



CENTRAL OFFICE 2030 – EFFEKTIVE, NACHHALTIGE UND RESILIENTE TELE-KOMMUNIKATIONSNETZE IM ENERGIESYSTEM

# Klimaneutralität und Energieeffizienz von Rechenzentren - Best Practice Beispiele

Hannah Seibel

Simon Hinterholzer

Severin Beucker

# IMPRESSUM

## KURZTITEL

KLIMANEUTRALE RECHENZENTREN – BEST PRACTICES

## AUTORINNEN UND AUTOREN

Hannah Seibel (Borderstep Institut)

Simon Hinterholzer (Borderstep Institut)

Dr. Severin Beucker (Borderstep Institut)

## KONSORTIALFÜHRUNG

Deutsche Telekom AG

Dr. Andreas Gladisch

Winterfeldtstr. 21 | 10781 Berlin | [www.telekom.com](http://www.telekom.com)

## PROJEKTPARTNER

Deutsche Telekom AG

Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit gGmbH

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen

Technische Universität Darmstadt

50Hertz Transmission GmbH

## ZITIERVORSCHLAG

Seibel, H., Hinterholzer, S. & Beucker, S. (2023). Klimaneutrale Rechenzentren – Best Practices. Berlin: CO 2030 Konsortium.

## FÖRDERMITTELGEBER

Das Projekt CO 2030 wird vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) sowie seinem Projektträger TÜV Rheinland Consulting GmbH gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>Impressum.....</b>	<b>II</b>
<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>III</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>IV</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>IV</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>V</b>
<b>1 Klimaneutralität von Rechenzentren.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Best Practice Rechenzentren .....</b>	<b>3</b>
2.1 Kombinierte Lösungen.....	3
2.2 Abwärmenutzungskonzepte.....	10
2.3 Verbesserte Kühlsysteme .....	12
2.4 Erweiterte Ansätze der Energieerzeugung und -effizienz .....	15
<b>3 Fazit und Übertragbarkeit auf Telekommunikationsnetze .....</b>	<b>17</b>
<b>Literatur und Quellen.....</b>	<b>20</b>

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: EcoDataCenter 1 .....	4
Abbildung 2: Geplantes EcoDataCenter 2 .....	5
Abbildung 3: Geplantes Datacenter FRA02 .....	6
Abbildung 4: Versuchsrechenzentrum von Vattenfall in Fordbro .....	7
Abbildung 5: Geplantes Rechenzentrum von CCGreen in Cáceres .....	8
Abbildung 6: Geplantes Wohnquartier Westville in Frankfurt a.M. ....	11
Abbildung 7: District Heating in Stockholm.....	11
Abbildung 8: Prinzip der Fjordkühlung.....	13
Abbildung 9: Clean-Energy-Ansatz .....	15
Abbildung 10: Carbon Aware Computing – Lastenverschiebung.....	16

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Climate-positive EcoDataCenter 1, Falun, Schweden.....	3
Tabelle 2: EcoDataCenter 2, Östersund, Schweden .....	4
Tabelle 3: Datacenter FRA02, Schwalbach am Taunus, Rhein-Main-Gebiet.....	5
Tabelle 4: Pilotprojekt Vattenfall in Jordbro, Schweden.....	6
Tabelle 5: CO2-neutrale Rechenzentren von NorthC in Groningen, Niederlande .....	7
Tabelle 6: Campus Data Center CCGreen in Cáceres, Spanien.....	8
Tabelle 7: Amazon- AWS Clous.....	9
Tabelle 8: Wasserstoffbetriebenes off-grid Rechenzentrum, Mountain View, Kalifornien, USA .....	9
Tabelle 9: Forschungsprojekt w.e.district: Abwärmenutzung aus Rechenzentrum in Luleå, Schweden .....	10
Tabelle 10: Abwärmenutzung für Frankfurter Wohnquartier, Frankfurt a.M. ....	10
Tabelle 11: Open District Heating Bahnhof Thule/Stockholm, Schweden.....	11
Tabelle 12: Equinix’s FR6 Rechenzentrum in Frankfurt – Kühlung mit Hilfe von KI.....	12
Tabelle 13: Einsatz alternativer Kühlmittel bei den Stadtwerken Lübbecke .....	13
Tabelle 14: Kühlung von Rechenzentren mit Wasser aus Fjorden in Norwegen .....	13
Tabelle 15: Immersionskühlung in Quincy, Washington, USA .....	14
Tabelle 16: Googles 24/7 Clean Energy Ansatz .....	15
Tabelle 17: Carbon Aware Computing .....	16

## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BHKW	Blockheizkraftwerk
CISPE	Cloud Infrastructure Services Providers in Europe
CNDCP	Climate Neutral Data Center Pact
EUDCA	Data Centre Association
FKW	Fluorkohlenwasserstoffe
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologien
KI	Künstliche Intelligenz
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
MW	Megawatt
PPA	Power Purchase Agreement
PUE	Power Usage Effectiveness
PV	Photovoltaik
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
WUE	Water Usage Effectiveness

# 1 Klimaneutralität von Rechenzentren

Die Bedeutung der Themen Klimaneutralität und Energieeffizienz nehmen in der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)-Branche deutlich zu.

Gründe dafür können zum einen in der Verschärfung von umweltpolitischen Zielen auf europäischer (siehe z.B. Greenddeal der EU) und auf nationaler Ebene der Mitgliedsstaaten gefunden werden. In Deutschland wurde dies zuletzt anhand des Klimaschutzgesetzes, das sektorbezogene Ziele festlegte, bzw. am Entwurf des Energieeffizienzgesetzes deutlich, das hohe Nutzungsquoten für erneuerbaren Strom in Rechenzentren sowie Abwärmenutzungsquoten festschreibt.

Aber auch wirtschaftliche Gründe veranlassen die Betreiberinnen und Betreiber, kontinuierlich nach Potenzialen für eine effiziente Energienutzung zu suchen. Dies gilt insbesondere für den Standort Deutschland, der im Vergleich mit anderen europäischen Staaten deutlich höhere Strompreise aufweist. Dem effizienten Betrieb von Rechenzentren sind zudem Grenzen gesetzt, da die Verfügbarkeit und Ausfallsicherheit der Technik für die Betreibenden und ihre Kundinnen und Kunden oberste Priorität besitzt. Daraus resultieren hohe Anforderungen an die Sicherheit und Redundanz z.B. von Kühltechnik, unterbrechungsfreier Stromversorgung (USV) sowie eine redundante Datenspeicherung.

Die europäischen Rechenzentrumsbetreibenden, genauer die Data Centre Association (EUDCA) sowie die Cloud Infrastructure Services Providers in Europe (CISPE) haben sich in Antwort auf den Green-deal der EU in der Initiative Climate Neutral Data Center Pact (CNDCP) (siehe CNDCP, 2023) zusammengeschlossen und verfolgen damit das Ziel, EU-Rechenzentren bis 2030 klimaneutral zu betreiben.

Die Verbesserung der Energieeffizienz und die Reduktion der Emissionen soll nach dem CNDCP mittels der folgenden Maßnahmen erfolgen:

- Energieeffizienter Betrieb und Kühlung (möglichst niedrige Power Usage Effectiveness (PUE))
- Emissionsarme bzw. -freie Energieversorgung von Rechenzentren (Nutzung regenerativer oder kohlenstofffreier Energien)
- Effizienter Umgang mit Wasser insbesondere für Kühlung Water Usage Effectiveness (WUE)
- Kreislaufwirtschaft für eingesetzte Technik (z.B. Reuse, Reparatur und Recycling von Servern)
- Möglichst hohe Nutzung von Abwärme

Als weitere Möglichkeit zur Steigerung von Klimaneutralität und Energieeffizienz werden regionale und zeitliche Lastenverschiebungen und die Flexibilisierung von Rechenzentren gesehen (z.B. durch Rechenlastverschiebung oder Nutzung der unterbrechungsfreien Stromversorgung (Batterien, Notstromdiesel, etc.)), womit Schwankungen im netzseitigen Angebot erneuerbarer Energien ausgeglichen werden können.

Schließlich soll der Einsatz regenerativer Energien in Rechenzentren gestärkt werden. In Mittel- und Südeuropa ist die Versorgung mit hohen Anteilen von Solar- oder Windstrom bereits verbreitet. In skandinavischen Ländern wird dagegen verstärkt Strom aus Wasserkraft genutzt.

