

MASTERARBEIT

# Klimaneutrale Rechenzentren: Mit welchen Maßnahmen erreichen Rechenzentren Klimaneutralität bis zum Jahr 2030?

Eine Bewertung von flexibler Eigenproduktion erneuerbarer Energie und  
Abwärmenutzung in Rechenzentren

Betreuer:  
Prof. Dr. Frank Witte, HWR Berlin  
Dr. Ralph Hintemann, Borderstep Institut

Tim Grothey  
m tim.grothey@gmail.com  
m grothey@borderstep.de

# Wie erreichen Rechenzentren Klimaneutralität bis zum Jahr 2030?

## Das Ziel dieser Arbeit ist

- eine anspruchsvolle, der fortschreitenden Klimakrise angepassten, Definition des klimaneutralen Betriebs von Rechenzentren herauszuarbeiten;
- die Analyse der Herausforderungen und Lösungsansätze für den klimaneutralen Betrieb in Deutschland;
- die Bewertung von Lösungsansätze, mit denen Rechenzentren nach diesen Anforderungen klimaneutral betrieben werden können:
  - Flexible Eigenproduktion von erneuerbarem Strom
  - Abwärmenutzung

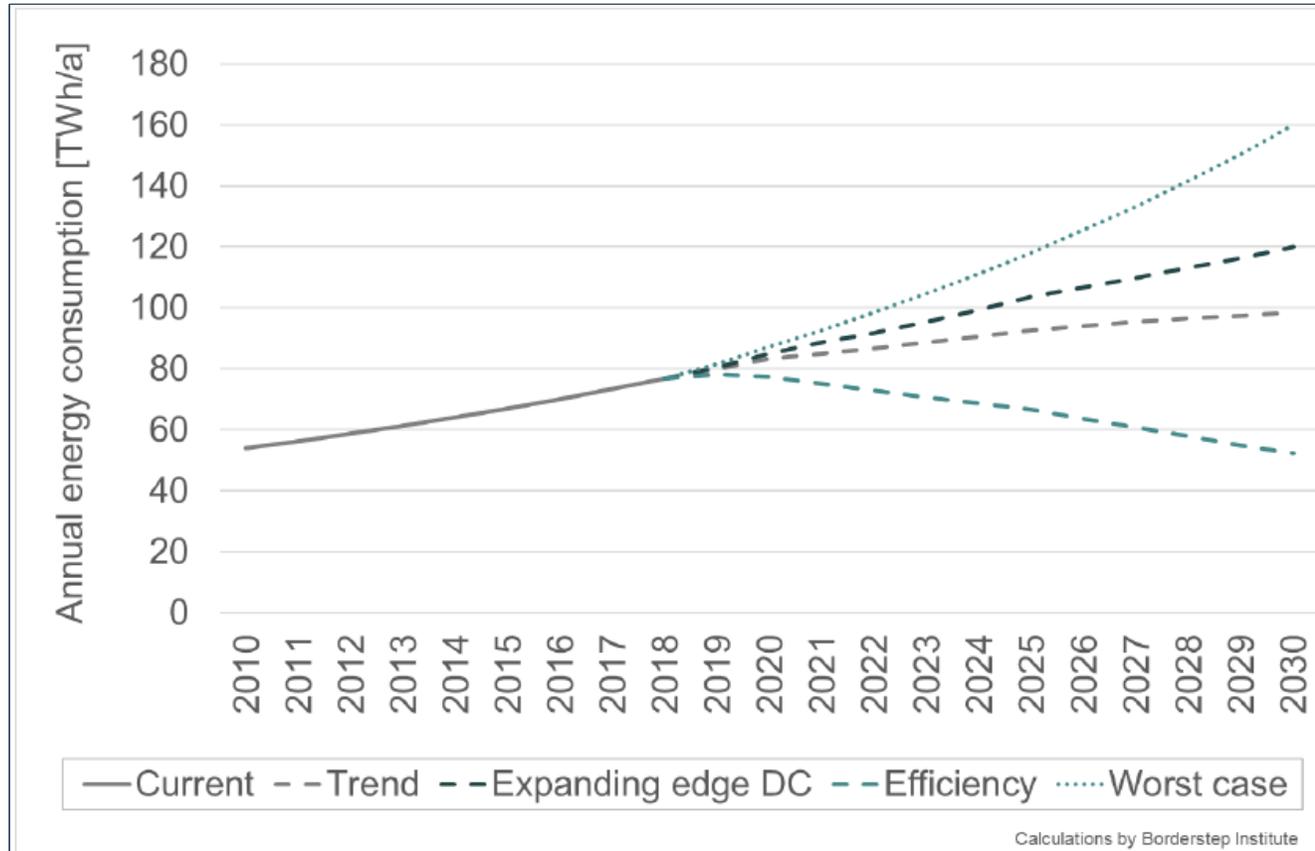
## Methodik & Vorgehen

- Literaturrecherche
  - Hintergrund
  - Konzept „Klimaneutralität“
  - Herausforderungen
- Berechnung von CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten
  - Flexible Eigenproduktion erneuerbarer Energie
  - Abwärmenutzung

**Fokus:**  
Betrieb von RZ  
ca. 90% der  
THG-Emissionen

# Der Energieverbrauch von Rechenzentren stieg um 55% seit 2010

Große Effizienzgewinne in RZ-Design sowie bei der IT-Hardware



Quelle: Hintemann (2021)

Calculations by Borderstep Institute

- RZ verbrauchten 2020 in Deutschland 16 TWh Strom (3,4% des deutschen Stromverbrauchs)
- Anteil der IT steigt
- Nachfrage nach RZ-Leistung steigt exponentiell
- Effizienz der RZ-Infrastruktur und IT-Hardware verbessert

**Prognose:** Bei steigender Anzahl neuer Rechenzentren wird der Energieverbrauch weiter ansteigen, jedoch moderat!

**THG-Emissionen von RZ:** In Europa weitere Reduktion um 30% bis 2030 – in Deutschland kaum Veränderung aufgrund des späten Kohleausstiegs.

# Was ist “Klimaneutralität” und welche Kritik gibt es?

Wirkung und Rolle von Klimakompensationen stehen in großer Kritik

## Klimaneutralität = Netto-Null-Emissionen

... **bilanziell** keine zusätzlichen THG in der Atmosphäre

... bedeutet **nicht**, dass keine THG emittiert werden

## Kritik

- Ungenaue Nutzung des Begriffs in der Öffentlichkeit, Modewort, Marketingzwecke
- Kompensationsmaßnahmen sind risikoreich und schaffen es nicht, Transformationsanreize zu setzen
- Preiswertes „Greenwashing“, konventionelles Wirtschaften wird nicht verändert
- Gefahr, dass sich vermeidbare Emissionen weiter verfestigen
- CCS nicht marktreif, also eher theoretische Zukunftstechnologie
- IPCC / Verfassungsgericht: Weiteres Vertagen der Emissionsreduktion ist gefährlich und ungerecht

**Im Kontext der sich zuspitzenden Klimakrise benötigt es eine anspruchsvollere Definition der Klimaneutralität!**



## ANSPRUCHSVOLLE DEFINITION „KLIMANEUTRALITÄT“

**Klimaneutralität besteht sobald alle THG-Emissionen reduziert sind und der betrachtete Prozess für keine THG-Emissionen verantwortlich gemacht werden kann.**

**Kompensationsmaßnahmen sind lediglich temporär für den Ausgleich der nicht reduzierbaren Emissionen zugelassen.**

## Konsequenterweise:



**Die Qualität eines klimaneutralen Systems wird an den direkten Emissionsreduktionen gemessen.**



**Viele derzeitig „klimaneutrale“ Prozesse, Unternehmen oder auch Rechenzentren sind hiernach nicht klimaneutral, weil sie weiterhin große Mengen vermeidbare Emissionen zulassen.**

# Ein klimaneutraler Betrieb von Rechenzentren muss nun mehrere Herausforderungen lösen



2030 ist **nicht ausreichend erneuerbarer Strom** im Netz in Deutschland – im besten Fall 65%  
→ Kein klimaneutraler Betrieb aus dem Netz möglich!



**PV und Wind sind sehr volatil**, während Rechenzentren eher unflexibel sind und eine konstante Last haben, **Lastmanagement ist daher derzeit keine Lösung!**



Einfache **Grünstromverträge mit Herkunftsnachweisen** sind keine ausreichende Alternative!



**Dieselgeneratoren** der USV sowie **klimaschädliche Kältemittel** führen zu weiteren Emissionen im Betrieb der Rechenzentren!

