

H₂-Innovationslabor II

TRANSFORMATION UND NACHHALTIGKEIT IM
RECHENZENTRUM

Projektbericht



H₂-INNOVATIONSLABOR II

Projektbericht

Im August 2026

Felix Zimmermann

Timo Stöhr

Nils Maisel

Andre Leippi

Fraunhofer-Institut für
Arbeitswirtschaft und
Organisation IAO

Sabrina Pletz

Hochschule Heilbronn

Sven Christian

DHBW Heilbronn

Kim Krüger

Technische
Universität München

Gefördert durch die Dieter Schwarz Stiftung gemeinnützige GmbH

Management Summary

Künstliche Intelligenz (KI) ist heute ein zentraler Treiber wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Entwicklungen. In Industrie, Dienstleistung und Alltagsanwendungen steigt der Einsatz rasant – von automatisierten Produktionsprozessen bis zu datengetriebenen Geschäftsmodellen. Dieser Trend geht mit massiv wachsenden Anforderungen an die IT-Infrastruktur einher, insbesondere an Rechenzentren (RZ), die für Entwicklung, Training und Betrieb von KI-Anwendungen unverzichtbar sind. Die steigende Rechenleistung erfordert leistungsfähigere Hardware, komplexere Kühlsysteme und stabile Energieversorgung – mit deutlichen Auswirkungen auf den Energie- und Leistungsbedarf.

Die Region Heilbronn-Franken – mit dem Innovationspark Artificial Intelligence (IPAI), großen Wirtschaftsakteuren wie der Schwarz-Gruppe und dem Forschungs- und Bildungsökosystem am Bildungscampus – entwickelt sich zu einem wichtigen Standort für KI-Forschung und -Anwendung. Damit entstehen Chancen für Wertschöpfung und Kompetenzaufbau, aber auch steigende Anforderungen an Energieinfrastruktur und Nachhaltigkeit. Um diesen Aufschwung zu unterstützen und im Allgemeinen Rechenzentren nachhaltiger zu gestalten wurde der Fokus des H2-Innovationslabors II an den Entwicklungen in der Region orientiert.

Der vorliegende Bericht im Rahmen des Projekts »H₂-Innovationslabor II« beschreibt Technologien, Betriebskonzepte und Energieoptionen für nachhaltige Rechenzentren. Ziel ist es, Energieeffizienz, Versorgungssicherheit und Klimaschutz in Einklang zu bringen. Die Untersuchung kombiniert Technologieanalyse, Stakeholder-Befragungen und simulationsgestützte Bewertung von Betriebskonzepten.

Kernergebnisse:

- Kühlung als Effizienzhebel: Kühlung ist der größte nicht-IT-bezogene Energieverbraucher im RZ. Effiziente Verfahren wie Flüssigkeitskühlung oder höhere Betriebstemperaturen reduzieren den Strombedarf und erhöhen die Möglichkeiten der Abwärmenutzung.
- Abwärmenutzung ist entscheidend: Die Nutzung von Serverabwärme – z. B. für Nahwärmenetze – kann Emissionen deutlich senken. Ihr Potenzial hängt stark von Standortfaktoren und vorhandener Infrastruktur ab.
- Notstrom mit Wasserstoff: Dieselfgeneratoren dominieren die Notstromversorgung. Wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen bieten eine emissionsarme Alternative, erfordern jedoch Lösungen für Speicher, Sicherheit und Logistik. Obwohl kein ausschlaggebender Faktor, ist nachhaltiger Brennstoff in diesem Sektor ein Schritt in Richtung Dekarbonisierung.
- Technologiekombinationen statt Einzelmaßnahmen: Die im Projekt entwickelten Simulationen zeigen, dass die besten ökologischen und ökonomischen Ergebnisse durch eine intelligente Kombination aus PV, Batteriespeichern, Abwärmenutzung und ggf. Wasserstoff erzielt werden. Einzeltechnologien bringen dagegen oft nur begrenzte Verbesserungen.
- Wirtschaftliche Bewertung: Simulation eines Rechenzentrums mit Spitzenlast 3,8 MW ergab für Konzepte ohne Abwärmenutzung oder Eigenstromerzeugung hohe Kosten (> 1,3 Mio. €/a) und Emissionen (> 1.000 t CO₂/a). Kombinationen mit PV, Speichern und Abwärmenutzung erreichen teils weniger als 500 t CO₂/a bei moderaten Mehrkosten. Wasserstoff allein ist nicht kosteneffizient, verbessert aber in Hybridkonzepten die Resilienz.
- Flexibilität als Kostenvorteil: Die Kopplung von Eigenstromerzeugung, Speichern und dynamischen Strompreisen kann die Betriebskosten signifikant senken.

