass Abwärmenutzung aus Rechenzentren forciert wird. Außerdem wurde über mögliche Beiträge der einzelnen StakeholderInnen diskutiert.

Im World Café Technologie wurden die technischen Hemmnisse bei der Abwärmeauskopplung aus Rechenzentren identifiziert und analysiert.

In den drei World Cafés wurden Vorschläge erarbeitet, wie die identifizierten Hürden überwunden werden können. Die Ergebnisse der World Cafés wurden protokolliert und ausgewertet. Um eine forcierte Abwärmenutzung aus Rechenzentren zu erreichen, wurden im Rahmen des Roadmapping-Prozesses **fünf Zielsetzungen** definiert:

- Informationen zu Möglichkeiten der Abwärmenutzung verbessern
- Vernetzung der Akteure
- Ausbau der Wärmenetze in Hessen (inkl. saisonaler Wärmespeicher)
- Abbau technischer Hemmnisse
- Wirtschaftlichkeit der Abwärmenutzung verbessern

Für die Erreichung dieser Ziele werden Maßnahmen in vier Handlungsfeldern empfohlen. Zum ersten sollten in Hessen **organisatorische Strukturen** (Aufbau- und Ablauforganisation) wie z. B. Runde Tische geschaffen werden die kommunale Wärmeplanung weiter unterstützt werden (wie mit dem Hessischen Energiegesetz bereits geschehen). Zum zweiten können auf Landesebene die **bestehenden finanziellen Bundesförderungen für Abwärmeprojekte punktuell ergänzt** werden, um insbesondere innovative Lösungen in Hessen zu fördern. Ein drittes Handlungsfeld besteht in **der Forschungsförderung**. Auf Landesebene sollten insbesondere weiterhin gezielt solche Forschungsprojekte gefördert werden, mit denen Informationen zu Abwärmequellen und Abwärmesenken für die beteiligten AkteurInnen bereitgestellt werden können. Die Landesregierung sollte sich auch aktiv in die Weiterentwicklung von Bundesforschungsprogrammen einbringen. Insbesondere hinsichtlich der aktuellen Fortschreibung des Energieforschungsprogramms könnten hier Akzente für einen Abbau technischer Hemmnisse bei der Abwärmenutzung aus Rechenzentren gesetzt werden. Der **Input hessischer Akteure in die Bundesgesetzgebung** stellt das vierte Handlungsfeld dar. Neben der schon angesprochenen Technologieförderung ist hier insbesondere ein ausgewogener Mix aus der Setzung verbindlicher Vorgaben und der Förderung der Wirtschaftlichkeit der Abwärmenutzung aus Rechenzentren anzustreben.

Roadmap „Abwärmenutzung aus Rechenzentren in Hessen“

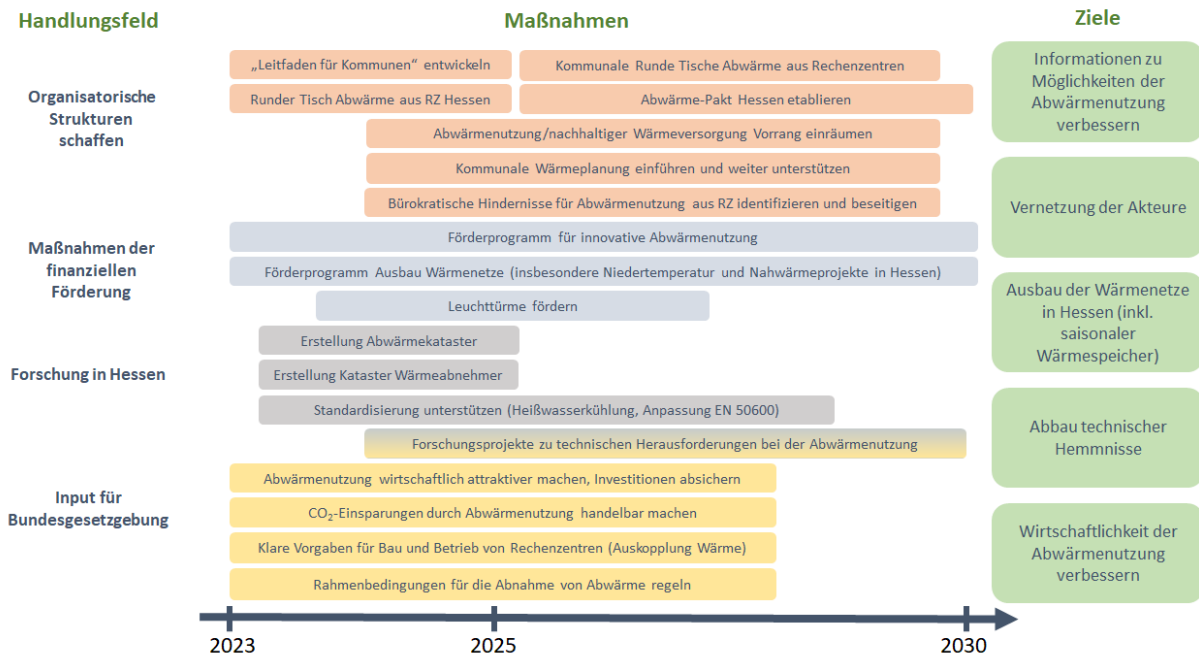


Abbildung 21: Transformations-Roadmap „Abwärmenutzung aus Rechenzentren in Hessen“

Abbildung 21 stellt die im Rahmen des Vorhabens entworfene Transformations-Roadmap „Abwärmenutzung aus Rechenzentren in Hessen“ mit den beschriebenen Zielen, Handlungsfeldern und den abgeleiteten Einzelmaßnahmen im Überblick dar. Die dargestellte Roadmap ist als Empfehlung zu verstehen, wie die Abwärmenutzung aus Rechenzentren in Hessen in Zukunft deutlich forciert werden kann.

Die einzelnen Maßnahmen sind in Tabelle 9 kurz beschrieben. Die Roadmap muss im nächsten Schritt mit den beteiligten Akteurinnen und Akteuren abgestimmt, konkretisiert und weiterentwickelt werden. Hierzu sollte ein „Runder Tisch Abwärme aus Rechenzentren Hessen“ eingesetzt werden, in dessen Verantwortung diese Aktivitäten durchgeführt werden können.

Tabelle 9: Übersicht über die Maßnahmen der Transformations-Roadmap „Abwärmenutzung aus Rechenzentren in Hessen“

Handlungsfeld	Maßnahme	Start
Organisatorische Strukturen schaffen	Runder Tisch Abwärme aus RZ Hessen Zentrales Element der Roadmap, Am Runden Tisch sollten alle betroffenen Gruppen beteiligt werden, insbesondere Rechenzentren, Energieversorger, Ausrüster, Landesregierung, Kreise und Kommunen, Wissenschaft und Zivilgesellschaft. Der Runde Tisch sollte die Aufgabe haben, die Roadmap zu konkretisieren und weiterzuentwickeln.	sofort
	Leitfaden für Kommunen Auf Landesebene sollte ein Leitfaden entwickelt werden, der Kommunen dabei unterstützt, Abwärmeprojekte mit Rechenzentren zu initiieren und durchzuführen.	sofort
	Kommunale Wärmeplanung unterstützen Neben der verpflichtenden Einführung der kommunalen Wärmeplanung für größere Kommunen (ab 20.000 Einwohner), sollten für wie mit dem Hessischen Energiegesetz bereits beschlossen, auch kleinere Kommunen dazu ermutigt werden, eine kommunale Wärmeplanung durchzuführen. Dabei sollten sie möglichst weitgehend unterstützt werden. Lokale Rechenzentren sollten – wie andere Industriebetriebe auch - mit Daten zu ihren vorhandenen oder geplanten Energiebedarfen die kommunalen Wärmeplanungen unterstützen (siehe auch Maßnahme „Erstellung Abwärme-Kataster“)	ab 2024
	Abwärme-Pakt Hessen etablieren Im Rahmen des Runden Tisches sollte zwischen den Beteiligten ein „Abwärme-Pakt Hessen“ vereinbart werden, in dem Ziele und Maßnahmen zur Weiterentwicklung der Abwärmenutzung aus Rechenzentren in Hessen definiert werden.	Ziel: Pakt bis 2025 vereinbart
	Abwärmenutzung/nachhaltiger Wärmeversorgung Vorrang einräumen Der Nutzung von Abwärme sollte im Vergleich zur Nutzung fossiler Energiequellen Vorrang eingeräumt werden. Das könnte sich z. B. darin äußern, dass Kommunen bei Baugenehmigungen dem Investor eine Prüfung auferlegen, ob Abwärmenutzung möglich ist.	In Abstimmung mit Kommunen bis 2025 einführen.
	Kommunale Runde Tische Abwärme aus Rechenzentren Neben dem Runden Tisch Abwärme aus Rechenzentren Hessen sollte eine Initiative für lokale Runde Tische gestartet werden. Diese Runde Tische sollten zumindest in den größeren Kommunen eingerichtet werden. Der hessische Runde Tisch kann diese Runde Tische unterstützen.	Ab 2025
	Bürokratische Hindernisse für Abwärmenutzung aus RZ identifizieren und beseitigen In konkreten Projekten zur Nutzung von Abwärme aus Rechenzentren treten immer wieder bürokratische Hindernisse auf, welche eine Abwärmeauskopplung erschweren. Dies können z. B. bestehende Anschlussverpflichtungen für Fernwärmenetze sein oder auch Auflagen für die Rechenzentren, die sich aus der Rolle als Energielieferant ergeben. Auch die Nutzung von selbst erzeugtem Strom für den Betrieb von Wärmepumpen ist oft mit bürokratischen Hemmnissen verbunden. Solche Hemmnisse sollten identifiziert und es sollten Maßnahmen getroffen werden, die Hemmnisse zu beseitigen. Ein erster Schritt könnte eine vom Runden Tisch beauftragte Untersuchung sein, in der die bestehenden Hemmnisse über eine Befragung der StakeholderInnen erhoben werden.	Untersuchung zu Hemmnissen sollte zeitnah vom Runden Tisch beauftragt werden. Ergebnisse sollten Anfang 2025 vorliegen.