Eine zunehmende Bedeutung bekommt der effiziente Einsatz von Wasser. Dabei wird die genutzte Wassermenge bezogen auf den Energieverbrauch des IT-Equipments in Form der WUE (siehe auch ISO, 2022) erfasst. Eine geringe Frischwassernutzung und Kreislaufführung von Wasser führt zu einer niedrigen WUE. Die WUE ist damit auch stark von den eingesetzten Kühlsystemen in Rechenzentren

## KLIMANEUTRALE RECHENZENTREN – BEST PRACTICES

und der Art des Rechenzentrums abhängig. In einigen Fällen kann z.B. eine niedrige PUE (mit Wasserkühlung) die WUE erhöhen. Entscheidungen zu effizienten Kühlsystemen müssen daher standortbezogen getroffen werden.

Wenig Daten und Informationen liegen bisher zur Kreislaufwirtschaft in Rechenzentren (z.B. zur Weiterverwendung und dem Recycling von Servern) vor, obwohl dieser Ressourcenstrom einen erheblichen Einfluss auf die Gesamtbilanz von Rechenzentren hat.

Ebenfalls an Bedeutung gewinnt die Nutzung von Abwärme von Rechenzentren. Aufgrund der laufenden technologischen Entwicklung (z.B. neue Chiparchitekturen für KI-Anwendungen und weiter zunehmende Leistungsdichten in Chips) kann mit steigenden Abwärmelasten aus Rechenzentren gerechnet werden. In Verbindung mit bestehenden sowie neuen Kühltechniken (z.B. direkte Flüssigkühlung) können zukünftig größere Anteile dieser Abwärme genutzt werden. Insbesondere den Rechenzentren in Ballungsgebieten kommt aufgrund ihrer Nähe zu neuen oder zukünftigen (Niedertemperatur-)Wärmenetzen eine große Bedeutung als verlässliche Wärmequelle zu. Die Nutzung der Abwärme spart Energie bei der Erzeugung von Wärme für diese Netze und verringert damit Emissionen.

Der Fokus des Vorhabens CO 2030 liegt schwerpunktmäßig auf dem nachhaltigen und resilienten Betrieb von Telekommunikationsnetzen und nicht auf Rechenzentren. Folgende Aspekte begründen die Gemeinsamkeiten beider Felder:

- Die informationstechnischen Infrastrukturen von Telekommunikation und Datenverarbeitung nähern sich immer stärker an. Zum einen besteht Telekommunikation heute im Wesentlichen aus der Übertragung von Daten (VoIP, Videotelefonie, Internetdienste, etc.), zum anderen beruhen Telekommunikations- und Datennetze auf vergleichbaren Techniken und Infrastrukturen. In beiden Domänen vollziehen sich zudem ähnliche technische Veränderungen (neue Chiparchitekturen, Cloudifizierung, Edge-Computing, etc.).
- Die Datenknotenpunkte (Central Offices) des Telekommunikationsnetzes sind aktuell zwar hauptsächlich für die Telekommunikation ausgelegt, laut „State of the Edge Report 2022“ werden in der Vereinigung der Sektoren Telekommunikation und Datenverarbeitung/Internetdienst jedoch große Chancen gesehen. Durch das Einbetten von Rechenzentren (besonders Edge- und Cloudlösungen) in Telekommunikationsinfrastrukturen können neben anderen Vorteilen auch die Nachhaltigkeitsziele schneller erreicht werden (Marshall, 2022).
- Während zu klimaneutralen Telekommunikationsstrukturen wenig Informationen verfügbar sind, ist die Situation bei Rechenzentren besser. Es liegen mehrere Analysen und Studien vor, die sich sowohl mit Umsetzungen klimaneutraler Rechenzentren befassen, als auch die Entwicklungen des Energieverbrauchs sowie möglicher Pfade zur Klimaneutralität des Sektors beschreiben (Hintemann, 2017; Hintemann et al., 2022; Hintemann, Hinterholzer, & Merz, 2023; Hintemann, Hinterholzer, Paul, & Völzel, 2023; Hintemann, Hinterholzer, & Seibel, 2023; Vida Rozite, Emi Bertoli, & Brendan Reidenbach, 2023).

Die nachfolgenden Best Practice Beispiele sollen aufzeigen, welche innovativen Ansätze im Rechenzentrumssektor verfolgt werden, um einen klimaneutralen Betrieb zu erreichen. Sie sollen daher als Anregung und ‚State of the Art‘ Sammlung für die Entwicklung nachhaltiger und resilienter Betriebskonzepte für Telekommunikationsnetze im Vorhaben CO 2030 dienen.

## 2 Best Practice Rechenzentren

Im Folgenden werden sowohl reell umgesetzte Vorhaben als auch Forschungsinitiativen für einen energieeffizienten und klimaneutralen Betrieb von Rechenzentren vorgestellt. Die Lösungen werden unterteilt in:

- Kombinierte Lösungen, die unterschiedliche Ansätze der Energieeffizienz sowie der Reduktion von Emissionen kombinieren.
- Abwärmenutzungskonzepte, die zum Ziel haben, die durch die Server entstehende Wärme z.B. für Wärmenetze nutzbar zu machen.
- Verbesserte Kühlsysteme, worunter z.B. effizientere oder alternative Kühllösungen verstanden werden.
- Erweiterte Ansätze der Energieerzeugung und -effizienz, darunter werden Konzepte zusammengefasst, die sich noch im Entwicklungsstadium befinden und die über die bestehende Praxis hinausgehen.

Es wird insgesamt deutlich, dass bisher ein vollständig klimaneutraler Betrieb von Rechenzentren kaum umgesetzt ist. Ein Vorreiter ist das Beispiel EcoDataCenter 1 in Falun, Schweden (vgl. Kapitel 2.1), welches nach den vorliegenden Informationen „klimapositiv“ betrieben wird, also mehr Emissionen einspart als ausstößt.

### 2.1 Kombinierte Lösungen

**Tabelle 1: Climate-positive EcoDataCenter 1, Falun, Schweden**

<b>Initiator:</b> EcoDataCenter, Areim AB
<b>Start:</b> 2018
<p><b>Ansatz:</b>                  Das EcoDataCenter 1 ist ein High Performance und Colocation-Rechenzentrum. Es besitzt eine elektrische Anschlussleistung von 80 MW und eine Fläche von 35.000 m<sup>2</sup>. Ein ‚klimapositiver‘ Betrieb des Rechenzentrums wird u.a. durch den Einsatz von 100 % erneuerbaren Energien (75 % Wasserkraft, 25 % Windkraft) erreicht. Überschüssige entstehende Abwärme wird in Treibstoff (Pellets) umgewandelt und in einer benachbarten Kraft-Wärme-Kopplung-Anlage genutzt. Auch bei der Bauweise des Rechenzentrums wurde auf Nachhaltigkeit Wert gelegt und mit Hilfe von Holzbauweise und Dachbegrünung Emissionen eingespart. Insgesamt weist das Rechenzentrum einen PUE von 1,2 auf.</p>
<p><b>Wirkung:</b>                  klimapositiver Betrieb durch Versorgung mit 100 % erneuerbaren Energien sowie Nutzung und Speicherung von Abwärme, Reduktion von Emissionen und Ressourcenverbrauch beim Bau der Anlage durch Holzbauweise (Energieverbrauch durch Holzbauweise ca. 8x niedriger als bei Nutzung von Beton).</p>

Quelle: EcoDataCenter, 2023a; Larson, R., 2021



Abbildung 1: EcoDataCenter 1



Quelle: EcoDataCenter, 2023

Tabelle 2: EcoDataCenter 2, Östersund, Schweden

**Initiator:** EcoDataCenter, Areim AB

**Start:** geplant 2026

**Ansatz:**

Das Rechenzentrum EcoDataCenter 2 soll mit 100 % erneuerbaren Energien aus Wasser- und Windkraft versorgt werden. In einer ersten Ausbaustufe bis 2026 wird eine elektrische Anschlussleistung von 20 MW erwartet, die bis 2030 bis zu 150 MW ansteigen soll. Die Anlage soll dann eine Fläche von bis zu 32 Acres in Anspruch nehmen.

Die entstehende Abwärme des Rechenzentrums soll in einer nahegelegenen Nahrungsmittelproduktion (Fischzucht und Gewächshäuser) genutzt werden. Die Betreibenden legen zudem Wert auf Ressourcenmanagement und Recycling, wobei dies nicht weiter ausgeführt wird.

**Wirkung:**

Klimaneutraler Betrieb durch Versorgung mit 100 % erneuerbaren Energien, Nutzung von Abwärme, Kreislaufführung von Ressourcen und insgesamt nachhaltiger und emissionsarmer Betrieb.