Nachhaltige Rechenzentren erfordern damit eine strategische Verzahnung von Technologie- und Energiekonzepten. Für KI-Standorte wie Heilbronn-Franken ist dies entschei-

dend, um wirtschaftliches Wachstum mit Klimazielen zu vereinbaren. Die Ergebnisse zeigen, dass durch ganzheitliche Planung sowohl Betriebskosten als auch Emissionen deutlich reduziert werden können. Am einfachsten kann dies bei dem Aufbau eines Ökosystems geschehen. Die Region Heilbronn-Franken kann somit Vorreiter für KI- und Rechenzentrumsinfrastruktur mit hoher Energieeffizienz werden.

Diese Arbeit gibt einen Überblick über die aktuelle Situation und das Umfeld von Rechenzentren sowie die relevanten Rahmenbedingungen und den Status quo. Darauf aufbauend werden Nachhaltigkeitspotenziale insbesondere in den Bereichen Technologie, Energiekonzepte und Logistik identifiziert. Ergänzend werden Simulationen durchgeführt, in denen definierte Szenarien auf Basis realer Lastgänge analysiert werden. Abschließend erfolgt eine Bewertung der verschiedenen Methoden und Technologien zur Verbesserung der Nachhaltigkeit im Rechenzentrum. Der Ausblick skizziert die zu erwartende zukünftige Entwicklung von Rechenzentren und benennt weitere relevante Forschungs- und Anwendungsfelder. Dabei wurde herausgestellt, dass das Potenzial für den Einsatz von Wasserstoff gering ist, jedoch große Potenziale im Bereich der Kühlmethoden und Abwärmenutzung existieren.

1	Einleitung.....	6
2	Übersicht Rechenzentrum	7
2.1	Aufbau Rechenzentrum	7
2.2	Stakeholderübersicht.....	8
3	Technologie und Nachhaltigkeitspotenziale im Rechenzentrum	12
3.1	Technologiebewertung	12
3.2	Methoden zur Verbesserung der Nachhaltigkeit im Rechenzentrum.....	19
4	Wasserstoff im Rechenzentrum.....	21
4.1	Potenzialbewertung für den Einsatz von Wasserstoff	21
4.2	Energiekonzept und Logistik	24
5	Simulation des Rechenzentrumökosystems	31
5.1	Methodik und Untersuchungskonzepte	32
5.2	Inputdaten	34
5.3	Ergebnisse der Untersuchungskonzepte	38
5.4	Fazit der Simulationsergebnisse	42
6	Zusammenfassung und Diskussion	43
7	Anhang	45
8	Literatur	51
9	Impressum	53

Rechenzentren stehen aufgrund ihres hohen und tendenziell steigenden Energiebedarfs mit im Fokus der Nachhaltigkeitsbetrachtung in Deutschland. Speziell durch den vermehrten Einsatz von KI, die einen steigenden Bedarf an Rechenleistung und damit Energie nach sich zieht, steigt der Energieverbrauch in diesem Sektor immer weiter an [1]. Passende Konzepte zu dessen Eindämmung sind notwendig. Auch, da die vermehrt volatile Stromerzeugungsmethoden mit Photovoltaik und Windkraft, eine Flexibilisierung des Stromverbrauchs erfordert.