Handlungsfeld	Maßnahme	Start
Maßnahmen zur finanziellen Förderung	<p>Förderprogramm für innovative Abwärmenutzung Über die bestehenden finanziellen Förderprogramme des Bundes hinaus sollte geprüft werden, ob auf Landesebene Fördermöglichkeiten für innovative Abwärmeprojekte aus Rechenzentren geschaffen werden können. Insbesondere eine Förderung von Rechenzentren mit Heißwasserkühlung, die an Wärmenetze angeschlossen werden, könnte zur Durchsetzung dieser Technologie beitragen.</p>	Sofort
	<p>Förderprogramm Ausbau Wärmenetze (insbesondere Niedertemperatur und Nahwärmeprojekte in Hessen) Auch für den Auf- und Ausbau von Wärmenetzen sollte geprüft werden, ob eine zusätzliche Förderung auf Landesebene möglich ist. Dies ist insbesondere für den Aufbau von Wärmenetzen, die auf sehr niedrigem Temperaturniveau arbeiten und damit direkt die Wärme aus Rechenzentren aufnehmen können, in Erwägung zu ziehen.</p>	Sofort
	<p>Leuchttürme fördern Hessen ist das Bundesland, das mit Abstand die meisten Rechenzentren hat und in dem zurzeit viele neue große Rechenzentren gebaut werden. Abwärmenutzungs-Projekte mit Leuchtturmcharakter können innerhalb von Hessen und darüber hinaus eine Breitenwirkung entfalten. Eine Förderung solcher Projekte und insbesondere der Verbreitung der Ergebnisse von Leuchtturmprojekten sollte überprüft werden.</p>	Ab 2024
Forschung in Hessen	<p>Erstellung Abwärme-Kataster Auf Landesebene sollte ein Kataster entwickelt werden, in dem Abwärmequellen (insbesondere Rechenzentren), die zur Verfügung stehen, aufgeführt sind. Das Kataster sollte nicht nur bestehende Abwärmequellen beinhalten, sondern idealerweise auch um geplante Projekte ergänzt werden. Eine regelmäßige Aktualisierung des Katasters ist vorzusehen.</p>	sofort initiieren
	<p>Erstellung Kataster Wärmeabnehmer Neben einen Kataster für Abwärmequellen sollte auch ein Kataster für Abwärmesenken entwickelt werden, dass Rechenzentren und ihren Dienstleistern erlaubt, Abwärmeprojekte an vorhandenen und neuen Standorten zu initiieren.</p>	sofort initiieren
	<p>Standardisierung unterstützen (Heißwasserkühlung, Anpassung EN 50600) Es sollten Forschungsprojekte durchgeführt werden, um die Standardisierung im Umfeld der Nutzung von Abwärme aus Rechenzentren zu unterstützen. Relevant ist insbesondere die beschleunigte Standardisierung von Anschlüssen im Bereich der Heißwasserkühlung. Außerdem hat das Thema Abwärmenutzung in der EN 50600, auf der die technische Planung der Rechenzentren basiert, bisher nur eine geringe Priorität. Als Nachhaltigkeits-/ und Energiethema muss Abwärmenutzung sich neben den weiteren Zielstellungen von grüner Stromerzeugung und Energieeinsparung/-effizienz behaupten, was Zielkonflikte bedeuten kann.</p>	sofort initiieren
	<p>Es sollten bestehende Forschungsprogramme um Themen zu technischen Herausforderungen bei der Abwärmenutzung ergänzt werden. Themen, die im Projekt und auf dem StakeholderInnen-Meeting identifiziert wurden, sind insbesondere:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Heißwasserkühlung/Chipkühlung ▪ thermische Diffusion, d.h. die Nutzung von Abwärme auf den unterschiedlichen Temperaturniveaus ▪ Umbau bestehender Rechenzentren ▪ Auslegung Wärmepumpen (Grundlastfähigkeit) 	Themen für Forschungsprojekte sofort identifizieren, Forschungsprogramm ab 2024 starten

Handlungsfeld	Maßnahme	Start
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Saisonale Wärmespeicherung ▪ Absenkung der Temperatur in den Wärmenetzen 	
Input für die Bundesgesetzgebung	<p>Forschungsprojekte zu technischen Herausforderungen bei der Abwärmenutzung</p> <p>Aus dem Land Hessen kann ein Input zur Technologieförderung auf Bundesebene und über den Bund auch auf EU-Ebene gegeben werden. So wird aktuell das Energieforschungsprogramm der Bundesregierung weiterentwickelt. Themen im Zusammenhang mit der Abwärmenutzung aus Rechenzentren sollten explizit in das Programm aufgenommen werden. Die auf dem StakeholderInnen-Meeting identifizierten technischen Themen sind oben aufgelistet.</p>	Sofort
	<p>Abwärmenutzung wirtschaftlicher attraktiver machen, Investitionen absichern</p> <p>Das Land Hessen kann sich auf Bundesebene einbringen, um die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen der Abwärmenutzung aus Rechenzentren zu verbessern. Dies kann z. B. durch Mindestpreise bei der Abgabe von Abwärme, durch die Förderung von Wärmenetzen oder den Abbau regulativer Hemmnisse geschehen.</p>	sofort
	<p>CO₂-Einsparungen durch Abwärmenutzung handelbar machen</p> <p>Ein System, mit dem die durch die Abwärmenutzung eingesparten Treibhausgasemissionen handelbar würden, könnte die Attraktivität von Abwärmenutzung aus Rechenzentren weiter erhöhen. So können vermiedene CO₂-Emissionen ein Baustein für Rechenzentren und andere Beteiligte sein, eine Klimaneutralität zu erreichen.</p>	sofort
	<p>Klare Vorgaben für Bau und Betrieb von Rechenzentren (Auskopplung Wärme)</p> <p>Neue Rechenzentren sollten so gebaut werden, dass eine Wärmeauskopplung möglich und baulich vorgehalten ist, auch wenn aktuell kein Wärmeabnehmer vorhanden ist. Wenn ein Bedarf an Abwärme vorhanden ist, sollen Rechenzentren die Wärme auch abgeben müssen.</p>	sofort
	<p>Rahmenbedingungen für die Abnahme von Abwärme regeln</p> <p>Auch hinsichtlich der Abnahme der Abwärme sollten klare Regelungen getroffen werden. Wo möglich, sollten Wärmenetzbetreiber die Abwärme aus Rechenzentren und anderen Quellen auch abnehmen müssen. Der Nutzung von Abwärme sollte in Wärmenetzen Vorrang gegenüber fossilen Energieträgern eingeräumt werden.</p>	sofort

5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Rahmen der Projektlaufzeit wurde ein Rechenmodell entwickelt, das zur Planung und Berechnung von Abwärmepotenzialen in RZ genutzt werden kann. Dafür sind die gängigen Methoden der Serverraumkühlung sowie technisch umsetzbare Varianten der Abwärmenutzung programmtechnisch abgebildet worden.