# Ein klimaneutraler Betrieb von Rechenzentren ist also gegeben, wenn ...

Diese Anforderungen müssen erfüllt werden, um Rechenzentren klimaneutral zu betreiben

- das Rechenzentrum mit einer **zeit - und mengengleichen erneuerbaren Stromversorgung** betrieben wird,
- **erneuerbare Kraftwerke als Notstromsysteme** eingesetzt werden,
- ausschließlich **klimafreundliche Kältemittel** in der Klimatisierung Anwendung finden,
- sowie die **Abwärme zur Dekarbonisierung in anderen Sektoren** genutzt wird, um nicht vermiedene Restemissionen des Rechenzentrumsbetriebs auszugleichen.

Betrachtete  
Lösungsansätze:



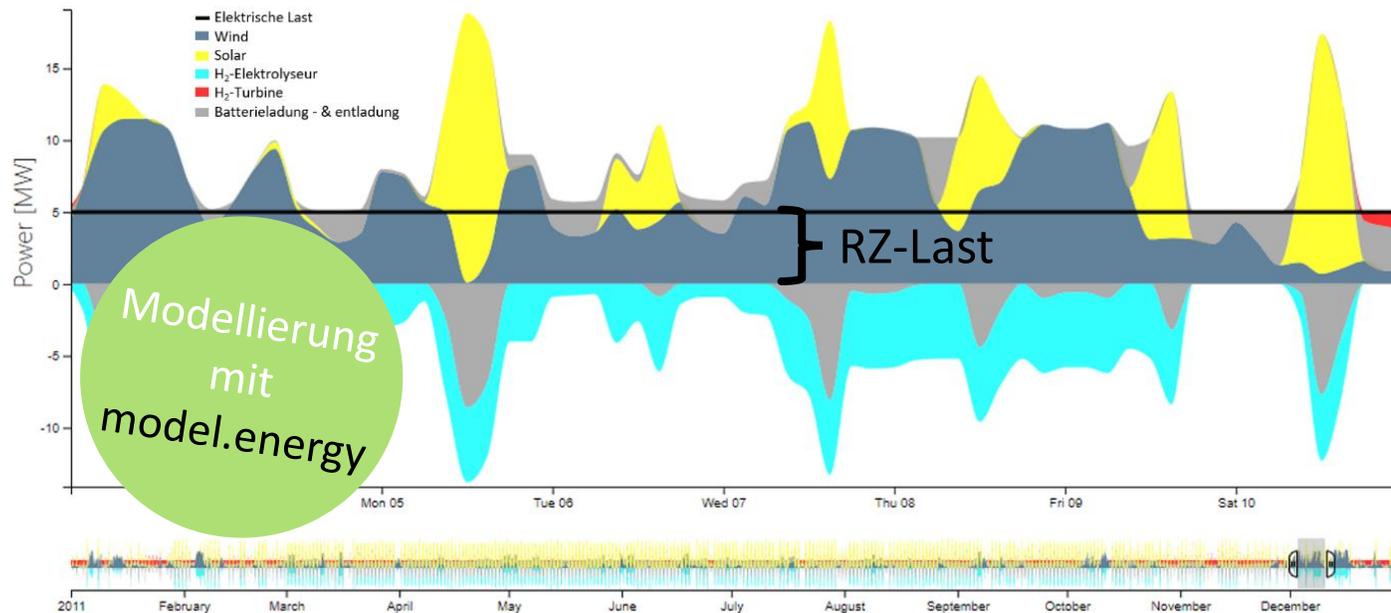
**Flexible Eigenproduktion von erneuerbaren Energien**



**Abwärmennutzung**

# Die Lösung ist ein Mix aus verschiedenen Erzeugungs- und Speichertechnologien

Stromerzeugung, -Speicherung und USV werden kombiniert, um zeitgleiche Versorgung zu erreichen



## Vorgeschlagene Lösung:

- eine extra für das Rechenzentrum optimierte Stromversorgung, aus PV- und Windparks sowie einer Wasserstoff- und Batteriespeicherung, die genau den Bedarf des Rechenzentrums deckt, inkl. USV