Aufgrund einiger Vorprojekte im Bereich Wasserstoff wird dieser als Möglichkeit in Betracht gezogen, einen Anteil an der Dekarbonisierung im Rechenzentrum zu leisten. Der Zielbereich ist die Notstromanwendung, da hier die Eigenschaften von Wasserstoff wie nachhaltige Erzeugbarkeit, gute Stromrückgewinnung und Lagerbarkeit gefragt sind. Neben diesem Aspekt sind die Kühlung und die Abwärmenutzung zentrale Faktoren bei der nachhaltigen Gestaltung von Rechenzentren. Daher sollte das Ziel sein, diese möglichst energiearm zu gestalten und so effizient, dass die Kühlung auf möglichst hohem Energieniveau erfolgen kann. Ziel sollte eine ausreichende Kühlleistung, bei gleichzeitig guter Energieausnutzung sein. Neben dem Notstrombereich und den zugehörigen infrastrukturellen und logistischen Themen beschäftigen wir uns in dieser Arbeit mit dem Einsatz neuer Technologien, die perspektivisch den Energiebedarf in Rechenzentren deutlich reduzieren können. Im Fokus liegen hierbei die für den Betrieb notwendigen Kühleinrichtungen. Da in der Informationstechnologie die eingesetzte Energie aufgrund des Einsatzes von Luftkühlung nahezu komplett in Wärme auf niedrigem Temperaturniveau umgewandelt wird, sind innovative Möglichkeiten der Kühlung gefragt [2].

In dieser Studie wird zuerst eine Grundlage für das allgemeine Verständnis von Rechenzentren geschaffen. Dafür wurden Stakeholder- und Technologieanalysen des Status Quo vorgenommen und mit Interviews untermauert. Der Einsatz von Wasserstoff im Notstrombereich wurde ausführlich analysiert und bewertet. In Gesprächen mit Betreibern wurden die hier identifizierten Möglichkeiten durchgesprochen und validiert. Potenziale sind primär im Bereich der Dekarbonisierung und vor allem auch der Sekundärnutzung zu erwarten. Eine zentrale Anforderung ist die Verfügbarkeit von Platz, entweder zur Lagerung oder zum Aufbau der benötigten Anlagen, um beispielsweise Wasserstoff in gebundener Form wieder nutzbar machen zu können. Ein größerer Einfluss auf die Effizienz und Nachhaltigkeit wird von Betreibern dem Betrieb der Hardware und vor allem auch der eingesetzten Kühlung zugeschrieben. Daher wurde die Aufgabenstellung hin zu möglichen Kühltechnologien für Rechenzentren erweitert. Dabei wurden, aus Sicht der Betreiber, relevante Technologien für die Verbesserung der Energieeffizienz und Nachhaltigkeit betrachtet. Diese flossen in eine Nachhaltigkeitsbetrachtung mit ein, wobei das Ziel war, die effizientesten Stellschrauben, also die Bereiche mit größtem Einfluss auf die Nachhaltigkeit, zu identifizieren und darauf aufbauend Konzepte zur Steigerung der Nachhaltigkeit zu erstellen. Dies war die Grundlage für die darauffolgende Simulation von ausgewählten Fällen und Einsatzszenarien, um die identifizierten Fälle zu untermauern.

Zu Beginn wird in diesem Kapitel ein ausführliches Verständnis von Rechenzentren geschaffen. Dazu wurden Daten aus verschiedenen Quellen wie zum Beispiel Interviews, Studien und anderen Veröffentlichungen gesammelt und in Form einer Technologieanalyse, einer Stakeholderanalyse und einer Umfeldanalyse verarbeitet. Diese werden in einen Gesamtkontext gestellt und dienen in den folgenden Kapiteln als Basis für die weitere Bewertung und Entwicklung der Konzepte für nachhaltige Rechenzentren. Das Ergebnis ist der Status Quo des Energiesystems von Rechenzentren, welcher als Basis für die technologische Weiterentwicklung und die Potenzialanalyse für den Einsatz von Wasserstoff und innovativer Kühlmethode genutzt werden kann.