Die zuvor identifizierten, gängigen Kühlmethoden wurden einander gegenübergestellt, um das Optimierungspotenzial für ein theoretisches Rechenzentrum hinsichtlich der Effizienzkennzahlen im Offenbacher Fernwärme-Versorgungsgebiet zu untersuchen. Ohne Abwärmenutzung liegt der Anteil des gesamten Stromverbrauchs zum reinen Verbrauch der IT-Systeme (PUE) abhängig von der Kühlmethode im Bereich von 1,27 – 1,39 bei luftgekühlten Systemen und bei 1,16 beim flüssiggekühlten System.

Der Einfluss unterschiedlicher Kühltechnologien und Systemoptionen zur Abwärmeauskopplung auf die Energieeffizienz eines RZ kann mit dem Rechenmodell quantifiziert werden. Der Anteil nutzbarer Abwärmemengen am gesamten Energiebedarf (ERF) eines 20 MW RZ liegt je nach Kühltechnologie zwischen 39 – 46 % bei luftgekühlten Systemen und über 50 % beim flüssiggekühlten System, wenn es in ein FW-Netz mit 60°C einspeisen kann, welches einen Jahresbedarf von etwa 140 GWh aufweist.

Das Rechenmodell wurde für einen spezifischen Fall an die RZ (Maincubes und Main DC1) angepasst von denen die meisten Angaben zur Ausstattung und Anlagenführung in Erfahrung gebracht werden konnte. Beide befinden sich auf dem Campusgelände der EVO, wodurch sie sich für eine Betrachtung der Abwärmenutzung besonders gut eignen. Mit Ergebnissen der Jahressimulationen beider RZ wurden Speicherbedarfe am Ort der Einspeisung untersucht. Dabei zeigt sich der Einfluss des saisonalen Engpasses im FW-Netz auf die Menge der nutzbar gemachten Abwärme. Als alleinige Einspeiser können die zwei RZ ERF zwischen 0,35 und 0,44 erreichen, wohingegen bei gemeinsamer Einspeisung nur noch 0,22 bis 0,28 möglich waren. Im Gegensatz dazu sind Werte von 0,7 bis 0,8 möglich, wenn kein Engpass besteht. Diese Ergebnisse resultieren aus der Einspeisung der Abwärme bei 80°C der beiden RZ am Einspeisepunkt ins FW-Netz. Bei der Betrachtung des Speicherbedarfs zeigt sich, dass die freie Kapazität am Einspeisepunkt (ca. 71 GWh) zu gering ist, um die Abwärme der beiden RZ in einem Ausmaß aufzunehmen, dass sie beide mit Einsatz entsprechend großen saisonalen Speichern einen ERF von 30 – 40 % erreichen könnten. Das unterstreicht die Wichtigkeit der Aufnahmefähigkeit der Wärmesenke bei der Abwärmenutzung. Ein Ausbau der FW-Netz ist langfristig gesehen sinnvoll, um die bereits bestehenden RZ ans Netz anschließen zu können. Zukünftige RZ müssen bei der Standortwahl auf ausreichende Kapazitäten zur Abwärmenutzung achten oder Wärmenetzbetreibern in die Planung der RZ einbeziehen.

Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung aus Sicht des Betreibers für das Main DC1 RZ zeigt, dass Abwärmenutzung ohne Förderung nicht wirtschaftlich darstellbar ist. Je nach Quelle des eingesetzten Stroms (fossil oder erneuerbar) können jedoch durch die Umsetzung CO₂-Einsparungen in Höhe von ca. 9.000 – 18.000 t_{CO2}/a erzielt werden. Bei steigendem Anteil der nutzbar gemachten Abwärme an der Erzeugung der Fernwärme würde der CO₂-Emissionsfaktor für Fernwärme sukzessive sinken.

Zur Unterstützung der Arbeiten wurden im Rahmen des Vorhabens vom Borderstep Institut eine Analyse der Marktentwicklungen bei Rechenzentren in Hessen durchgeführt [40]. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass aktuell die Kapazitäten der RZ in Hessen jährlich um etwa 10 % wachsen. Im Jahr 2021 hatten die RZ in Hessen einen Stromverbrauch von 4.900 GWh/a. Bis zum Jahr 2030 kann dieser, wenn der Boom beim Ausbau der Rechenzentren anhält, bis auf 8.300 GWh/a ansteigen. Dabei konzentriert sich das Wachstum insbesondere in der Region Frankfurt Rhein/Main.

Auf Basis der Ergebnisse der Marktstudie, der Analyse von Hemmnissen bei der Realisierung von Abwärmenutzungsprojekten und der Diskussionen im Rahmen eines Stakeholder-Workshops mit über 80 Teilnehmenden am 12.1.2023 in Frankfurt wurde eine Roadmap „Abwärmenutzung aus Rechenzentren in Hessen“ entworfen, die Maßnahmen vorschlägt, wie die Abwärmenutzung aus Rechenzentren künftig forciert werden kann.

6 Öffentlichkeitsarbeit

Zu Zwecken der Öffentlichkeitsarbeit wurde eine Webseite mit allgemeinen Informationen zum Projekt sowie regelmäßig aktualisierten und Ergebnissen erstellt.

Zudem wurden Zwischenergebnisse aus dem Projekt den beteiligten Projektpartnern auf Online- und Präsenzveranstaltungen vorgestellt. Anwesend waren dafür im Juli 2022 auf einer Online-Veranstaltung seitens der EVO Herr Badoux für die Thematik Rechenzentrumstechnik sowie Herr Milde für die Thematik (Fern-)Wärmenetze in Offenbach. Im August fand außerdem eine Präsenzveranstaltung in den Räumlichkeiten der THM in Gießen mit Vertretern der LA21 Offenbach (Herr und Frau Levi-Wach sowie Herr Müller) und des BUND Hessen (Herr Dr. Neumann) statt.

Des Weiteren wurden am 12. Januar dem Impact-Dialog - „Abwärmenutzung aus Rechenzentren“ Fortschritte und Ergebnisse vorgestellt und diese sowie gewünschte zukünftige Entwicklungen mit den zahlreichen (ca. 80) anwesenden Interessenten aus Wissenschaft, Politik und Wirtschaft in World-Cafés diskutiert. Das Projekt wurde am 16. März beim Kongress des House of Energy durch ein Poster repräsentiert werden.

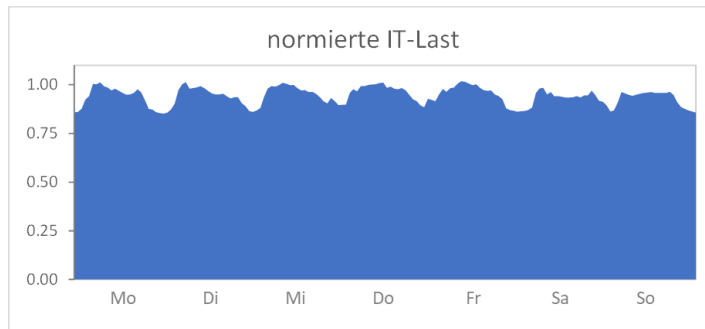
Es wurden auch zwei Veröffentlichungen platziert. Die erste wurde bereits früh im Projektverlauf durch das HoE angestoßen. Es ist ein Beitrag zum Projekt in deren „Perspektiven“ Zeitschrift. Die zweite Veröffentlichung wurde bei der iX Sonderausgabe „Green-IT“ des heise Verlags gegen Projektende angestoßen. Die Annahme wurde Anfang April bestätigt und der Artikel wird voraussichtlich im April erscheinen. Eine weitere Veröffentlichung ist zum Zeitpunkt des Projektabschlusses online beim Datacenter Insider geplant.