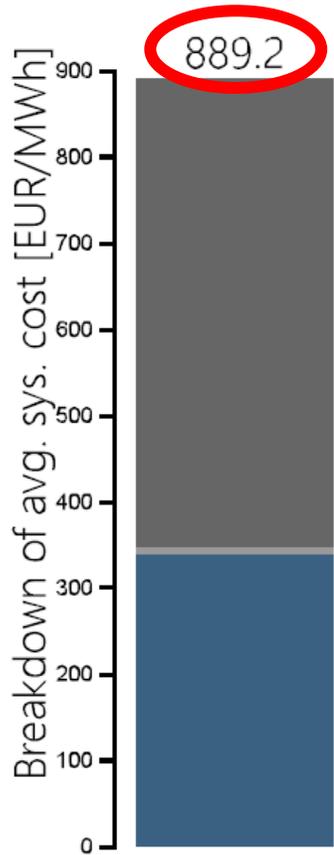


## → „Flexible erneuerbare Eigenversorgung“

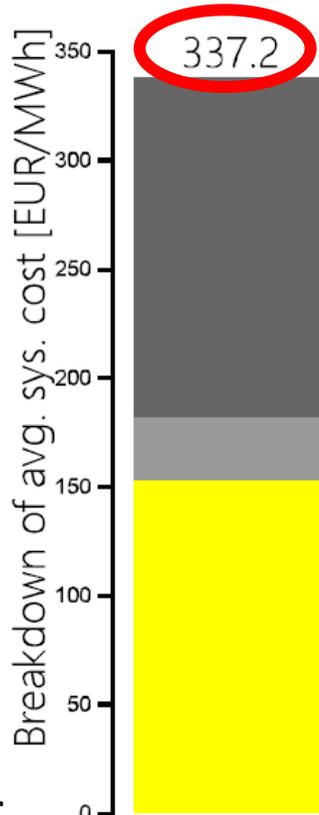
- Power-Purchase-Agreements (PPA) ermöglichen den Aufbau der nötigen Erzeugungs- und Speicherkapazitäten

# Modellierung zeigt die Wechselwirkungen der Technologien

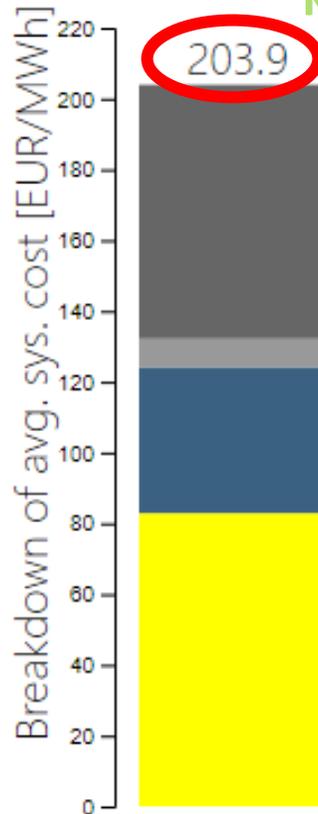
Kombination führt zu deutlichen Kostensenkungen



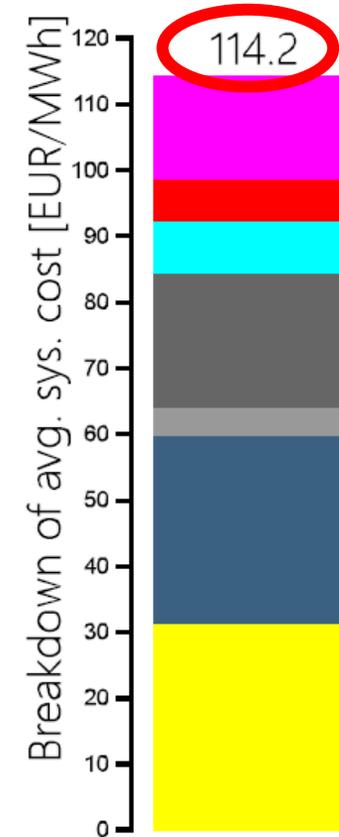
Nur Wind + Batteriespeicher



Nur PV + Batteriespeicher



PV + Wind + Batteriespeicher



PV + Wind + H<sub>2</sub>-Speicher + H<sub>2</sub>-Turbine + Batteriespeicher

Modellierung mit model.energy

# Rechenzentren produzieren kontinuierlich Wärme, die derzeit meist an die Umwelt abgegeben wird

50 % des deutschen Endenergieverbrauchs ist Wärme, davon nur 15 % aus erneuerbaren Quellen

## Serverkühlung und Kälteerzeugung

- Wärme muss von den Servern auf ein Transportmedium übertragen und aus dem RZ herausgeführt werden
- Heute meistens Kühlung mit Luft

## Nutzung der Abwärme

- Klimatisierung von angrenzenden Gebäuden
- Einspeisung in Nah- und Fernwärmenetze
- Gewächshäuser, Schwimmbäder

Ziel: Verdrängung fossiler Wärmeerzeuger!