Leitfragen des Kapitels:

- **Wie ist ein Rechenzentrum aufgebaut und welche Rolle spielt die Energieeffizienz im Betrieb?**

Ein Rechenzentrum gliedert sich in IT-Betriebsbereich, technische Gebäudeausrüstung und Zugangsschleusen; da im Betrieb große Energiemengen in Wärme umgewandelt werden, sind Kühlung, Abwärmenutzung und ein niedriger PUE-Wert (Power Usage Effectiveness: Gesamter Energieverbrauch/Energieverbrauch IT-Hardware) zentrale Effizienzaspekte.

- **Welche Stakeholder sind im Transformationsprozess hin zu nachhaltigen, wasserstoffbasierten Rechenzentren beteiligt und welche Interessen verfolgen sie?**

Die relevanten Stakeholder reichen von Betreibern, Politik, Energieversorgern und Hardwareherstellern bis hin zu Investoren, Kommunen, Umweltverbänden, IT-Dienstleistern und Zertifizierungsstellen, die jeweils eigene technologische, regulatorische, wirtschaftliche oder ökologische Interessen in den Transformationsprozess einbringen.

2.1 Aufbau Rechenzentrum

Ein Rechenzentrum besteht generell aus drei Kernbereichen. Der erste, innerste Bereich ist der IT-Betriebsbereich, in dem die Server, Speicher und weitere Geräte in Racks untergebracht sind. Hier können je nachdem auch Plätze für externe Hardware vorgesehen werden (Co-Location). Der zweite Bereich ist die technische Gebäudeausrüstung. Diese umfasst Kühlsysteme, Notstromversorgung, Sicherheitstechnik wie Löschsysteme und die allgemeine Energieversorgung. Zuletzt gibt es die Schleusen zur Zugangskontrolle. Diese Einrichtungen dienen dem Schutz der im Rechenzentrum verarbeiteten oder gespeicherten Daten [3]. In folgender Grafik (Abbildung 1) ist der allgemeine Aufbau eines Rechenzentrums vereinfacht dargestellt:

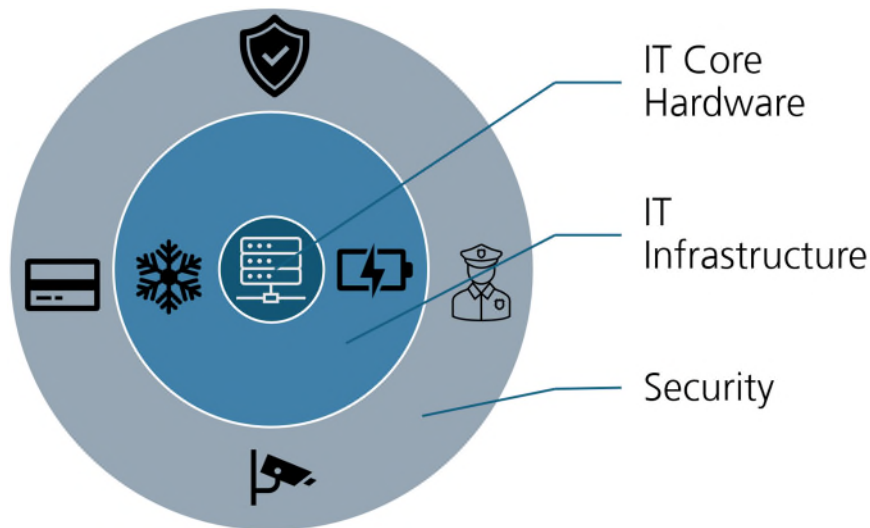


Abbildung 1: Schalenmodell des Aufbaus eines Rechenzentrums (Eigene Darstellung auf Basis von Interviews und [3])