Anhang

A-1. Parameter für die Gegenüberstellung der Kühlsysteme

Übergreifende Randbedingungen

- Umgebungsbedingungen als Zeitreihe
 - Außenlufttemperatur
 - Luftfeuchtigkeit (relativ und absolut)
- IT-Serversysteme:
 - IT-Last: 20 MW mit sich wiederholendem Wochenlastgang



- Strombedarf der Serverlüfter: abhängig von der Einlasstemperatur in Racks
 - Serverraumklima: 18 - 27°C
- Verluste
 - Unterbrechungsfreie Stromversorgung: 6 %
 - periphere Verluste: 2 %
 - Transformator: 4 %

CRAH Teilmodelle

- IT-Server: Temperaturerhöhung über Server 15 K
- Kühlung per CRAH
 - Kaltwassergekühlter Umluftkühler
 - 27°C Solltemperatur Kühlung
 - 30 % Bypass Anteil
 - Strombedarf CRAH abhängig vom Kühlbedarf
 - KM mit Kennfeld
 - Hybridkühler mit Kühloptionen
 - Freikühlung $\leq 10^\circ\text{C}$, min. Einlasstemperatur Racks 18°C
 - Nasskühlung $\geq 20^\circ\text{C}$, Befeuchtungswirkungsgrad 80 %
 - Strombedarf abhängig vom Kühlbedarf
- Auskopplungsoption Abwärme (in Referenzmodell inaktiv)
 - V1: Luft-Wasser-WÜ mit Bypass Anteil 25 % im Abluftmassenstrom des RZ
 - V2: Wasser-Wasser-WÜ im Kaltwassersatz der KM
 - Wärmepumpe mit Kennfeld
 - Senke: FW-Netz Rücklauf als Zeitreihe
 - Auskopplung bei 60°C

Frischlufkkühlung Teilmodell

- IT-Server: Temperaturerhöhung über Server 15 K
- Kühlung per indirekter Frischlufkkühlung
 - Lüftungsgerät mit KM und Befeuchter
 - 27°C Solltemperatur Kühlung
 - KM mit Kennfeld für Spitzenlast
 - Kühloptionen
 - Freikühlung $\leq 22^\circ\text{C}$, min. Einlasstemperatur Racks 18°C
 - Nasskühlung $\geq 24^\circ\text{C}$, Befeuchtungswirkungsgrad 95 %
 - Strombedarf Ventilatoren abhängig vom Kühlbedarf
- Auskopplungsoption Abwärme (in Referenzmodell inaktiv)
 - Luft-Wasser-WÜ mit Bypass Anteil 10 % im Abluftmassenstrom des RZ
 - Wärmepumpe mit Kennfeld
 - Senke: FW-Netz Rücklauf als Zeitreihe
 - Auskopplung bei 60°C

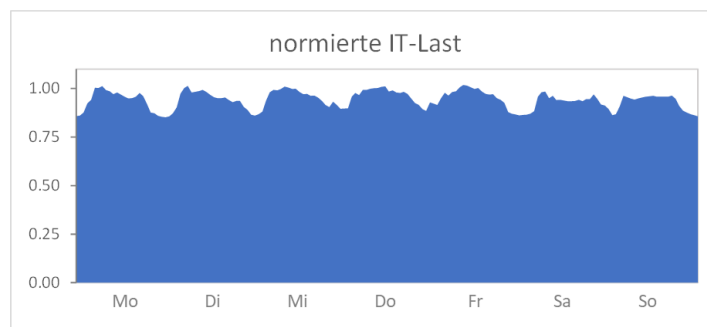
Flüssigkeitskühlung Teilmodell

- IT-Server: Temperaturerhöhung über Server 10 K
- Kühlung per indirekter Wasserkühlung
 - Kaltwassersatz mit Trockenkühler
 - 53°C Solltemperatur Kühlung
 - Strombedarf abhängig vom Kühlbedarf
- Auskopplungsoption Abwärme (in Referenzmodell inaktiv)
 - Wasser-Wasser-WÜ im Kaltwassersatz des RK
 - Wärmepumpe mit Kennfeld
 - Senke: FW-Netz Rücklauf als Zeitreihe
 - Auskopplung bei 60°C

A-2. Parameterliste für Speicherbedarfsbetrachtung

Übergreifende Randbedingungen

- Umgebungsbedingungen als Zeitreihe
 - Außenlufttemperatur
 - Luftfeuchtigkeit (relativ und absolut)
- IT-Serversysteme:
 - IT-Last: 6 bzw. 16 MW mit sich wiederholendem Wochenlastgang



- Strombedarf der Serverlüfter: abhängig von der Einlasstemperatur in Racks
- Serverraumklima: 18 - 27°C
- Temperaturerhöhung über Server 15 K
- Verluste
 - Unterbrechungsfreie Stromversorgung: 6 %
 - periphere Verluste: 2 %
 - Transformator: 4 %
- Auskopplungsoption Abwärme (in Referenzmodell inaktiv)
 - Luft-Wasser-WÜ mit Bypass Anteil 10 % im Abluftmassenstrom des RZ
 - Wärmepumpe mit Kennfeld
 - Senke: FW-Netz Rücklauf als Zeitreihe
 - Auskopplung auf 80°C

Maincubes Teilmodell

- Kühlung per indirekter Frischluftkühlung
 - Lüftungsgerät mit KM und Befeuchter
 - 27°C Solltemperatur Kühlung
 - KM mit Kennfeld für Spitzenlast
 - Kühloptionen
 - Freikühlung $\leq 22^\circ\text{C}$, min. Einlasstemperatur Racks 18°C
 - Nasskühlung $\geq 24^\circ\text{C}$, Befeuchtungswirkungsgrad 95 %
 - Strombedarf Ventilatoren abhängig vom Kühlbedarf
- Verluste
 - Unterbrechungsfreie Stromversorgung: 6 %
 - periphere Verluste: 2 %
 - Transformator: 4 %
- Auskopplungsoption Abwärme (in Referenzmodell inaktiv)
 - Luft-Wasser-WÜ mit Bypass Anteil 10 % im Abluftmassenstrom des RZ
 - Wärmepumpe mit Kennfeld
 - Senke: FW-Netz Rücklauf als Zeitreihe

Main DC1 Teilmodell

- Kühlung per indirekter Frischluftkühlung
 - Lüftungsgerät mit KM und Befeuchter
 - 27°C Solltemperatur Kühlung
 - KM mit Kennfeld für Spitzenlast
 - Kühloptionen
 - Freikühlung $\leq 15^\circ\text{C}$, min. Einlasstemperatur Racks 18°C
 - Nasskühlung $\geq 15^\circ\text{C}$, Befeuchtungswirkungsgrad 98 %
 - Strombedarf Ventilatoren abhängig vom Kühlbedarf

A-3. Wirtschaftlichkeit und CO₂ – Variante 1

Variante 1: WP beim RZ, wirtschaftlicher Verkauf Abwärme

VDI 2067-1 Tab. 2-5

1 2 3 0,55 15.000.000 €

Kapitalgebundene Kosten	Ansatz	Bemerkung	rechnerische Nutzungsdauer		Einzelpreis [€]	Investition A_0 [€]	Barwerte Ersatzinvestitionen			Restwert R_w [€]	Förderung [€]	Annuität A_N,K [€/a]
			T_N [a]	n [-]			A_1 [€]	A_2 [€]	A_3 [€]			
Energiezentrale	nach Bedienflächen	10% Aufschlag	50	0	221.100	221.100	-	-	-	40.348	-	21.190
Wärmepumpe	Anzahl nach Sim	35 MW Kaskade je 1 MW	20	0	1.231.755	43.111.418	-	-	-	11.934.873	15.000.000	1.896.384
FW-Übergabestation inkl. MSR		36 MW Kaskade je 3MW	20	0	70.000	840.000	-	-	-	232.544	-	71.212
Wärmeübertrager	entspricht Anz. WP	35 MW Kaskade je 500 kW	20	0	65.000	4.550.000	-	-	-	1.259.612	-	385.734
Leitungsführung	Längenspez. nach Sim	200 m, mit DN80 inkl. Dämmung	40	0	60.000	2.100.000	-	-	-	482.827	-	189.582
Armaturen	anteilig an Leitungskosten (10%)		20	0	6.000	210.000	-	-	-	58.136	-	17.803
Pumpen inkl. Druckhaltung	entspricht Anz. WP * 2	70 Stück	10	0	20.000	1.400.000	-	-	-	-	-	164.123
						52.432.518					15.000.000	2.746.028

Bedarfsgebundene Kosten	Strompreis €/kWh	Jahresbedarf Simulation kWh/a	Energiepreis €/a	CO2 Faktor g/kWh	CO2 t	spez. CO2-Preis €/t	CO2 Preis €/a	Gesamtpreis €/a
Wärmepumpe	0,26	24.638.103	6.351.386	366	9.018	80,65	727.265	7.078.651
Pumpen	0,26	222.629	57.391	366	81	80,65	6.572	63.962
			6.408.777					7.142.614