Quelle: EcoDataCenter, 2023b

Abbildung 2: Geplantes EcoDataCenter 2



Quelle: (EcoDataCenter, 2023)

Tabelle 3: Datacenter FRA02, Schwalbach am Taunus, Rhein-Main-Gebiet

**Initiator:** maincubes Holding & Service GmbH

**Start:** Eröffnung Sommer 2023 geplant

**Ansatz:**

Das High Performance und Colocation-Rechenzentrum FRA02 wird mit regenerativ erzeugtem Strom versorgt, der direkt vom Erzeuger bezogen werden soll. Eine Nutzung der Abwärme ist ebenfalls geplant. In der endgültigen Ausbaustufe, soll das Zentrum über 4.500 m<sup>2</sup> verfügen und eine elektrische Anschlussleistung von 7,5 MW besitzen.

Das Kühlsystem soll hauptsächlich aus indirekter freier Kühlung bestehen, bei dem ein Kühlwand-system mit wasserdurchströmten Wärmetauschern („Coolwall“-Technik) zum Einsatz kommt. Eine Vorrüstung für eine Immersionskühlung wurde beim Bau berücksichtigt. Für eine verbesserte Energieeffizienz in der Notstromversorgung wurden rotierende USV-Anlagen mit isoliert-parallelem Bus (IP-Bus) installiert und kinetische Schwungrad-Energiespeicher anstelle von Batterien eingesetzt. Es wird ein PUE von unter 1,3 angestrebt.

Weitere klimafreundliche Rechenzentren im Rhein-Main-Gebiet sind in der Planung.

**Wirkung:**

Ziel von maincubes ist es, einen klimaneutralen und nachhaltigen Betrieb seiner Rechenzentren bis 2030 zu gewährleisten. Der Begriff Nachhaltigkeit wird jedoch nicht genauer beschrieben.

Quelle: Maincubes, 2021

Abbildung 3: Geplantes Datacenter FRA02



Quelle: (Maincubes, 2023)

Tabelle 4: Pilotprojekt Vattenfall in Jordbro, Schweden

**Initiator:** Vattenfall AB und Cloud&Heat Technologies GmbH

**Start:** 2021

**Ansatz:**

An einem Vattenfall-Standort in Jordbro, Schweden, hat der Energieversorger mit dem deutschen Unternehmen Cloud&Heat ein Versuchsrechenzentrum installiert. Das System besteht aus zwei 20-Fuss-Containern, die mit flüssiggekühlten Rechnern für Machine-Learning- und KI-Anwendungen ausgerüstet sind. Die Stromversorgung der Container erfolgt über das am Standort ansässige Blockheizkraftwerk (BHKW), das mit Biomasse befeuert wird. Die Abwärme aus der Flüssigkühlung wird in das lokale Nahwärmenetz eingespeist.

**Wirkung:**

Einsparen von Emissionen durch Energieeffizienz und Abwärmenutzung.

Quelle: Vattenfall, 2021

Abbildung 4: Versuchsrechenzentrum von Vattenfall in Fordbro



Quelle: (Vattenfall, 2023)

Tabelle 5: CO<sub>2</sub>-neutrale Rechenzentren von NorthC in Groningen, Niederlande

**Initiator:** NorthC Group

**Laufzeit:** laufend bis 2030

**Ansatz:**

Der Anbieter NorthC versorgt nutzt für seine Rechenzentren bereits 100 % Ökostrom. In den nächsten Jahren sollen zudem die Investitionen in die Eigenerzeugung und Energieversorgung der eigenen Rechenzentren gestärkt werden.

In den Rechenzentren Eindhoven und Aalsmeer wird die entstehende Abwärme zur Beheizung von Gebäuden in der Nachbarschaft genutzt, in Rotterdam Schiebroek werden z.B. 10.000 Haushalte mit Wärme versorgt. NorthC achtet auf eine modulare Bauweise der Zentren, um Energie einzusparen und eine Überwachung und eventuelle Abschaltung zu ermöglichen.

Am Standort Groningen, Niederlande hat NorthC zudem die bestehenden Dieselgeneratoren für die unterbrechungsfreie Stromversorgung durch Brennstoffzellen ersetzt, die mit grünem Wasserstoff betrieben werden.

**Wirkung:**

NorthC hat sich CO<sub>2</sub>-Neutralität bis 2030 als Ziel gesetzt. Ähnliche Ansätze verfolgen die Betreiber CyrusOne und Aruba (größte Rechenzentrumsbetreibende in Europa), die bis 2030 klimaneutral sein wollen.

Quelle: NorthC Datacenters, 2023

Tabelle 6: Campus Data Center CCGreen in Cáceres, Spanien

**Initiator:** Ingenostrum SL

**Laufzeit:** geplanter Baubeginn 2023

**Ansatz:**

Das Rechenzentrum soll nach eigenen Angaben das erste CO<sub>2</sub>-neutrale Rechenzentrum der EU werden. An dem Standort soll Rechenleistung mit einem Stromverbrauch von bis 70 MW zur Verfügung gestellt werden. Weitere 40 MW für ein Forschungsrechenzentrum sind zusätzlich eingeplant. Das Zentrum soll zur Hälfte durch einen eigenen Photovoltaik (PV)-Park von 120 MW Leistung sowie Power Purchase Agreements (PPA) mit emissionsfreiem Strom versorgt werden.

Ein niedriger PUE soll durch den Einsatz von freier und geothermischer Kühlung sowie die Nutzung der Abwärme in einem lokalen Wärmenetz erreicht werden. Das Kühlwasser soll über einen künstlichen See bereitgestellt und regeneriert werden.

**Wirkung:**

Klimaneutraler Betrieb und Abwärmenutzung

Quelle: Then24, 2022

Abbildung 5: Geplantes Rechenzentrum von CCGreen in Cáceres



Quelle: CCGreen



Tabelle 7: Amazon- AWS Clous

<b>Initiator:</b> Amazon Inc.
<b>Laufzeit:</b> laufend
<p><b>Ansatz:</b>                  Der Anbieter Amazon engagiert sich fortlaufend für Energieeffizienz und Klimaneutralität seiner Rechenzentren. Die wichtigsten laufenden Maßnahmen in den Rechenzentren sind effiziente Kühlung (Wassereinsparungen), eine kontinuierliche Überwachung und die Nutzung erneuerbarer Energien (100 % bis 2025). Außerdem wird bei der Konzeption der Zentren auf eine umweltfreundliche Konstruktion und Ressourceneffizienz geachtet. So können z.B. Emissionen durch die Auswahl von Stahl (Produktion im Lichtbogenofen), die Betonzusammensetzung und die Nutzung von Recyclingmaterialien erzielt werden.</p>
<p><b>Wirkung:</b>                  Reduzierung der Treibhausgasemissionen, umweltfreundliche Konstruktion und Ressourceneffizienz von Rechenzentren.</p>

Quelle: Amazon, 2023

Tabelle 8: Wasserstoffbetriebenes off-grid Rechenzentrum, Mountain View, Kalifornien, USA

<b>Initiator:</b> ECL
<b>Start:</b> 2023
<p><b>Ansatz:</b>                  Das Start-up ECL mit Sitz in Mountain View, Kalifornien, hat sich zum Ziel gesetzt, modulare, wasserstoffbetriebene Rechenzentren zu errichten, die autark (unabhängig vom anliegenden Netz) betrieben werden können. Sowohl der Betrieb als auch die Energiespeicherung sollen mittels grünem Wasserstoff erfolgen (Brennstoffzelle und Wasserstoffspeicher). Zur Kühlung der Zentren soll Wasser eingesetzt werden, das aus der Wasserstoffstromerzeugung stammt. Dadurch sollen traditionelle Kühlmittel vermieden und der Wasserbedarf reduziert werden. Ziel ist ein emissionsfreier Betrieb mit einem PUE-Wert von 1,05.                  Die Gebäude für die Rechenzentren sollen mit Hilfe von 3D-Druckern errichtet werden, wodurch sich die Bauzeit von Gebäuden und Modulen auf wenige Monate reduziert. Das erste Rechenzentrum soll am Hauptsitz in Mountain View, Kalifornien, bereits 2023 erbaut werden.</p>
<p><b>Wirkung:</b>                  Durch die Netzunabhängigkeit der Rechenzentren soll die Inanspruchnahme regionaler Ressourcen vermieden werden und die Rechenzentren sollen so an nahezu allen Orten errichtet werden können (unabhängig vom Netzzugang), angestrebter emissionsfreier Betrieb mit PUE von 1,05.</p>

Quelle: Kilgore, 2023; Wheatley, 2023

## 2.2 Abwärmennutzungskonzepte

Tabelle 9: Forschungsprojekt w.e.district: Abwärmennutzung aus Rechenzentrum in Luleå, Schweden

<b>Initiator:</b> 22 Partner, insbesondere RISE Institut und Luleå Rechenzentrum
<b>Laufzeit:</b> 2019 - 2024
<p><b>Ansatz:</b></p> <p>Im Forschungsprojekt w.e.district soll Wärme aus Rechenzentren mit Hilfe von Flüssigkeitskühlung zurückgewonnen und durch Brennstoffzellen auf Temperaturen gebracht werden, die für die Versorgung der Fernwärme in Luleå geeignet sind.</p> <p>Das Demonstrationsprojekt sieht ein KWK-Konzept vor, das auf der Integration von Brennstoffzellen beruht. Die Brennstoffzellen (Antrieb mit Wasserstoff oder Biogas) sollen Gleichstrom und Wärme erzeugen. Durch das Vorhaben sollen fossile Brennstoffe eingespart, Wärme rückgewonnen und der Anteil erneuerbarer Energien in der Fernwärme und -kälte erhöht werden.</p>
<p><b>Wirkung:</b></p> <p>Substitution von fossil erzeugter Wärme, Nutzung erneuerbarer Energieträger.</p>

Quelle: wedistrict, 2023

Tabelle 10: Abwärmennutzung für Frankfurter Wohnquartier, Frankfurt a.M.