Ein Rechenzentrum ist eine wichtige Einrichtung, die viele moderne Technologien zur energieintensiven Datenverarbeitung und zur Entwicklung bzw. dem Betrieb von KI und smarten Services nutzt. Die eingesetzte Energie wird daher durch die elektrische Nutzung primär in Wärme umgewandelt. Daher spielt die Kühlung neben dem Betrieb der IT-Hardware die größte Rolle. Dadurch ergibt sich jedoch auch eine besondere Notwendigkeit, energetisch effizienter zu werden und bessere Kühlmethoden und Abwärmenutzungsstrategien in Betracht zu ziehen. Zur Messung dieser Effizienz wird die »Power Usage Effectiveness« (PUE) herangezogen. Diese ist in der Norm »EN 50600-4-2: Einrichtungen und Infrastrukturen von Rechenzentren, Teil 4-2: Kennzahl zur eingesetzten Energie« festgelegt und wird folgendermaßen definiert:

$$PUE = \frac{\text{Gesamtenergieverbrauch}}{\text{Energieverbrauch IT}}$$

Ist der Wert größer als 1, wird mehr Energie bezogen als für die reine IT (Server, Storage, Netzwerkequipment, Telekommunikationsequipment, Notbeleuchtung, Unterbrechungsfreie Stromversorgung) nötig ist. Je größer der Wert, desto schlechter wird das Rechenzentrum eingeschätzt. Stand 2024 lag der weltweite Schnitt des PUE-Werts über alle Rechenzentren bei 1,56 [4]. Das Ziel ist es, einen Wert möglichst nahe bei der 1 zu bekommen, so dass möglichst keine Energie unnötig verbraucht werden muss. Dabei wirken sich Faktoren wie Abwärmenutzung positiv aus, wohingegen Kühlung gegen die Umgebung negativ bewertet werden. Im aktuellen Stand werden in den Rechenzentren zumeist dieselbetriebene Notstromaggregate verwendet und bei der Kühlung im Low-performance-Bereich Luftkühlung im Kaltgang-Prinzip. Gerade die Kühlung ist nicht sehr effektiv und erzeugt laut Interviews mit den Betreibern Abwärme bis ca. 24 °C. Um diese abseits von Niedrigtemperaturanwendungen wie beispielsweise in Gärtnereien verwenden zu können müssten aufwändige Maßnahmen wie der Einsatz von Wärmepumpen beschlossen werden.

2.2 Stakeholderübersicht

Im Rahmen der Stakeholder- und Umfeldanalyse wurde ein methodisch fundierter Multi-Methods-Ansatz gewählt, der sowohl sekundäranalytische als auch primärdatengestützte Verfahren kombiniert. Neben einer umfassenden Literatur- und Internetrecher-

che wurden semistrukturierte Experteninterviews durchgeführt. Die Interviews erfolgten mit Fachpersonen aus zwei großen deutschen Rechenzentrumsbetreibern bzw. -infrastruktur Organisationen geführt, die unterschiedliche Perspektiven entlang der Phasen Planung, Bau und Betrieb von Rechenzentren abdecken.

Ziel der Interviews war es, ein vertieftes Verständnis für die spezifischen Interessen, Einflussmöglichkeiten und Herausforderungen beim Einsatz von Wasserstofftechnologien in Rechenzentren zu erlangen. Die leitfadengestützten Gespräche behandelten insbesondere technologische Anforderungen, regulatorische Rahmenbedingungen, wirtschaftliche Anreizstrukturen und ökologische Zielsetzungen. Der für die Interviews verwendete Leitfaden ist in Anhang 3 dargestellt. Die Auswahl der Interviewpartner erfolgte gezielt auf Basis ihrer Relevanz im Transformationsprozess. Hierzu zählten unter anderem Vertreter von Rechenzentrumsbetreibern, Technologieherstellern, sowie kommunalen Institutionen. Die Auswertung der Interviews erfolgte mittels qualitativer Inhaltsanalyse. Dabei wurden zentrale Aussagen paraphrasiert, kodiert und thematisch kategorisiert, um übergreifende Muster und Divergenzen zwischen den Stakeholderperspektiven herauszuarbeiten. Ergänzend wurden zentrale Aussagen in Beziehung zur Literatur gesetzt, um Hypothesen zu validieren und neue Zusammenhänge zu identifizieren. Diese systematische Analyse diente als zentrale Grundlage für die Ableitung der Stakeholderinteressen sowie der identifizierten Chancen und Herausforderungen beim Aufbau nachhaltiger, wasserstoffbasierter Rechenzentren.