Betriebsgebundene Kosten	Aufwendungen (VDI 2067-1 Tabelle 2-5)			Kosten		
	Instantsetzung	Wartung und Inspektion	Bedienen	Instantsetzung	Wartung und Inspektion	Bedienen
	f Inst [%]	f_W+Insp [%]	f_Bed [h/a]	[€/a]	[€/a]	[€/a]
Energiezentrale	1,0	1,0	0,0	2.211,0	2.211,0	-
Wärmepumpe	1,0	1,5	5,0	431.114,2	646.671,3	4.500,0
FW-Übergabestation inkl. MSR	2,0	1,0	0,0	16.800,0	8.400,0	-
Wärmeübertrager	2,0	0,0	0,0	91.000,0	-	-
Leitungsführung	1,0	0,0	0,0	21.000,0	-	-
Armaturen	1,5	1,0	0,0	3.150,0	2.100,0	-
Pumpen inkl. Druckhaltung	2,0	1,0	0,0	28.000,0	14.000,0	-
			Summe	593.275,2	673.382,3	4.500,0

Zusammenfassung	
Betrachtungszeitraum	10 a
Kapitalgebundene Kosten	2.746.028 €
Platzbedarf Anlagen	300 m ²
Gesamtinvest Jahr 1	37.432.518 €
Bedarfsgebundene Kosten	7.616.856 €
Betriebsgebundene Kosten	1.391.693 €
Sonstige Kosten	- €
Jahresannuitäten	11.754.577 €

Strombedarf RZ	183.412 MWh/a
Auskoppelbare Wärme	64.736 MWh/a
Bedarf WP-Strom	24.861 MWh/a
CO2 Anteil Fernwärme	280 g/kWh
CO2 Anteil WP	366 g/kWh

nötiger Erlös für Break-Even	0,182 €/kWh
Preis FW	0,153 €/kWh

verdrängtes CO2	9.027,16 t/a	18.126,18
spez. Potenzial CO2 zu verdrängen	49,22 g/kWh/a	98,83

Parameter		
Allg. Zinssatz	i	3,0%
Allg. Zinsfaktor	q	1,030
Annuitätsfaktor	a	0,117
Preisänderungsfaktor kapitalgebundene Kosten	r_K	1,015
Preisänderungsfaktor verbrauchsgebundene Kosten	r_V	1,015
Preisänderungsfaktor betriebsgebundene Kosten	r_B	1,015
Preisänderungsfaktor sonstige Kosten	r_S	1,015
Preisänderungsfaktor Instandhaltung&Bedienung	r_I	1,015
Barwertfaktor kapitalgebundene Kosten	b_K	9,097
Barwertfaktor verbrauchsgebundene Kosten	b_V	9,097
Barwertfaktor betriebsgebundene Kosten	b_B	9,097
Barwertfaktor sonstige Kosten	b_S	9,097
Barwertfaktor Instandhaltung&Bedienung	b_I	9,097
Bedienungsaufwand-Stundensatz	V_St	30,0

A-4. Wirtschaftlichkeit und CO₂ – Variante 2a

Variante 2a: WP ausserhalb des RZ, verschenkte Abwärme - RZ Bet

Kapitalgebundene Kosten	Ansatz	Bemerkung	VDI 2067-1 Tab. 2-5		Investition A ₀ [€]	Barwerte Ersatzinvestitionen			Restwert R _w [€]	Förderung [€]	Annuität A _{N,K} [€/a]
			rechnerische Nutzungsdauer T _N [a]	Anzahl Ersatzbeschaffungen n [-]		A ₁ [€]	A ₂ [€]	A ₃ [€]			
Energiezentrale	nach Bedienflächen		50	0	-	-	-	-	-	-	-
Wärmepumpe	Anzahl nach Sim	beim FW-Netzbetreiber	20	0	-	-	-	-	-	-	-
FW-Übergabestation inkl. MSR			20	0	-	-	-	-	-	-	-
Wärmeübertrager	entspricht Anz. WP	35 MW Kaskade je 500 kW	20	0	4.550.000	-	-	-	1.259.612	2.502.500	92.364
Leitungsführung	Längenspez. nach Sim	100 m, mit DN80 inkl. Dämmung	40	0	2.100.000	-	-	-	482.827	-	189.582
Armaturen	anteilig an Leitungskosten (10%)		20	0	210.000	-	-	-	58.136	-	17.803
Pumpen inkl. Druckhaltung	entspricht Anz. WP * 2	35 Stück	15	0	700.000	-	-	-	149.768	385.000	19.370
					7.560.000					2.887.500	319.120

Bedarfsgebundene Kosten	Strompreis €/kWh	Jahresbedarf Simulation kWh/a	Energiepreis €/a	CO ₂ Faktor g/kWh	CO ₂ t	spez. CO ₂ -Preis €/t	CO ₂ Preis €/a	Gesamtpreis €/a
Wärmepumpe	0,26	-	-	366	-	80,65	-	-
Pumpen	0,26	111.315	28.695	366	41	80,65	3.286	31.981
			28.695					31.981

Betriebsgebundene Kosten	Aufwendungen (VDI 2067-1 Tabelle 2-5)			Kosten		
	Instantsetzung f _{Inst} [%]	Wartung und Inspektion f _{W+Insp} [%]	Bedienen f _{Bed} [h/a]	Instantsetzung [€/a]	Wartung und Inspektion [€/a]	Bedienen [€/a]
Energiezentrale	1,0	1,0	0,0	-	-	-
Wärmepumpe	1,0	1,5	5,0	-	-	4.500,0
FW-Übergabestation inkl. MSR	2,0	1,0	0,0	-	-	-
Wärmeübertrager	2,0	0,0	0,0	91.000,0	-	-
Leitungsführung	1,0	0,0	0,0	21.000,0	-	-
Armaturen	1,5	1,0	0,0	3.150,0	2.100,0	-
Pumpen inkl. Druckhaltung	2,0	1,0	0,0	14.000,0	7.000,0	-
			Summe	129.150,0	9.100,0	4.500,0

Zusammenfassung	
Betrachtungszeitraum	10 a
Kapitalgebundene Kosten	319.120 €
Platzbedarf Anlagen	- m ²
Gesamtinvest Jahr 1	4.672.500 €
Bedarfsgebundene Kosten	34.105 €
Betriebsgebundene Kosten	188.364 €
Sonstige Kosten	- €
Jahresannuitäten	541.588 €
Strombedarf RZ	183.412 MWh/a
Auskoppelbare Wärme	64.736 MWh/a
Bedarf WP-Strom	111 MWh/a
CO ₂ Anteil Fernwärme	280 g/kWh
CO ₂ Anteil WP	366 g/kWh
nötiger Erlös für Break-Even	0,008 €/kWh
Preis FW	0,153 €/kWh

Parameter	
Allg. Zinssatz	i 3,0%
Allg. Zinsfaktor	q 1,030
Annuitätsfaktor	a 0,117
Preisänderungsfaktor kapitalgebundene Kosten	r _K 1,015
Preisänderungsfaktor verbrauchsgebundene Kosten	r _V 1,015
Preisänderungsfaktor betriebsgebundene Kosten	r _B 1,015
Preisänderungsfaktor sonstige Kosten	r _S 1,015
Preisänderungsfaktor Instandhaltung&Bedienung	r _I 1,015
Barwertfaktor kapitalgebundene Kosten	b _K 9,097
Barwertfaktor verbrauchsgebundene Kosten	b _V 9,097
Barwertfaktor betriebsgebundene Kosten	b _B 9,097
Barwertfaktor sonstige Kosten	b _S 9,097
Barwertfaktor Instandhaltung&Bedienung	b _I 9,097
Bedienungsaufwand-Stundensatz	V _{St} 30,0

A-5. Wirtschaftlichkeit und CO₂ – Variante 2b

Variante 2b: WP ausserhalb des RZ, wirtschaftlicher Verkauf Abwä VDI 2067-1 Tab. 2-5

Kapitalgebundene Kosten	Ansatz	Bemerkung	rechnerische Nutzungsdauer T_N [a]	Anzahl Ersatzbeschaffungen n [-]	Investition A_0 [€]	Barwerte Ersatzinvestitionen			Restwert R_w [€]	Förderung [€]	Annuität A_N,K [€/a]
						A_1 [€]	A_2 [€]	A_3 [€]			
Energiezentrale	nach Bedienflächen	10% Aufschlag	50	0	221.100	-	-	-	30.261	88.440	6.882,84
Wärmepumpe	Anzahl nach Sim	35 MW Kaskade je 1 MW	20	0	43.111.418	-	-	-	-	17.244.567	1.738.658,67
FW-Übergabestation inkl. MSR		36 MW Kaskade je 3MW	20	0	840.000	-	-	-	-	336.000	33.876,72
Wärmeübertrager	entspricht Anz. WP	beim RZ Betreiber	20	0	-	-	-	-	-	-	-
Leitungsführung	Längenspez. nach Sim	100 m, mit DN80 inkl. Dämmung	40	0	2.100.000	-	-	-	321.885	840.000	63.056,08
Armaturen	anteilig an Leitungskosten (10%)		20	0	210.000	-	-	-	-	84.000	8.469,18
Pumpen inkl. Druckhaltung	entspricht Anz. WP * 2	70 Stück	15	1	700.000	561.733	-	-	374.489	280.000	40.816,37
					47.182.518					18.873.007	1.891.759,86