<b>Initiator:</b> Energieversorger Mainova AG, der Rechenzentrumsbetreiber Telehouse Deutschland GmbH und der Projektentwickler Instone Real Estate
<b>Start:</b> geplant 2023
<p><b>Ansatz:</b></p> <p>In dem von der Mainova, der Telehouse und Instone Real Estate initiierten Vorhaben, soll das neu gebaute Frankfurter Wohnquartier Westville zu 60 % (Grundlast) mit Abwärme aus einem benachbarten Rechenzentrum versorgt werden. Der zusätzlich erforderliche Wärmebedarf soll aus dem Fernwärmenetz der Stadt gedeckt werden. Für die Nutzung der Abwärme sollen zwei Großwärmepumpen genutzt werden, die die Temperatur der Abwärme von ca. 30°C auf die Vorlauftemperatur von ca. 70°C im geplanten Wärmenetz anheben. Zudem sollen Pufferspeicher und eine Steuerung des Netzes integriert werden.</p>
<p><b>Wirkung:</b></p> <p>Nutzung von mind. 2.400 MWh/a aus Abwärme und daraus resultierenden Einsparungen von 400 tCO<sub>2</sub>/a durch den Ersatz fossiler Brennstoffe.</p>

Quelle: Mainova, 2021

Abbildung 6: Geplantes Wohnquartier Westville in Frankfurt a.M.



Quelle: Mainova, 2023

Tabelle 11: Open District Heating Bahnhof Thule/Stockholm, Schweden

**Initiator:** Stockholm Exergi AB (ehemals Fortum)

**Start:** 2014

**Anwendung:**

Open District Heating ist eine Initiative des Stockholmer Energieanbieters Stockholm Exergi, der sich auf ressourceneffiziente Fernwärme- sowie Kälteversorgungs-lösungen spezialisiert hat. Open District Heating richtet sich Anbietende und Abnehmende von Abwärme (z.B. Rechenzentren, Supermärkte, verarbeitende Betriebe, etc.), die über einen offenen Marktplatz Wärme handeln.

Ein Beispiel für einen solchen Handel ist die Wärmelieferung des Partners Bahnhof Thule, Betreiber eines großen Rechenzentrums in Stockholm, an das Wärmenetz von Stockholm Exergi. Über drei gestufte Wärmepumpen wird die entstehende Wärme des Rechenzentrums in das Fernwärmenetz eingespeist. Das Konzept ist besonders lohnenswert bei Außentemperaturen von unter 7°C. Die Preise bzw. finanziellen Gewinne sind abhängig von der Nachfrage, welche im Winter höher ist. Das Projekt versorgt rund 1050 Apartments mit Wärme.

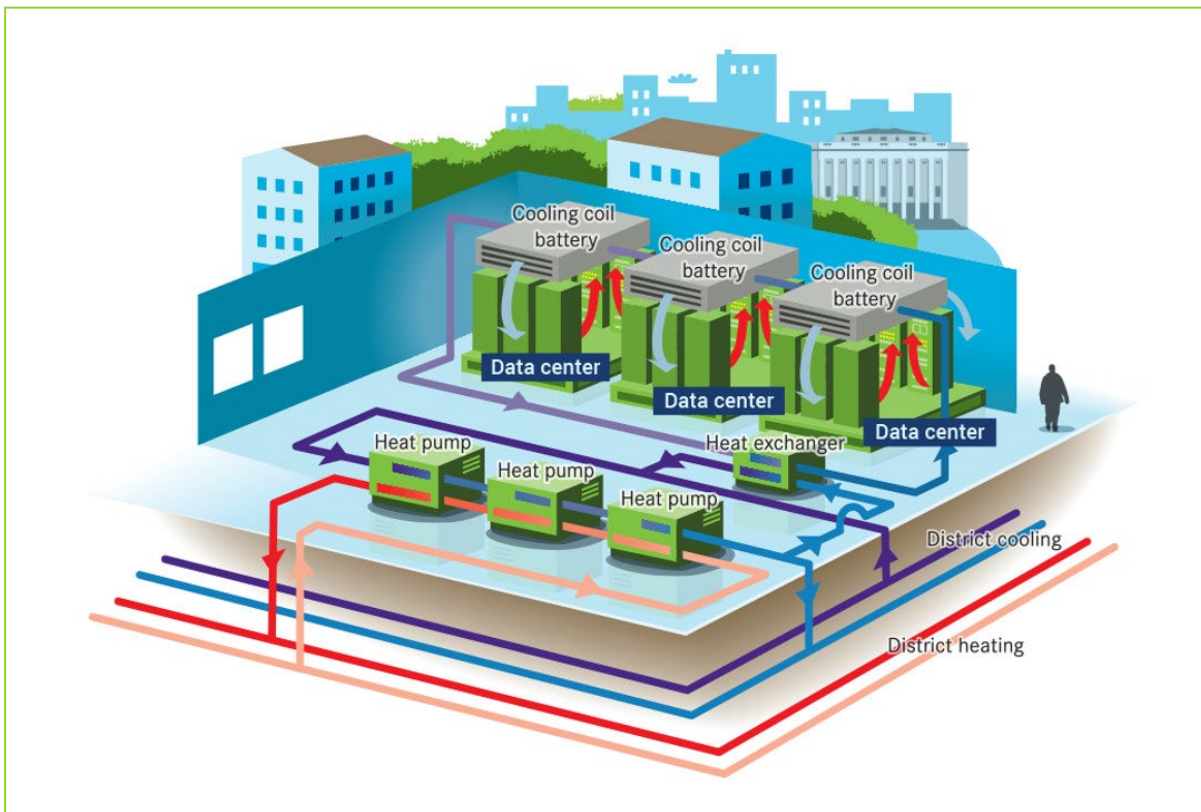
**Wirkung:**

Durch die Wärmepumpen kommt es zu einer Kältekapazität von 1200 kW und einer Wärmekapazität von 1600 kW. Durch die Abwärmenutzung werden Emissionen eingespart.

Quelle: Pisani, 2020



Abbildung 7: District Heating in Stockholm



Quelle: Pisani, 2020

## 2.3 Verbesserte Kühlsysteme

Tabelle 12: Equinix's FR6 Rechenzentrum in Frankfurt – Kühlung mit Hilfe von KI

**Initiator:** Equinix Inc. und etalytics GmbH (energy intelligence start-up)

**Start:** 2020

**Ansatz:**

Das Pilotprojekt der Partner Equinix und etalytics hat das Ziel, unter Zuhilfenahme von KI ein effizientes Kühlsystem für Rechenzentren zu entwickeln. Dies soll durch die gezielte Überwachung und Optimierung aller Energieflüsse in einem Rechenzentrum erfolgen. Hierfür wird ein KI-Algorithmus entwickelt, der durch Datensammlung und Analyse Vorhersagen für die Optimierung, Effizienzsteigerung und Flexibilisierung von Lasten ermöglichen soll. In die Analyse werden auch Wetterdaten einbezogen, um Kühlbedarfe zu prognostizieren.

**Wirkung:**

Senkung des Energieverbrauchs durch eine Optimierung der Kühlung. Schätzungen zufolge sollen Effizienzsteigerungen bei der Kühlung von bis zu 48 % möglich sein.