Abbildung 2: Übersicht der Stakeholdergruppen

Betreiber von Rechenzentren

Betreiber von Rechenzentren sind zentrale Akteure diesem Transformationsprozess. Sie entwickeln und steuern die Rechenzentren, legen technologische Implementierungen fest und bestimmen die Nachhaltigkeitsstrategie. Ihr Hauptinteresse liegt in der Kostenoptimierung, der Effizienzsteigerung und der Einhaltung von Umweltauflagen. Zudem ist eine zuverlässige Energieversorgung essenziell für ihren Geschäftsbetrieb. Nachhaltigkeit kann durch Investitionen in erneuerbare Energien, energieeffiziente Hardware und Wasserstoffinfrastruktur erreicht werden. Beispiele für Betreiber sind STACKIT, Cloud & Heat, Heidelberg iT, Google und AWS (Amazon).

Politik und Gesetzgeber

Die politische Ebene spielt eine entscheidende Rolle bei der Schaffung geeigneter Rahmenbedingungen. Regierungen und Gesetzgeber setzen regulatorische Standards und bieten Subventionen oder Steuererleichterungen an, um nachhaltige Technologien zu fördern. Ihr zentrales Anliegen ist die Reduktion von Treibhausgasemissionen sowie die Umsetzung internationaler Klimaziele. Durch gezielte gesetzliche Maßnahmen können sie die Entwicklung nachhaltiger Infrastrukturen beschleunigen und sicherstellen, dass Rechenzentren den neuesten Umweltstandards entsprechen. Vertreter dieser Kategorie sind üblicherweise Kommunalpolitiker, Landratsämter oder auch die Bundesregierung.

Energieversorger und Wasserstofflieferanten

Energieversorger und Unternehmen, die Wasserstoff bereitstellen, sind essenzielle Partner für den nachhaltigen Betrieb von Rechenzentren. Sie ermöglichen die Integration erneuerbarer Energien und stellen Wasserstoff als emissionsfreie Energiequelle zur Verfügung. Ihr wirtschaftliches Interesse besteht in der Erschließung neuer Märkte und der Optimierung der Wirtschaftlichkeit ihrer Produktionsmethoden. Indem sie grünen Wasserstoff bereitstellen und innovative Speicher- und Transportlösungen entwickeln, leisten sie einen wesentlichen Beitrag zur Nachhaltigkeit der Branche. Vertreter sind hier die großen Energieversorger, Stadtwerke und Gaslieferanten wie Air Liquide, Linde Gas oder lokale Lieferanten wie die Sauerstoffwerk Friedrich Guttroff GmbH.

Hardwarehersteller

Hardwarehersteller beeinflussen die Nachhaltigkeit von Rechenzentren maßgeblich durch die Entwicklung energieeffizienter IT-Infrastruktur. Ihr Fokus liegt darauf, Wettbewerbsvorteile durch nachhaltige Produkte zu erzielen und neue Märkte zu erschließen. Durch den Einsatz recycelbarer Materialien, langlebiger Komponenten und energieeffizienter Technologien können sie erheblich zur Reduktion des ökologischen Fußabdrucks beitragen. Hardware wird von Unternehmen wie Infineon, AMD, Broadcom.

Investoren und Finanzinstitutionen

Die Finanzierung nachhaltiger Projekte hängt maßgeblich von Investoren und Finanzinstitutionen ab. Wie sowohl die Literatur als auch die geführten Experteninterviews zeigen, gewinnen ESG-Kriterien (Environment, Social, Governance) zunehmend an Bedeutung für Investitionsentscheidungen im Rechenzentrumsumfeld [5]. Nachhaltige Rechenzentren können durch grüne Finanzierungsoptionen, nachhaltige Anleihen und gezielte Investitionen gefördert werden. Finanzinstitute erwarten von Unternehmen transparente Nachhaltigkeitsstrategien und belastbare Umweltkennzahlen, um ihre Investitionsentscheidungen zu stützen. Beispiele hierfür sind Banken, Kreditgeber und öffentliche Förderer wie beispielsweise die L-Bank, oder die NOW GmbH.