Bedarfsgebundene Kosten	Strompreis €/kWh	Jahresbedarf Simulation kWh/a	Energiepreis €/a	CO2 Faktor g/kWh	CO2 t	spez. CO2-Preis €/t	CO2 Preis €/a	Gesamtpreis €/a
Wärmepumpe	0,22	24.638.103	5.337.299	366	9.018	80,65	727.265	6.064.564
Pumpen	0,22	111.315	24.114	366	41	80,65	3.286	27.400
			5.361.413					6.091.964

Betriebsgebundene Kosten	Aufwendungen (VDI 2067-1 Tabelle 2-5)			Kosten		
	Instantsetzung f_Inst [%]	Wartung und Inspektion f_W+Insp [%]	Bedienen f_Bed [h/a]	Instantsetzung [€/a]	Wartung und Inspektion [€/a]	Bedienen [€/a]
Energiezentrale	1,0	1,0	0,0	2.211,0	2.211,0	-
Wärmepumpe	1,0	1,5	5,0	431.114,2	646.671,3	4.500,0
FW-Übergabestation inkl. MSR	2,0	1,0	0,0	16.800,0	8.400,0	-
Wärmeübertrager	2,0	0,0	0,0	-	-	-
Leitungsführung	1,0	0,0	0,0	21.000,0	-	-
Armaturen	1,5	1,0	0,0	3.150,0	2.100,0	-
Pumpen inkl. Druckhaltung	1,0	1,0	0,0	7.000,0	7.000,0	-
			Summe	481.275,2	666.382,3	4.500,0

Zusammenfassung	
Betrachtungszeitraum	20 a
Kapitalgebundene Kosten	1.891.760 €
Platzbedarf Anlagen	300 m ²
Gesamtinvest Jahr 1	28.309.511 €
Bedarfsgebundene Kosten	6.941.405 €
Betriebsgebundene Kosten	1.383.966 €
Sonstige Kosten	- €
Jahresannuitäten	10.217.131 €

Strombedarf RZ	183.412 MWh/a
Auskoppelbare Wärme	64.736 MWh/a
Bedarf WP-Strom	24.749 MWh/a
CO2 Anteil Fernwärme	280 g/kWh
CO2 Anteil WP	366 g/kWh

nötiger Erlös für Break-Even	0,166 €/kWh
Preis FW	0,153 €/kWh

verdrängtes CO2	9.067,90 t/a	18.126,18
spez. Potenzial CO2 zu verdrängen	49,44 g/kWh/a	98,83

Parameter		
Allg. Zinssatz	i	3,0%
Allg. Zinsfaktor	q	1,030
Annuitätsfaktor	a	0,067
Preisänderungsfaktor kapitalgebundene Kosten	r_K	1,015
Preisänderungsfaktor verbrauchsgebundene Kosten	r_V	1,015
Preisänderungsfaktor betriebsgebundene Kosten	r_B	1,015
Preisänderungsfaktor sonstige Kosten	r_S	1,015
Preisänderungsfaktor Instandhaltung&Bedienung	r_I	1,015
Barwertfaktor kapitalgebundene Kosten	b_K	16,952
Barwertfaktor verbrauchsgebundene Kosten	b_V	16,952
Barwertfaktor betriebsgebundene Kosten	b_B	16,952
Barwertfaktor sonstige Kosten	b_S	16,952
Barwertfaktor Instandhaltung&Bedienung	b_I	16,952
Bedienungsaufwand-Stundensatz	V_St	30,0

A-6. Wirtschaftlichkeit und CO₂ – Variante 3

Variante 1: WP beim Wärmenetzbetreiber, wirtschaftlicher Verkauf Abwärme

Richtlinie: BEW

Kapitalgebundene Kosten	Ansatz	Bemerkung	VDI 2067-1 Tab. 2-5		Einzelpreis [€]	Investition A_0 [€]	1 2 3			Restwert R_w [€]	Förderung [€]	Annuität A_N,K [€/a]
			rechnerische Nutzungsdauer T_N [a]	Anzahl Ersatzbeschaffungen n [-]			Barwerte Ersatzinvestitionen					
							A_1 [€]	A_2 [€]	A_3 [€]			
Energiezentrale	nach Bedienflächen	10% Aufschlag	50	0	221.100	221.100	-	-	-	30.261	88.440	6.883
Wärmepumpe	Anzahl nach Sim	35 MW Kaskade je 1 MW	20	0	1.231.755	43.111.418	-	-	-	-	17.244.567	1.738.659
FW-Übergabestation inkl. MSR		36 MW Kaskade je 3MW	20	0	70.000	840.000	-	-	-	-	336.000	33.877
Wärmeübertrager	entspricht Anz. WP	35 MW Kaskade je 500 kW	20	0	65.000	4.550.000	-	-	-	-	1.820.000	183.499
Leitungsführung	Längenspez. nach Sim	200 m, mit DN80 inkl. Dämmung	40	0	60.000	2.100.000	-	-	-	321.885	840.000	63.056
Armaturen	anteilig an Leitungskosten (10%)		20	0	6.000	210.000	-	-	-	-	84.000	8.469
Pumpen inkl. Druckhaltung	entspricht Anz. WP * 2	70 Stück	10	1	20.000	1.400.000	1.208.972	-	-	-	560.000	137.723
						52.432.518					20.973.007	2.172.165

Bedarfsgebundene Kosten	Strompreis €/kWh	Jahresbedarf Simulation kWh/a	Energiepreis €/a	CO2 Faktor g/kWh	CO2 t	spez. CO2-Preis €/t	CO2 Preis €/a	Gesamtpreis €/a
Wärmepumpe	0,22	24.638.103	5.337.299	366	9.018	80,65	727.265	6.064.564
Pumpen	0,22	222.629	48.228	366	81	80,65	6.572	54.799
			5.385.527					6.119.364

Betriebsgebundene Kosten	Aufwendungen (VDI 2067-1 Tabelle 2-5)			Kosten		
	Instantsetzung f_Inst [%]	Wartung und Inspektion f_W+Insp [%]	Bedienen f_Bed [h/a]	Instantsetzung [€/a]	Wartung und Inspektion [€/a]	Bedienen [€/a]
Energiezentrale	1,0	1,0	0,0	2.211,0	2.211,0	-
Wärmepumpe	1,0	1,5	5,0	431.114,2	646.671,3	4.500,0
FW-Übergabestation inkl. MSR	2,0	1,0	0,0	16.800,0	8.400,0	-
Wärmeübertrager	2,0	0,0	0,0	91.000,0	-	-
Leitungsführung	1,0	0,0	0,0	21.000,0	-	-
Armaturen	1,5	1,0	0,0	3.150,0	2.100,0	-
Pumpen inkl. Druckhaltung	2,0	1,0	0,0	28.000,0	14.000,0	-
			Summe	593.275,2	673.382,3	4.500,0

Zusammenfassung	
Betrachtungszeitraum	20 a
Kapitalgebundene Kosten	2.172.165 €
Platzbedarf Anlagen	300 m ²
Gesamtinvest Jahr 1	31.459.511 €
Bedarfsgebundene Kosten	6.972.625 €
Betriebsgebundene Kosten	1.519.559 €
Sonstige Kosten	- €
Jahresannuitäten	10.664.350 €
Strombedarf RZ	183.412 MWh/a
Auskoppelbare Wärme	64.736 MWh/a
Bedarf WP-Strom	24.861 MWh/a
CO2 Anteil Fernwärme	280 g/kWh
CO2 Anteil WP	366 g/kWh

Parameter		
Allg. Zinssatz	i	3,0%
Allg. Zinsfaktor	q	1,030
Annuitätsfaktor	a	0,067
Preisänderungsfaktor kapitalgebundene Kosten	r_K	1,015
Preisänderungsfaktor verbrauchsgebundene Kosten	r_V	1,015
Preisänderungsfaktor betriebsgebundene Kosten	r_B	1,015
Preisänderungsfaktor sonstige Kosten	r_S	1,015
Preisänderungsfaktor Instandhaltung&Bedienung	r_I	1,015
Barwertfaktor kapitalgebundene Kosten	b_K	16,952
Barwertfaktor verbrauchsgebundene Kosten	b_V	16,952
Barwertfaktor betriebsgebundene Kosten	b_B	16,952
Barwertfaktor sonstige Kosten	b_S	16,952
Barwertfaktor Instandhaltung&Bedienung	b_I	16,952
Bedienungsaufwand-Stundensatz	V_St	30,0

notiger Erlös für Break-Even	0,165 €/kWh
Preis FW	0,153 €/kWh

verdrängtes CO2	9.027,16 t/a	18.126,18
spez. Potenzial CO2 zu verdrängen	49,22 g/kWh/a	98,83