## Hindernisse

- **Temperaturniveau** der Abluft von ca. 30°C  
**Besser:** Heißwasserkühlung (bis zu 70°C)
- Nur **9%** des Wärmeverbrauchs in Deutschland über Wärmenetze
- Hohe **Investitions- und weitere Betriebskosten**
- Keine **Abnehmer** vorhanden

In FFM könnten dortige RZ ca. 10 % der gesamten Wärme bereitstellen!



**Vielversprechend: Abwärme aus einem heißwassergekühlten Rechenzentrum in ein Wärmenetz einspeisen, Temperaturanpassung mit Hilfe einer Wärmepumpe.**

# Ein Bewertungsmaß für die Kosteneffizienz von Klimaschutzmaßnahmen

## Methodik: Statische CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten

| Referenzszenario                               | Klimaschutzszenario  |
|--|--|
| Neubau eines klassischen RZ                    | Neubau eines klimaneutralen RZ   |
| Konstante Last: 5 MW                           | Konstante Last: 5 MW   |
| Stromversorgung mit deutschem Netzstrom        | Vollständig zeit- und mengengleich erneuerbare Stromversorgung inkl. USV |
| Diesel-USV                                     | s.o.   |
| Keine Abwärmenutzung, konventionelle Fernwärme | Abwärmenutzung im Fernwärmenetz mit Wärmepumpe                           |