Quelle: Feidner & Panten, 2021

**Tabelle 13: Einsatz alternativer Kühlmittel bei den Stadtwerken Lübecke**

<b>Initiator:</b> Wilhelm Schriever GmbH in Kooperation, Peter Huber Kältemaschinenbau SE
<b>Start:</b> 2011
<b>Ansatz:</b> Um den Einsatz von synthetischen Kältemitteln zu reduzieren, wurden im Rechenzentrum der Stadtwerke Lübecke zwei Flüssigkeitskühler installiert, die eine Nennkälteleistung von insgesamt 36 kW besitzen und mit dem Kältemittel R 290 (Propan) betrieben werden. Die Flüssigkeitskühler besitzen auch einen geringen Energiebedarf.  Die potentielle Brennbarkeit von Propan wurde bei der Planung der Anlage berücksichtigt und die Kälteanlage außerhalb des Gebäudes installiert.
<b>Wirkung:</b> Die erzielte Energieeffizienz führt zu niedrigem Energiebedarf, der die vergleichsweise hohen Investitionskosten wieder ausgleicht (Amortisation nach ca. 3 - 5 Jahren), Reduktion des Einsatzes von synthetischen Kältemitteln.

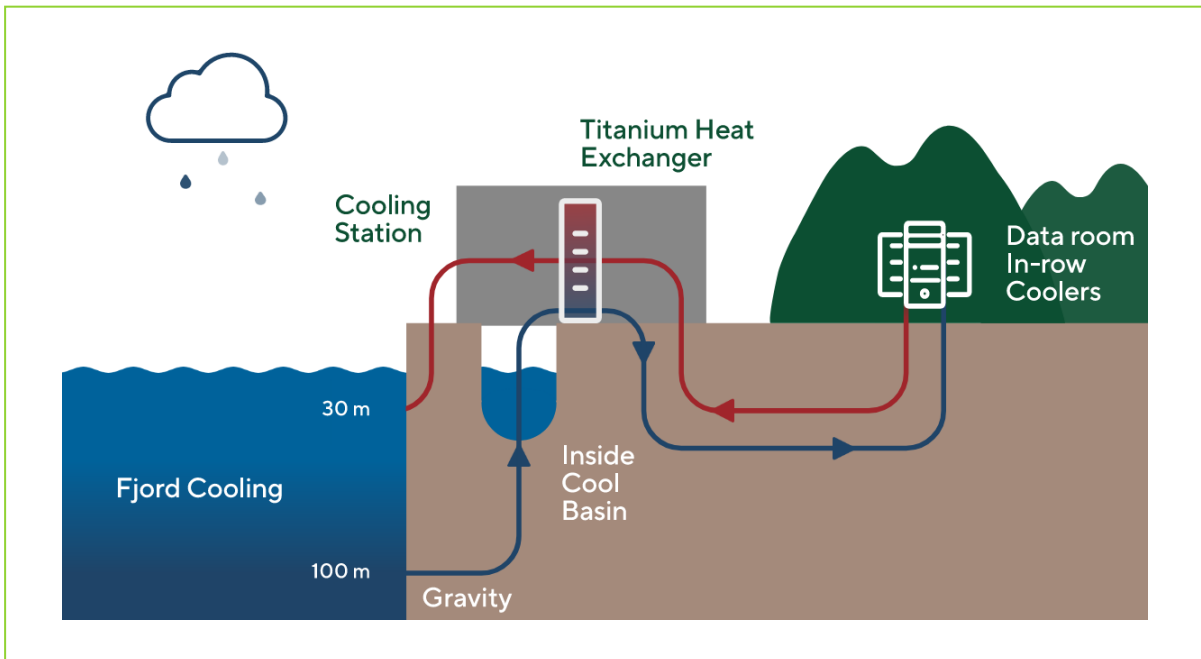
Quelle: De Graaf, 2017

**Tabelle 14: Kühlung von Rechenzentren mit Wasser aus Fjorden in Norwegen**

<b>Initiator:</b> Green Mountain AS
<b>Start:</b> laufend
<b>Ansatz:</b> Der norwegische Rechenzentrumsbetreiber Green Mountain betreibt seine Zentren bereits mit 100 % erneuerbaren Energien aus Wasserkraft. In drei Zentren (u.a. SVG1-Rennesøyvon) wurde zudem eine Kühlung mit Wasser aus den anliegenden Fjorden umgesetzt. Dafür wird 8°C kaltes Wasser zur Kühlung in einen Wärmetauscher geleitet und damit eine freie Kühlung der Rechenzentren betrieben. Der Einsatz von synthetischen Kältemitteln wie Fluorkohlenwasserstoffe (FKW) kann dadurch vermieden werden.
<b>Wirkung:</b> Einsparung von Emissionen durch Energieeffizienz und zusätzliche Kosteneinsparungen, Reduktion des Einsatzes von synthetischen Kältemitteln.

Quelle: Business Norway, 2023; Green Mountain, 2021

Abbildung 8: Prinzip der Fjordkühlung



Quelle: Business Norway, 2023; Green Mountain, 2021

Tabelle 15: Immersionskühlung in Quincy, Washington, USA

<b>Initiator:</b> Microsoft Corporation
<b>Start:</b> 2021
<b>Ansatz:</b> Das Unternehmen Microsoft erprobt Immersionskühlung an vereinzelt Racks in seinen Rechenzentren. Bei der eingesetzten Zwei-Phasen-Immersionskühlung werden die Racks in eine nicht-leitende Flüssigkeit getaucht, die verdampft, kondensiert und zurückgeleitet wird (geschlossener Kreislauf). Da die verwendete Flüssigkeit bei niedrigeren Temperaturen als Wasser siedet, wird die entstehende Wärme effizient abgeleitet. Der Kühlungseffekt ist somit effizienter als bei Luftkühlung.
<b>Wirkung:</b> Der reduzierte Energiebedarf führt zu einem verringerten Ausstoß an Emissionen. Der Wasserbedarf kann durch diese Kühlung ebenfalls reduziert werden. Immersionskühlung wird von Experten als vielversprechend eingestuft, ist allerdings noch nicht im großen Maßstab im Einsatz.

Quelle: Miller, 2021; Roach, 2021

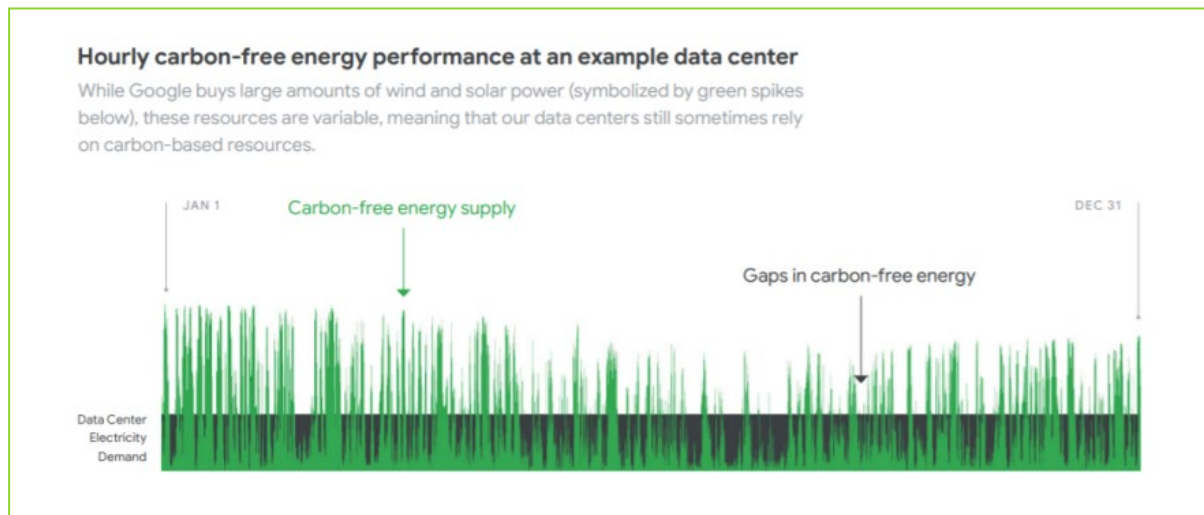
## 2.4 Erweiterte Ansätze der Energieerzeugung und -effizienz

Tabelle 16: Googles 24/7 Clean Energy Ansatz

<b>Initiator:</b> Google Llc.
<b>Start:</b> laufend 2022-2030
<p><b>Ansatz:</b>                  Google hat sich zum Ziel gesetzt, seine Rechenzentren bis zum Jahr 2030 zu 100 % mit Ökostrom zu versorgen. Dabei sollen stündlich bzw. halbstündlich erstellte Nachweise der EnergyTag Initiative sicherstellen, dass die Rechenzentren auch vollständig (24/7) mit Ökostrom betrieben werden. Google will mit der Versorgung sicherstellen, dass:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Ökostromerzeugung sowie der Verbrauch zeitgleich erfolgen.</li> <li>• Möglichst auf lokale Stromerzeugung (Strommarkt-Gebotszone) zurückgegriffen wird.</li> <li>• Möglichst neue Erzeuger bzw. Erzeugungskapazitäten genutzt werden.</li> </ul>
<p><b>Wirkung:</b>                  Reduktion der indirekten Emissionen durch den Energiebedarf im Betrieb (evtl. ist auch Resilienz ein Thema bei lokaler Versorgung).</p>