Literaturverzeichnis

- [1] R. Hintemann, J. Clausen, S. Beucker und S. Hinterholzer, „Studie zu Nachhaltigkeitspotenzialen in und durch Digitalisierung in Hessen,“ 2021. [Online]. Available: https://digitales.hessen.de/sites/digitales.hessen.de/files/2021-09/Nachhaltigkeitsstudie_0.pdf. [Zugriff am 08. März 2022].
- [2] A. C. Kheirabadi und D. Groulx, „Cooling of server electronics: A design review of existing technology,“ *Applied Thermal Engineering*, Bd. 105, Nr. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.03.056>, pp. 622-638, 2016.
- [3] K. Ebrahimi, G. F. Jones und S. Fleischer A., „A review of data center cooling technology, operating conditions and the corresponding low-grade waste heat recovery opportunities,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 31, Nr. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.007>, pp. 622-638, 2014.
- [4] ASHRAE, „Best Practices for DataCom Facility Energy Efficiency,“ *Datacom Series*, Bd. 6, 2009.
- [5] A. Capozzoli und G. Primiceri, „Cooling Systems in Data Centers: State of Art and Emerging Technologies,“ *Energy Procedia*, Bd. 83, Nr. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.168>, December 2015.
- [6] Schneider Electric White Paper, „The Different Technologies for Cooling Data Centers,“ 2017. [Online]. Available: <https://it-resource.schneider-electric.com/white-papers/wp-59-the-different-technologies-for-cooling-data-centers>. [Zugriff am 02. März 2022].
- [7] E. Oró, P. Taddeo und J. E. Salom, „Waste heat recovery from urban air cooled data centres to increase energy efficiency of district heating networks,“ *Sustainable Cities and Society*, Bd. 45, Nr. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.12.012>, 2018.
- [8] Mitsubishi, „Climaveneta Heat Pumps,“ [Online]. Available: <https://www.melcohit.com/en/ranges/6/heat-pump-range>. [Zugriff am 13. Oktober 2022].
- [9] Cloud&Heat, „CO₂- und Kosteneinsparpotenziale durch das Cloud&Heat-Kühlsystem mit Abwärmenutzung in Rechenzentren,“ Whitepaper 2020. [Online]. Available: https://www.cloudandheat.com/wp-content/uploads/2020/02/2019-12-16_Whitepaper-Einsparpotenzial.pdf. [Zugriff am 10. März 2022].
- [10] T. Tiessen, „Energieeffizienzpotenziale von Rechenzentren am Beispiel hessischer Rechenzentren in Südhessen,“ *Masterthesis TU Darmstadt*, p. 62, 2021.
- [11] T. Funke, R. Hintemann, C. Kaup, C. Maier, S. Müller, S. Paulußen, J. Süß und U. Terrahe, „Abwärmenutzung im Rechenzentrum – Ein Whitepaper vom NeRZ in Zusammenarbeit mit dem eco-Verband der Internetwirtschaft e.V.,“ Juli 2019. [Online]. Available: https://ne-rz.de/wp-content/uploads/2019/07/Whitepaper_Abwaermenutzung_2019.pdf. [Zugriff am 10. März 2022].

- [12] Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Öko-Institut, Hamburg Institut, „Systemische Herausforderung der Wärmewende,“ April 2021. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/systemische-herausforderung-der-waermewende>. [Zugriff am 08. März 2022].
- [13] H. Lund, S. Werner, R. Wiltshire, S. Svendsen, J. E. Thorsen, F. Hvelplund und B. V. Mathiesen, „4th Generation District Heating (4GDH),“ *Energy*, Bd. 68, Nr. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089>, p. 1–11, April 2014.
- [14] Stockholm Exergi: Open District Heating, „Bahnhof data centre Pionen Profitable recovery with Open District Heating,“ [Online]. Available: <https://www.opendistrictheating.com/case/bahnhof-data-centre-pionen/>. [Zugriff am 13. Oktober 2022].
- [15] Celsius Project, „Waste heat from data centers,“ Juni 2020. [Online]. Available: <https://celsiuscity.eu/wp-content/uploads/2020/06/Waste-heat-from-data-centres.pdf>. [Zugriff am 13. Oktober 2022].
- [16] M. Wahlroos, M. Pärssinen, S. Rinne, S. Syri und J. Manner, „Future views on waste heat utilization – Case of data centers in Northern Europe,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 82, Nr. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.058>, p. 1749–1764, February 2018.
- [17] M. Vieri, T. Hellman, J. Polo, M. Saukkola, P. Ranta und S. Mäenpää, „Distributed heating using data senter waste heat,“ 2011. [Online]. Available: http://www.vahvacon.vienet.fi/datafiles/userfiles/Tieto_p1.pdf Green Enterprise.pdf. [Zugriff am 13. 10. 2022].
- [18] U. Ostler, „In Finnland beliebt: Fernwärme aus dem Rechenzentrum,“ 2021. [Online]. Available: <https://www.datacenter-insider.de/in-finnland-beliebt-fernwaerme-aus-dem-rechenzentrum-a-990693/?cflt=rel>. [Zugriff am 13. 10. 2022].
- [19] Energie-Experten, „Frankfurter Wohnquartier Westville: Wärmepumpen nutzen IT-Abwärme,“ [Online]. Available: <https://www.energie-experten.org/projekte/frankfurter-wohnquartier-westville-waermepumpen-nutzen-it-abwaerme>. [Zugriff am 13. Oktober 2022].
- [20] S. Koschinsky, „Universität Greifswald, Neubau Rechenzentrum. Staatliche Bau- und Liegenschaftsverwaltung in Mecklenburg-Vorpommern,“ 2021. [Online]. Available: <https://www.sbl-mv.de/universität-greifswald-neubau-rechenzentrum+2400+1025657>. [Zugriff am 13. Oktober 2022].
- [21] J. Oltmanns, D. Sauerwein, F. Dammel, P. Stephan und C. Kuhn, „Potential for waste heat utilization of hot-water-cooled data centers: A case study,“ *Energy Science Engineering*, Bd. 8, Nr. <https://doi.org/10.1002/ese3.633>, February 2020.

- [22] Celsius Project, „Excess heat from a datacentre in Val d’Europe, France,“ 2020. [Online]. Available: <https://celsiuscity.eu/excess-heat-from-data-centre-in-val-deurope-france/>. [Zugriff am 13. Oktober 2022].
- [23] P. Judge, „NorthC's Aalsmeer data center ships waste heat to local customers,“ 2021. [Online]. Available: <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/northcs-aalsmeer-data-center-ships-waste-heat-to-local-customers/>. [Zugriff am 13. 10. 2022].
- [24] „FRA01 - Offenbach am Main,“ Juni 2021. [Online]. Available: <https://p7f.vogel.de/companies/60/cc/60cc7484a67b9/rz-information-fra01-de.pdf>. [Zugriff am 20. März 2023].
- [25] EVO, „Rechenzentrum auf EVO-Campus digital eröffnet,“ Oktober 2020. [Online]. Available: <https://www.evo-ag.de/wir-in-offenbach/ueber-uns/news/details/rechenzentrum-auf-evo-campus-digital-eroeffnet>. [Zugriff am 13. Februar 2023].
- [26] C. G. Data, „Main DC - Raum für rund 3.300 Racks,“ November 2021. [Online]. Available: <https://datacenter-group.com/de/expertise/artikel/main-dc-raum-fuer-rund-3300-racks/>. [Zugriff am 13. Februar 2023].
- [27] op-online.de, „Riesiges Rechenzentrum wächst weiter: Stadt löst entscheidendes Problem,“ Mai 2021. [Online]. Available: <https://www.op-online.de/offenbach/offenbach-rechenzentrum-cloud-hq-bau-problem-anwohner-kritik-90573085.html>. [Zugriff am 13. Februar 2023].
- [28] EVO, „Rechner-Abwärme soll Wohnungen heizen,“ Februar 2022. [Online]. Available: <https://www.evo-ag.de/presse/pressemitteilungen/details/rechner-abwaerme-soll-wohnungen-heizen>. [Zugriff am 13. Februar 2023].
- [29] Hessisches Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation (HLBG), „Geodaten online,“ [Online]. Available: https://gds.hessen.de/INTERSHOP/web/WFS/HLBG-Geodaten-Site/de_DE/-/EUR/ViewDownloadcenter-Start. [Zugriff am März 2022].
- [30] e4 consult, „Energie- und Treibhausgasbilanz der Stadt Offenbach am Main, 4. Fortschreibung, Erläuterungsbericht, Berichtszeitraum 2017-2019,“ September 2020. [Online]. Available: file:///C:/Users/APaul/Downloads/Energie-undTHG-Bilanz_OF_2017-19_200918-web.pdf. [Zugriff am Juni 2022].
- [31] E. Oró, A. Garcia und J. E. Salom, „Experimental and neumerical analysis of the air management in a data centre in Spain,“ *Energy and Buildings*, Bd. 116, Nr. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.01.037>, 2016.
- [32] J. Cho, T. Lim und B. S. Kim, „Viability of datacenter cooling systems for energy efficiency in temperate or subtropical regions: Case study,“ *Energy and Buildings*, Bd. 55, Nr. www.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.012, 2012.