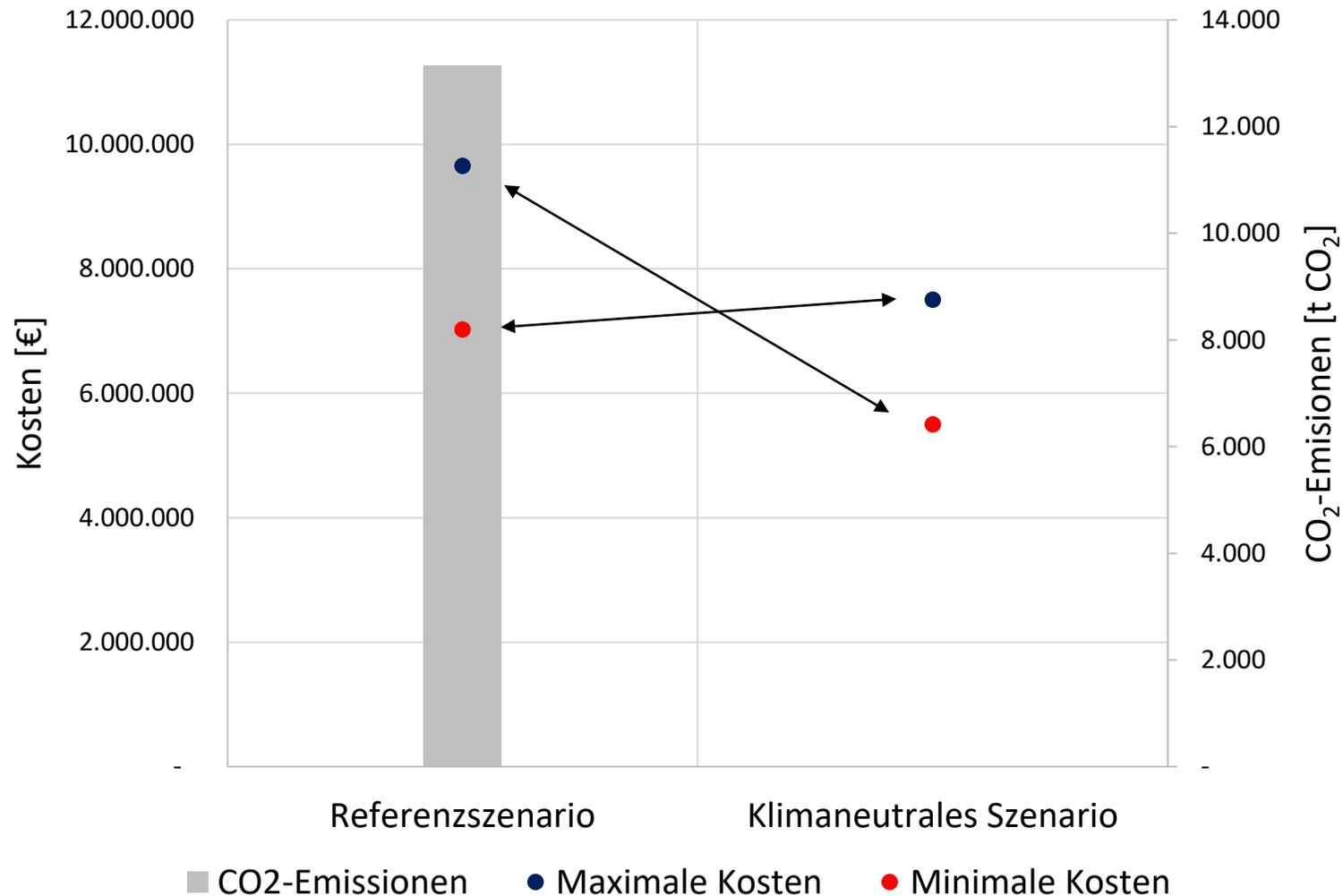
### Vorgehen

- Definition der Szenarien
- Berechnung der Emissionen beider Szenarien
- Berechnung der Kosten beider Szenarien
- Es wird die geringste sowie größte mögliche Kostendifferenz gebildet und durch die Emissionseinsparung geteilt.

$$CO_2 - Vermeidungskosten = \frac{k_{klima} - k_{ref}}{e_{ref} - e_{klima}} = \frac{\Delta k}{\Delta e} \quad \left[ \frac{\text{€}}{t \text{ CO}_2} \right]$$