Kommunen und Anwohner

Kommunen und Anwohner sind direkt von der Errichtung neuer Rechenzentren betroffen. Sie können maßgeblich zur Akzeptanz oder Ablehnung solcher Projekte beitragen. Ihre Hauptanliegen sind die Minimierung von Umweltbelastungen, wie Lärm und Emissionen, sowie die Schaffung neuer Arbeitsplätze. Betreiber müssen frühzeitig in den

Dialog mit der lokalen Bevölkerung treten und umweltfreundliche Lösungen entwickeln, um die Akzeptanz für ihre Vorhaben zu erhöhen. Besonders die Integration in lokale Wärme- und Energienetze kann positive Synergieeffekte schaffen. Dabei sind lokale Akteure, die das Umfeld kennen, wichtige Erfolgsfaktoren für die Umsetzung einer Wasserstoffwirtschaft.

Umweltverbände und NGOs

Umweltverbände und Nichtregierungsorganisationen wie beispielsweise Greenpeace, WWF oder BUND, übernehmen eine kritische Kontrollfunktion, indem sie nachhaltige Maßnahmen fordern und auf deren Umsetzung achten. Sie haben ein großes Interesse an Transparenz und setzen sich für strengere Umweltauflagen ein. Ihre Expertise kann Betreibern helfen, nachhaltige Strategien weiterzuentwickeln und glaubwürdige Umweltstandards zu erfüllen.

IT-Dienstleister und Cloud-Anbieter

IT-Dienstleister und Cloud-Anbieter wie STACKIT, Azure oder AWS spielen eine wichtige Rolle bei der Optimierung der Infrastruktur in Rechenzentren. Sie entwickeln Softwarelösungen zur effizienteren Ressourcennutzung und tragen durch Virtualisierungstechnologien dazu bei, den Energieverbrauch zu senken. Moderne Lastenverteilungsmethoden und KI-gestützte Steuerungssysteme ermöglichen eine nachhaltigere Nutzung der vorhandenen Kapazitäten.

Zertifizierungsstellen

Zertifizierungsstellen wie DEKRA und TÜV überwachen die Nachhaltigkeitsmaßnahmen von Rechenzentren und vergeben Umweltzertifikate. Sie gewährleisten, dass Betreiber sich an internationale Standards halten und steigern so die Glaubwürdigkeit nachhaltiger Maßnahmen. Zertifizierungen wie ISO 14001 oder der Energy Star-Standard für Rechenzentren setzen klare Anforderungen an Umweltmanagementsysteme und Energieeffizienz.

Im Folgenden werden technologische und logistische Aspekte im Zuge der Nachhaltigkeitsgestaltung von Rechenzentren durchgeführt. Im Zentrum stehen dabei Technologien im Allgemeinen und eine Logistik, die auf die Verwendung von Wasserstoff im Notstrombereich ausgelegt ist. Zusätzlich werden vielversprechende Technologien beim vielversprechenden Bereich der Kühlung behandelt und bewertet.

Leitfragen des Kapitels:

- **Wie erfolgt die Bewertung technologischer Bereiche im Hinblick auf ihre Relevanz für die Energieeffizienz und Nachhaltigkeit von Rechenzentren?**

Die Bewertung erfolgt zweistufig, indem zunächst die energieverbrauchenden Bereiche identifiziert und anschließend die relevantesten davon auf den Einsatz von Wasserstoff und technische Innovationen geprüft werden. Dabei zeigt die Analyse, dass besonders Kühlung und Notstrom aufgrund ihres großen Einflusses auf die Energieeffizienz und die Nachhaltigkeitsbewertung im Mittelpunkt stehen.

- **Welche technischen Maßnahmen bieten das größte Potenzial zur Verbesserung der Nachhaltigkeit von Rechenzentren?**

Zentrale Potenziale liegen in effizienteren Kühlsystemen wie Wasserkühlung oder Adsorptionskälte, der direkten Nutzung von Abwärme sowie der Integration erneuerbarer Energien einschließlich Batteriespeichern. Die größtmögliche Wirkung entsteht jedoch erst durch die kombinierte und ganzheitliche Umsetzung dieser Maßnahmen, wobei ökologische Wirkung, Wirtschaftlichkeit und Standortbedingungen maßgeblich sind.