Quelle: Brown, 2023

Abbildung 9: Clean-Energy-Ansatz



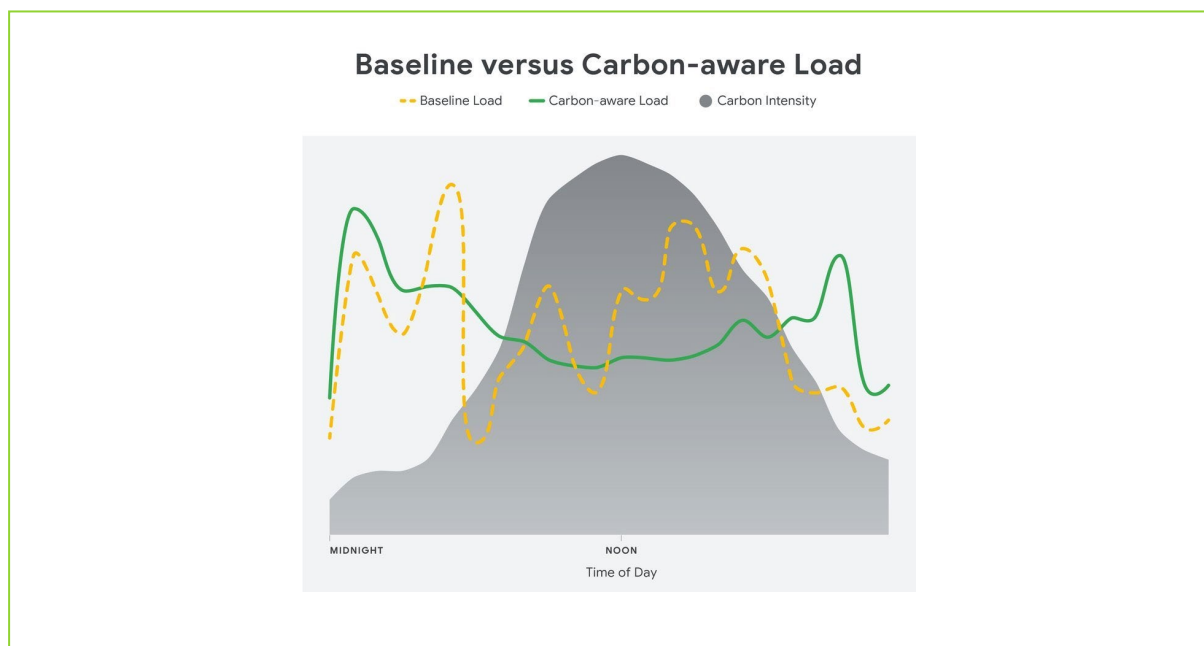
Quelle: Brown, 2023

Tabelle 17: Carbon Aware Computing

<b>Initiator:</b> Google Llc. sowie wissenschaftliche Partner
<b>Start:</b> laufend 2022 - 2030
<b>Ansatz:</b> Der von Google und wissenschaftlichen Partnern verfolgte Ansatz des Carbon Aware Computing zielt auf die Verschiebung der Rechenlast ab. Dabei solle die Last, wenn möglich in Regionen mit hoher Verfügbarkeit an Ökostrom verlagert werden. Dies geschieht z.B. für virtualisierte Rechenlast, welche nicht latenzkritisch ist (Webcrawler für Suchmaschinen, etc.).
<b>Wirkung:</b> Die Flexibilität im Stromsystem wird erhöht, was die Integration von erneuerbaren Energien erleichtert. Zum Verschieben werden Reservekapazitäten benötigt, welche vorgehalten werden müssen (negativ).

Quelle: Judge, 2020

Abbildung 10: Carbon Aware Computing – Lastenverschiebung



Quelle: Judge, 2020

### 3 Fazit und Übertragbarkeit auf Telekommunikationsnetze

Die in Kapitel 2 dargestellten Beispiele zeigen vielfältige technische Möglichkeiten auf, wie IT- und Cloudunternehmen versuchen, ihre Rechenzentren möglichst klimafreundlich zu gestalten und zu betreiben. Im Folgenden werden zu den Technologiebereichen Schlussfolgerungen gezogen und eine mögliche Übertragbarkeit auf Telekommunikationsnetze und Central Offices diskutiert.

#### Energieeffizienz

Für die Steigerung der Energieeffizienz bzw. zur Energieeinsparung existieren eine Vielzahl von Technologien, welche auf unterschiedlichen Ebenen eines Rechenzentrums (Stromversorgung/-umwandlung, Klimatisierung, IT-Hardware und Management, effiziente Anwendungen) ansetzen. Eine systematische Aufgliederung ist in Hintemann, Hinterholzer, Montevecchi, & Stickler (2020, S. 70ff) beschrieben. Der Aufbau und die Ausstattung eines Rechenzentrums unterscheidet sich je nach Betreibermodell (On-premise, Cloud, Hosting, etc.), Leistungsklasse, Verfügbarkeitsklasse und Anwendungsart (HPC/KI, Office, Social Media, etc.). Dementsprechend muss auch der Einsatz von Effizienztechnologien häufig im Einzelfall abgewogen und an das Rechenzentrum angepasst werden.

Aufgrund der ähnlichen Anforderungen an den Betrieb von Rechenzentren (definierte Umgebungsparameter wie Temperatur/Luftfeuchte, hohe Zuverlässigkeit, Zugangsschutz etc.) können viele der Technologien auch in Knotenpunkten/Central Offices der Telekommunikation eingesetzt werden. Stellt man die Energieeffizienz als Quotienten einer Nutzgröße (Speichervolumen, Rechenkapazität oder Traffic) im Verhältnis zum Energiebedarf dar, so unterliegt die Telekommunikationstechnik ähnlich wie das Equipment in Rechenzentren einer kontinuierlichen Effizienzsteigerung. Bei den absoluten Verbräuchen dagegen ergeben sich eher gleichbleibende oder sogar leicht steigende Energieverbräuche. Aufgrund der immer noch hohen Treibhausgasemissionen in der Stromerzeugung in Deutschland von ca. 369 Gramm CO<sub>2</sub> je Kilowattsunde (Umweltbundesamt, 2023) ist die Reduktion des Stromverbrauchs ein zentraler Beitrag zum Klimaschutz.

#### Abwärme

Bezogen auf die Anzahl der Rechenzentren in Deutschland steht die Nutzung von Abwärme noch am Anfang (Hintemann, Hinterholzer, Paul, et al., 2023). In den letzten Jahren sind jedoch vielversprechende technische Ansätze realisiert worden (siehe Kap. 2.2) und mehrere Forschungsprojekte beschäftigen sich mit der Nutzung hoher Abwärmertemperaturen sowie saisonaler Wärmespeicherung. Anders ist dies in Skandinavien, wo bereits seit vielen Jahren Rechenzentren in Wärmenetze eingebunden werden. Dies wird am Beispiel der Abwärmennutzung in Stockholm deutlich (siehe Kap. 2.2) und ist auch auf den systematischen Ausbau der Wärmenetze in Schweden sowie anderen skandinavischen Ländern in den letzten Jahrzehnten zurückzuführen (Clausen & Beucker, 2019a, 2019b).

Die Nutzbarkeit der Abwärme hängt neben dem IT-Equipment (und der Betriebstemperatur), der Kühlinfrastruktur und der Entfernung zum Abnehmer der Wärme (z.B. direkte Nutzung oder Einspeisung in ein Wärmenetz) ab. Auch das durch den Abnehmer benötigte Temperaturniveau und die Verfügbarkeit über das Jahr spielen eine Rolle. Während z.B. der Kühlbedarf von Rechenzentren im Sommer höher ist, wird genau dann oft weniger Abwärme benötigt. Die Art und der Umfang der Nutzung von Abwärme müssen daher je nach Standort individuell abgewogen werden.

In vielen Fällen muss die Abwärme von Rechenzentren für die Nutzung durch eine Wärmepumpe auf das erforderliche Niveau gebracht werden. Erst dann kann sie z.B. in Wärmenetzen mit höherer Temperatur (> 60°C) genutzt werden. Die Wärmepumpe kann sich sowohl im Eigentum eines Betreibers (z.B. der Central Offices), eines Contractors oder aber auch des Wärmenutzers (insb. bei Niedrigtemperaturwärmenetzen) befinden. Befindet sich das IT-Equipment im selben Gebäude, in dem die Wärme auch genutzt werden soll (wie beispielsweise in (Ladner, 2017)), können bereits Anschlussleistungen im ein- bis zweistelligen Kilowattbereich interessant sein. Für die wirtschaftliche Nutzung der Abwärme in kommunalen Wärmenetzen sind dagegen meist größere Anschlussleistungen und Wärmemengen erforderlich. Insbesondere mit Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung, z.B. Brennstoffzellen (siehe Beispiel von w.e.district in Luleå, Kap. 2.2) können sich ein erweitertes Anwendungsspektrum von Abwärme sowie ggf. höhere Temperaturniveaus ergeben.