$k_{klima}$ =Kosten des Klimaschutzszenarios;  $k_{ref}$ =Kosten des Referenzszenarios;  $\Delta k$ =Kostendifferenz  
 $e_{klima}$ =Emissionen des Klimaschutzszenarios;  $e_{ref}$ =Emissionen des Referenzszenarios;  $\Delta e$ =Emissionseinsparung

## Minimale und maximale Kosten sowie CO<sub>2</sub>-Emissionen der Szenarien



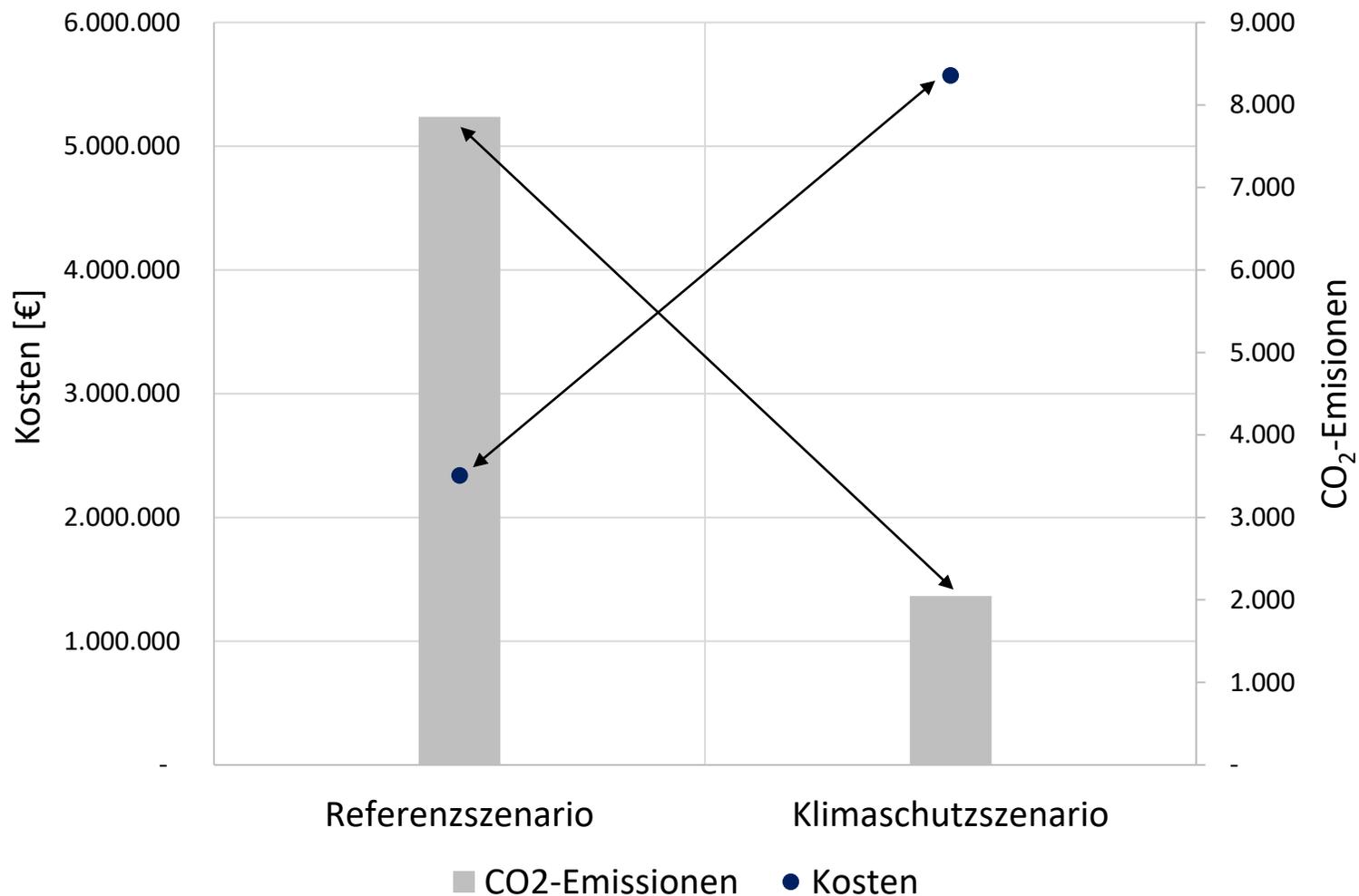
## Die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten einer klimaneutralen Stromversorgung:

**Minimal: -315 €/t CO<sub>2</sub>**

**Maximal: 36 €/t CO<sub>2</sub>**

» **Vorsicht:** Annahmen für Kosten aus Mitte 2021

# Kosten sowie CO<sub>2</sub>-Emissionen der Szenarien für die Abwärmenutzung



**Die CO<sub>2</sub>-  
Vermeidungskosten  
einer Abwärmenutzung  
im Fernwärmenetz:**

**556 €/t CO<sub>2</sub>**

» **Vorsicht:** Annahmen für Kosten aus Mitte 2021

# Fazit (1)

- Rechenzentren haben das **Potential eines erheblichen Energie- und Ressourcenverbrauchs**, jedoch auch **Chancen von umfangreicher Reduktion von THG-Emissionen**.
- Aktuelle Bemühungen können einem **anspruchsvollen Verständnis von Klimaneutralität noch nicht standhalten**.
- Rechenzentren **können vor allem dann klimaneutral betrieben** werden, wenn sie **zeit- und mengengleich** erneuerbaren Strom verbrauchen.
- Durch die Bereitstellung der Abwärme können Rechenzentren zu einer **Reduktion von THG-Emissionen im Wärmesektor** beitragen.
  - Es bleibt jedoch offen, ob RZ-Branche oder Wärmenetzbetreiber dies anstoßen muss!?
  - Die Möglichkeit einer Abwärmenutzung ist stark vom Standort des Rechenzentrums abhängig und wird ein hohes Maß an Kooperation erfordern.
  - Mit einer Nutzung der gesamten Abwärme könnten nur 2/3 der Emissionen des RZ-Betriebs ausgeglichen werden.

## Fazit (2)

- CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten:
  - Mit **geringem Kostenaufwand bzw. sogar finanziellem Vorteil** werden 90 % der THG-Emissionen eines Rechenzentrums mit einer klimaneutralen Stromversorgung reduziert.
  - Abwärmennutzung ist **eher kostenintensiv**.
- Die Vermeidungskosten sind stark abhängig von der Kostenentwicklung der Technologien, zukünftigen Strompreisen und den politischen Rahmenbedingungen.
- Es sind immer **hohe Investitionen** notwendig, kleinere Betreiber werden solche Investitionen nicht stemmen können, politische Förderung notwendig, Demonstrationsprojekte / Pilotanlagen.
- RZ-Betreiber sollten frühzeitig Strategien zur Umstellung auf Klimaneutralität entwerfen, um das Ziel zu erreichen.