- [33] M. Wirtz, L. Kivilip, P. Remmen und D. Müller, „Quantifying Demand Balancing in Bidirectional Low Temperature Networks,“ *Energy & Buildings*, Bd. 224, Nr. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110245>, 2020.
- [34] *Gebäudeenergiegesetz Anlage 9*, 8. August 2020.
- [35] P. Icha, T. Lauf und G. Kuhs, „Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2021,“ April 2022. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-der-spezifischen-kohlendioxid-8>. [Zugriff am 13. Februar 2023].
- [36] Kreditanstalt für Wiederaufbau, „Infoblatt CO2-Faktoren,“ November 2022. [Online]. Available: [https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-\(Inlandsf%C3%B6rderung\)/PDF-Dokumente/6000004912_Infoblatt_295_CO2_Faktoren.pdf](https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-(Inlandsf%C3%B6rderung)/PDF-Dokumente/6000004912_Infoblatt_295_CO2_Faktoren.pdf). [Zugriff am 07. Februar 2023].
- [37] *VDI 2067 Blatt 1*, September 2012.
- [38] Bundesnetzagentur, „SMARD - Strommarktdaten,“ [Online]. Available: www.smard.de. [Zugriff am 28. Februar 2023].
- [39] Energieversorgung Offenbach AG, „Preisliste Fernwärme,“ Oktober 2022. [Online]. Available: https://www.evo-ag.de/fileadmin/user_upload/Angebote_und_Tarife/Privatkunden/Waerme/Dokumente/Preisblatt_EVO_Komfort_Direkt_ab_01102022_7__Mwst.pdf. [Zugriff am 10. Oktober 2022].
- [40] R. Hintemann und S. Hinterholzer, „Entwicklungen im Rechenzentrumsmarkt Hessen - Chancen für eine nachhaltige Nutzung von Abwärme,“ Borderstep Institut, Berlin, 2022. [Online]. Available: <https://www.borderstep.de/publikationen/>. [Zugriff am 04. März 2023].
- [41] "IDC - Servers - Market Share", „IDC: The premier global market intelligence company,“ September 2022. [Online]. Available: <https://www.idc.com/promo/servers>. [Zugriff am 23. Oktober 2022].
- [42] R. Hintemann, M. Graß, S. Hinterholzer und T. Grothey, „Rechenzentren in Deutschland - Aktuelle Marktentwicklungen,“ Bitcom, 2022. [Online]. Available: <https://www.bitkom.org/Bitkom/Publikationen/Rechenzentren-in-Deutschland-2022>. [Zugriff am 15. April 2022].
- [43] manage IT, „Public Cloud: Microsoft und Google gewinnen Marktanteile,“ Juli 2022. [Online]. Available: <https://ap-verlag.de/public-cloud-microsoft-und-google-gewinnen-marktanteile/74647/>. [Zugriff am 23. Oktober 2022].
- [44] R. Hintemann und S. Hinterholzer, „Rechenzentren in Europa – Chancen für eine nachhaltige Digitalisierung - Teil 1,“ Allianz zu Stärkung digitaler Infrastrukturen in Deutschland, 2020.

- [Online]. Available: <https://digitale-infrastrukturen.net/studie-nachhaltige-digitalisierung-in-europa/>. [Zugriff am 11. Juni 2020].
- [45] R. Hintemann, S. Hinterholzer, F. Montecvecchi und T. Stickler, „Energy-efficient Cloud Computing Technologies and Policies for an Eco-friendly Cloud Market,“ Borderstep Institute & Environment Agency Austria, 2020. [Online]. Available: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/bf276684-32bd-11eb-b27b-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-183168542>. [Zugriff am 23. Oktober 2022].
- [46] R. Hintemann, S. Hinterholzer und T. Grothey, „Verteilung der Rechenzentren in Deutschland - Hessen mit der Region Frankfurt Rhein/Main mit großem Abstand größter Ballungsraum,“ *DataCenter Insider*, 2021 (in Veröffentlichung).
- [47] R. Hintemann, S. Hinterholzer und T. Grothey, „Herausforderungen und Chancen durch den Boom beim Neubau von Rechenzentren,“ Hessische Staatskanzlei, Ministerin für Digitale Strategie und Entwicklung, 2022. [Online]. Available: https://digitales.hessen.de/sites/digitales.hessen.de/files/2022-05/rechenzentrumsmarkt_hessen.pdf. [Zugriff am 19. Mai 2022].
- [48] R. C. J. Hintemann, „Bedeutung digitaler Infrastrukturen in Deutschland. Sozioökonomische Chancen und Herausforderungen für Rechenzentren im internationalen Wettbewerb,“ 2018. [Online]. Available: https://www.eco.de/wp-content/uploads/dlm_uploads/2018/06/DI_Studie.pdf. [Zugriff am 14. Juni 2018].
- [49] I. Janovič, „Digitalwirtschaft in Frankfurt: Wo Rechenzentren künftig gebaut werden dürfen,“ FAZ.NET, März 2022. [Online]. Available: <https://www.faz.net/aktuell/rhein-main/frankfurt/wo-in-frankfurt-kuenftig-rechenzentren-gebaut-werden-duerfen-17901365.html>. [Zugriff am 24. Oktober 2022].
- [50] J. Clausen, R. Hintemann und S. Hinterholzer, „Wirtschaftlichkeit der Abwärmenutzung aus Rechenzentren in Deutschland. Update 2022,“ Hintergrundpapier, 2022. [Online]. Available: https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2022/08/Abwaermenutzung_Rechenzentren_Update_2022.pdf. [Zugriff am 24. Oktober 2022].
- [51] H. M. Ljungqvist, L. Mattsson, M. Risberg und M. Vesterlund, „Data center heated greenhouses, a matter for enhanced food self-sufficiency in sub-arctic regions,“ *Energy*, Bd. 215, Nr. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119169>, 2021.
- [52] M. Vesterlund und A. Mellgren, „Lettuce and servers - industrial symbiosis through waste heat from the data center,“ RISE, 2022. [Online]. Available: <https://www.ri.se/en/lettuce-and-servers-industrial-symbiosis-through-waste-heat-from-the-data-center>. [Zugriff am 23. Februar 2023].

- [53] T. Lalonder, D. Monfet und D. Halliot, „Heating a Greenhouse with Data Centre Waste Heat,“ März 2022. [Online]. Available: <https://substance.etsmtl.ca/en/heating-greenhouse-with-data-centre-waste-heat>. [Zugriff am 23. Februar 2023].
- [54] N. Asadov, K. J. Lindenberg, T. Fischer, F. Gohr, S. Brandt und M. Kriegel, Forschungsprojekt HotFIAd Abwärmenutzung aus Kompakt-Rechenzentren mit Hot-Fluid-Adsorptionskältesystem, TU-Berlin, dc-ce, Berlin, 2022.
- [55] U. Ostler, „Fortum kauft Abwärme von schwedischem Rechenzentrum,“ April 2016. [Online]. Available: <https://www.datacenter-insider.de/fortum-kauft-abwaerme-von-schwedischem-rechenzentrum-a-528335/>. [Zugriff am 8. Mai 2019].
- [56] U. Ostler, „Datacenter in Schweden und in Deutschland - best Practices versus Ignoranz,“ Juni 2018. [Online]. Available: <https://www.datacenter-insider.de/datacenter-in-schweden-und-in-deutschland-best-practices-versus-ignoranz-a-718973/>. [Zugriff am 08. Mai 2019].