Für die Abwärmenutzung aus Rechenzentren können sich die Ausgangsbedingungen in den nächsten Jahren deutlich verbessern. Grund hierfür ist v.a. die in der Novellierung des Gebäudeenergiegesetzes vorgesehene Verpflichtung zu kommunaler Wärmeplanung. Tritt diese wie geplant in Kraft, müssen Kommunen mit mehr als 100.000 Einwohnerinnen und Einwohnern bis 30. Juni 2026 und Gemeinden mit bis zu 10.000 Einwohnerinnen und Einwohnern bis spätestens 30. Juni 2028 ihre Wärmeplanung vorlegen.

Danach soll eine verpflichtende kommunale Wärmeplanung in den Kommunen der Bundesrepublik Deutschland bis spätestens 30. Juni 2028 eingeführt werden<sup>1</sup>. Die Frist kann in Abhängigkeit der Größe der Kommune auch deutlich früher liegen. Kommunen erhalten damit eine starke Motivation, sich mit der Planung ihrer Wärmeversorgung auseinanderzusetzen und bestehende sowie zukünftige Wärmequellen z.B. bei der Planung von Wärmenetzen zu berücksichtigen. Der Nutzung von Abwärme aus Rechenzentren kommt dabei zusätzlich entgegen, dass die Temperatur in den Netzen perspektivisch eher sinken wird (Niedertemperaturnetze).

Die Beispiele zeigen außerdem, dass eine weitere wichtige Maßnahme zur Emissionsreduktion in Rechenzentren der Versorgung mit Strom aus erneuerbaren Energien zukommt. Bei Rechenzentrumsbetreibern hat sich der Einkauf von erneuerbarem Strom von Ökostromanbietern oder grünen Power Purchase Agreements (GreenPPA's) auf jährlicher Basis etabliert. In den letzten Jahren wurde jedoch immer deutlicher, dass insbesondere die von Ökostromanbietenden gelieferte Energie nicht immer einen eindeutigen und ausreichenden Herkunftsnachweis besitzt. Vielmehr wird kritisiert, dass insbesondere der in Norwegen erzeugte Ökostrom doppelt verbucht wird, da er zum einen von norwegischen Unternehmen in Anspruch genommen und gleichzeitig als Zertifikat verkauft wird<sup>2</sup>.

Eine sichere Dekarbonisierung der Energiesysteme erfordert daher einen sicheren und eindeutigen Herkunftsnachweis für erneuerbaren Strom. Initiativen wie beispielsweise „EnergyTag“ (2022) versuchen, neue Standards für erneuerbaren Strom zu etablieren. Dadurch soll nachgewiesen werden, dass der erneuerbare Strom wirklich zu jeder Stunde eines Jahres aus regenerativen Quellen stammt und möglichst auch im lokalen Strommarktgebiet erzeugt wurde. Neben diesen neuen Angeboten steigt auch aufgrund der höheren Strompreise die Bedeutung der Eigenstromerzeugung an. Inwiefern sich Flächen auf Dächern sowie umliegende Freiflächen bei Rechenzentrums-Standorten für eine

---

<sup>1</sup> Siehe [www.vku.de/presse/pressemitteilungen/nach-einigung-im-streit-um-heizungsgesetz-verzahnung-von-geg-und-kommunaler-waermeplanung-macht-weg-fuer-ein-gutes-gesetz-frei/](http://www.vku.de/presse/pressemitteilungen/nach-einigung-im-streit-um-heizungsgesetz-verzahnung-von-geg-und-kommunaler-waermeplanung-macht-weg-fuer-ein-gutes-gesetz-frei/) (Abruf August 2023)

<sup>2</sup> Siehe z.B. [www.zeit.de/wirtschaft/2023-07/oekostrom-zertifikate-norwegen-klimabilanz](http://www.zeit.de/wirtschaft/2023-07/oekostrom-zertifikate-norwegen-klimabilanz) (Abruf August 2023)

Eigenerzeugung von regenerativem Strom eignen, ist bisher kaum untersucht. Gleiches gilt auch für Central Offices in der Telekommunikationsinfrastruktur.

### Zeitliche und räumliche Verschiebung von Stromverbrauch

Die zeitliche und räumliche Verschiebung von Stromverbrauch wird zunehmend im Bereich des Cloud Computings in Rechenzentren diskutiert. Dabei kommt neben physischen Stromspeichern und flexiblen Stromerzeugern (Dieselaggregate, Brennstoffzellen, etc.) auch die zeitweise Verlagerung von Rechenkapazitäten (z.B. in anderen Rechenzentren oder Regionen) oder der Verschiebung von Anwendungen in andere Tageszeiten mit möglichst erneuerbarem Strommix in Frage. Möglich sind solche Verlagerungen nur für Dienste, welche aufgrund von regulatorischen Vorgaben und Qualitätsanforderungen nicht an einen speziellen Ort oder die Nähe zum Endgerät gebunden sind (Datenschutz, Latenzen, etc.) bzw. im Falle der zeitlichen Verschiebung nicht unmittelbar benötigt werden (z.B. automatisierte Back-Up Dienste oder Webcrawler). In der Telekommunikationsinfrastruktur ist das wesentlich schwieriger. Zum einen werden Daten quasi immer mit Latenzen im Bereich von Millisekunden übertragen, zum anderen sind die Standorte insbesondere im Zugangsnetz durch die physischen Leitungen zum Endkunden vorgegeben. Im Bereich der Datennetze wird die räumliche Verlagerung von Kapazität eher im Bereich von überregionalen Kernnetzen diskutiert, wie z.B. in (Tabaeiaghdaei, Scherrer, Kwon, & Perrig, 2023).



## LITERATUR UND QUELLEN

- Amazon. (2023). Sustainability in the Cloud [Information on a page]. Abgerufen 30. Juni 2023, von Amazon Sustainability website: <https://sustainability.aboutamazon.com/environment/the-cloud>
- Brown, T. (2023). Carbon-free energy, every hour of every day. Abgerufen 16. April 2023, von <https://www.tu.berlin/en/about/profile/press-releases-news/2022/mai/carbon-free-energy-every-hour-of-every-day>
- Business Norway. (2023). Green Mountain’s carbon-neutral data centres have natural cooling [Blog-Post]. Abgerufen 30. Juni 2023, von Business Norway website: <https://businessnorway.com/solutions/green-mountain-carbon-neutral-data-centres-have-natural-cooling>
- Clausen, J., & Beucker, S. (2019a). *Verbreitung radikaler Systeminnovationen. Fallbeispiel Wärmeversorgung Dänemark*. Berlin: Borderstep Institut. Abgerufen von Borderstep Institut website: <https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2019/06/W%C3%A4rmeversorgung-Danemark-Go-19-6-2019.pdf>
- Clausen, J., & Beucker, S. (2019b). *Verbreitung radikaler Systeminnovationen. Fallbeispiel Wärmeversorgung Schweden*. Berlin.
- CNDPC. (2023). Climate Neutral Data Centre Pact – The Green Deal needs Green Infrastructure [Blog-Post]. Abgerufen 29. Juni 2023, von Climate Neutral Data Center website: <https://www.climateneutraldatacentre.net/>
- De Graaf, D. (2017). Natürliche Kältemittel: Was sonst? Abgerufen 23. November 2017, von <http://www.lanline.de/natuerliche-kaeltemittel-was-sonst/>
- EcoDataCenter. (2023a). EcoDataCenter 1 | A large-scale data center site for HPC, Colocation and Wholesale in Falun, Sweden. [Information on a page]. Abgerufen 29. Juni 2023, von EcoDataCenter website: <https://ecodatacenter.tech/data-center/ecodatacenter-1>
- EcoDataCenter. (2023b, April 20). A circular focus in our biggest project yet: EcoDataCenter 2 [Information on a page]. Abgerufen 30. Juni 2023, von EcoDataCenter website: <https://ecodatacenter.tech/data-center/ecodatacenter-2>
- EnergyTag. (2022). Abgerufen 11. August 2023, von <https://energytag.org/>
- Feidner, J.-P., & Panten, N. (2021, September). Case Study: Data Center Efficiency – How AI Can Help Optimize Data Center Cooling. *Dotmagazine – Joining the Dots in the Internet Industry*. Abgerufen von <https://www.dotmagazine.online/issues/sustainable-transformation/digital-waste-heat/how-ai-optimizes-data-center-cooling>
- Green Mountain. (2021, Juni 28). Highly energy-efficient data center cooling in a cold and wet climate [Information on a page]. Abgerufen 6. Juli 2023, von Green Mountain Data Center website: <https://greenmountain.no/data-centers/cooling/>
- Hintemann, R. (2017). *Rechenzentren in Deutschland: Eine Studie zur Darstellung der wirtschaftlichen Bedeutung und der Wettbewerbssituation. Update 2017*. Berlin: Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit. Abgerufen von Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit website: <https://www.bitkom.org/noindex/Publikationen/2017/Studien/2017/Kurzstudie-RZ-Markt-Bitkom-final-20-11-2017.pdf>
- Hintemann, R., Beucker, S., Hinterholzer, S., Grothey, S., Niebel, T., Axenbeck, J., & Sack, R. (2022). *Dena Analyse: Neue Energiebedarfe digitaler Technologien—Untersuchung von Schlüsseltechnologien für die zukünftige Entwicklung des IKT-bedingten Energiebedarfs*. Berlin: Borderstep Institut, Leibniz-Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung, Deutsche Energieagentur.

- Hintemann, R., Hinterholzer, S., & Merz, I. (2023). *Rechenzentren in Bayern: Ökologische Nachhaltigkeit – zukunftsgerichtete Standortpolitik. Im Auftrag der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN im Bayerischen Landtag*. Berlin: Borderstep Institut.
- Hintemann, R., Hinterholzer, S., Montevecchi, F., & Stickler, T. (2020). *Energy-efficient Cloud Computing Technologies and Policies for an Eco-friendly Cloud Market*. Berlin, Vienna: Borderstep Institute & Environment Agency Austria. Abgerufen von Borderstep Institute & Environment Agency Austria website: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/bf276684-32bd-11eb-b27b-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-183168542>
- Hintemann, R., Hinterholzer, S., Paul, A., & Völzel, C. (2023). RZ-Abwärmenutzung praktikabel machen. *iX*, (8), 100.
- Hintemann, R., Hinterholzer, S., & Seibel, H. (2023). *Rechenzentren in Deutschland: Aktuelle Marktentwicklungen (Update 2023)*. Berlin: Bitkom e.V. Abgerufen von Bitkom e.V. website: <https://www.bitkom.org/Bitkom/Publikationen/Studie-Rechenzentren-in-Deutschland>
- ISO. (2022). *ISO/IEC 30134-9:2022 Information technology—Data centres key performance indicators—Part 9: Water usage effectiveness (WUE) (Nr. ISO/IEC 30134-9:2022; S. 19)*. ISO. Abgerufen von ISO website: <https://www.iso.org/standard/77692.html>
- Judge, P. (2020, April 24). Google tests shifting data center loads to renewable energy peaks. Abgerufen 30. Juni 2023, von DCD website: <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/google-tests-shifting-data-center-loads-renewable-energy-peaks/>
- Kilgore, E. (2023, Januar 27). Green hydrogen powered, off-grid data center-as-a-service is a world first [Blog-Post]. Abgerufen 13. Juli 2023, von Hydrogen Fuel News website: <https://www.hydrogenfuelnews.com/green-hydrogen-data-center-ecl/8557028/>
- Ladner, R. (2017, Dezember 10). Cloud&Heat eröffnet grünes Rechenzentrum in der ehemaligen EZB in Frankfurt. Abgerufen 11. August 2023, von Netzpalaver | #CloudComputing #Datacenter #Cybercrime #Telekommunikation #Infrastruktur website: <https://netzpalaver.de/2017/12/10/cloudheat-eroeffnet-ihr-gruenes-rechenzentrum-in-der-ehemaligen-ezb-in-frankfurt/>
- Larson, R. (2021, Juni 4). EcoDataCenter – a Climate-positive Data Centre [Blog-Post]. Abgerufen 29. Juni 2023, von Swedish Cleantech website: <https://swedishcleantech.com/news/resources-and-environment/ecodatacenter-a-climate-positive-data-centre/>
- Maincubes. (2021, Juli 20). Maincubes eröffnet 2023 nachhaltiges Rechenzentrum im Rhein-Main-Gebiet. Abgerufen 8. Dezember 2021, von Maincubes website: <https://www.maincubes.com/pressemitteilungen/maincubes-eroeffnet-2023-zweites-nachhaltiges-rechenzentrum-im-rhein-main-gebiet/>
- Mainova. (2021, Juli 8). Innovatives Wärmekonzept für Frankfurter Wohnquartier „Westville“ vorgestellt [Pressemeldung]. Abgerufen 30. Juni 2023, von Mainova website: <https://www.mainova.de/de/ihre-mainova/presse-und-politik/pressemitteilungen/2021/innovatives-waermekonzept-fuer-frankfurter-wohnquartier-westville-vorgestellt-76622>
- Marshall, P. (2022). *STATE OF THE EDGE 2022—The New Open "Edge"*. online: State of the edge. Abgerufen von State of the edge website: <https://stateoftheedge.com/reports/state-of-the-edge-report-2022/>
- Miller, R. (2021, April). Microsoft's Belady on Immersion: „Air Cooling is Not Enough“ [Blog-Post]. Abgerufen 7. Juli 2023, von Data Center Frontier website: <https://www.datacenterfrontier.com/cooling/article/11428289/microsoft8217s-belady-on-immersion-8216air-cooling-is-not-enough8217>

## KLIMANEUTRALE RECHENZENTREN – BEST PRACTICES

- NorthC Datacenters. (2023). Nachhaltige Datacenter: CO2-neutral bis 2030 [Information on a page]. Abgerufen 30. Juni 2023, von NorthC Datacenters website: <https://www.northcdatacenters.com/ch-de/ueber-uns/nachhaltige-rechenzentren/>
- Pisani, E. (2020, Juli 31). Excess heat from datacentres: Let your Insta-selfies heat your home - [Blog-Post]. Abgerufen 30. Juni 2023, von Celsius website: <https://celsiuscity.eu/waste-heat-from-datacentres/>
- Roach, J. (2021, April 6). To cool datacenter servers, Microsoft turns to boiling liquid [Blog-Post]. Abgerufen 7. Juli 2023, von Microsoft website: <https://news.microsoft.com/source/features/innovation/datacenter-liquid-cooling/>
- Tabaeiaghdaei, S., Scherrer, S., Kwon, J., & Perrig, A. (2023). *Carbon-Aware Global Routing in Path-Aware Networks*. Gehalten auf der The 14th ACM International Conference on Future Energy Systems (e-Energy '23), Zürich. Zürich: ETH Zürich. Abgerufen von [https://netsec.ethz.ch/publications/papers/green\\_routing2023.pdf](https://netsec.ethz.ch/publications/papers/green_routing2023.pdf)
- Then24. (2022, Mai 26). The new 70 MW data center in Cáceres will be the first in Spain supplied by two photovoltaic plants [Blog-Post]. Abgerufen 30. Juni 2023, von Then24 website: <https://then24.com/2022/05/26/the-new-70-mw-data-center-in-caceres-will-be-the-first-in-spain-supplied-by-two-photovoltaic-plants/>
- Umweltbundesamt. (2023). Strom- und Wärmeversorgung in Zahlen [Text]. Abgerufen 11. August 2023, von Umweltbundesamt website: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energieversorgung/strom-waermeversorgung-in-zahlen>
- Vattenfall. (2021, Dezember 3). Vattenfall launches pilot data centre project to offer sustainable compute capacity [Pressemeldung]. Abgerufen 30. Juni 2023, von Vattenfall website: <https://news.cision.com/vattenfall/r/vattenfall-launches-pilot-data-centre-project-to-offer-sustainable-compute-capacity,c3465635>
- Vida Rozite, Emi Bertoli, & Brendan Reidenbach. (2023). Data centres & networks. Abgerufen 16. August 2023, von IEA website: <https://www.iea.org/energy-system/buildings/data-centres-and-data-transmission-networks>
- wedistrict. (2023). Wedistrict demonstration case Luleå. Abgerufen 8. April 2023, von Wedistrict website: <https://www.wedistrict.eu/demonstration-cases/lulea/>
- Wheatley, M. (2023, Januar 24). Data center-as-a-service startup ECL exits stealth with \$7M in seed funding [Blog-Post]. Abgerufen 13. Juli 2023, von SiliconANGLE website: <https://silicon-angle.com/2023/01/24/data-center-service-startup-ecl-exits-stealth-7m-seed-funding/>