3.1 Technologiebewertung

Die Bewertung der Technologien erfolgte in zwei Schritten. Zum einen wurden die Bereiche identifiziert, die Energie benötigen, zum anderen wurden die relevantesten Bereiche auf den Einsatz von Wasserstoff und anderen technische Innovationen geprüft. In diesen werden nach potenziellem Einfluss auf die Energieeffizienz ausgewählte Technologien dargestellt und auf ihren Einsatz im Rechenzentrum bewertet. Es gibt einige technische und strukturelle Bereiche, die einen großen Einfluss auf die Energieeffizienz haben. Diese wurden durch Interviews mit Betreibern wie STACKIT und dem LRZ in München, sowie einer Desk-Research ermittelt. In folgender Tabelle 1 sind diese mit Einschätzung der Relevanz für die Nachhaltigkeitsbetrachtung dargestellt:

Tabelle 1: Auswahl von relevanten Bereichen mit Einfluss auf die Energieeffizienz von Rechenzentren (Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Interviews mit 3 Rechenzentrumsbetreibern)

Bereich	Relevanz	Einschätzung
Struktureller Bereich		

Büro	Niedrig	Für den Energiebedarf nicht relevant, interessant für die Nutzung von Abwärme	Technologie und Nachhaltigkeitspotenziale im Rechenzentrum
Infrastruktur	Niedrig	Für den Betrieb relevant, aber abseits von Gleichstromversorgung für den Energiebedarf irrelevant.	
Sicherheit	Niedrig	Geräte haben im Verhältnis zu der IT-Hardware kaum Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf.	

Technischer Bereich

Abwärmenutzung	Hoch	Extrem wichtig, da es gesetzliche Vorgaben zur Nutzung von Abwärme gibt. Diese hängt direkt von der gewählten Kühlmethode ab, da je nachdem das Temperaturniveau geeignet für Büros bis hin zu Wärmenetzen sein kann.
Energieerzeugung	Hoch	Sehr wichtiges Thema, da das Rechenzentrum elektrischen Strom benötigt. Das konkurriert meistens mit dem Paradigma, die Kühleinrichtungen auf dem Dach zu platzieren. Sinnvoll wäre es daher, die Kühlung auszulagern und die Dach- bzw. Fassadenflächen für Photovoltaik zu nutzen.
IT-Hardware (Strom)	Hoch	Sehr relevant, da die verwendete Hardware direkt den Energiebedarf beeinflusst. Mehrheitlich jedoch von den Hardwareentwicklern abhängig, daher wenig Einflussmöglichkeit der Rechenzentrumsbetreiber.
Kühlung	Hoch	Wichtigster Punkt bei der Energieeffizienz eines Rechenzentrums. Die Art der Kühlung bestimmt die Nutzungsmöglichkeiten der Abwärme und damit auch wie viel Energie potenziell weiter genutzt werden kann.
Notstrom/USV	Niedrig	Relevant, da aktuell meist Dieselgeneratoren in Kombination mit Batterien verwendet werden. Aufgrund des geringen Brennstoffdurchsatzes entstehen, trotz großer Dieselvorräte, wenige Emissionen.

Aufgrund dieser Einschätzung konzentrieren wir uns im Folgenden auf die Bereiche Notstrom und Kühlung, da diese den größten Einfluss auf die Nachhaltigkeitsbewertung und den Einsatz von Wasserstoff haben. Das Thema Wasserstoff wird in Kapitel 4 nochmal separat bewertet. Zusammenfassend werden im Folgenden die wichtigsten Bereiche in Bezug auf ihren Einfluss auf die Energieeffizienz dargestellt. Die hier genannten Informationen stützen sich auf die durchgeführten Interviews mit Rechenzentrumsbetreibern.

IT-Hardware

Die zur Berechnung oder dem Hosting von Diensten benötigte Hardware ist oft der größte Faktor beim Energieverbrauch. Sie orientiert sich an den Kundenwünschen, der Zielsetzung des Rechenzentrums und an der extrapolierten in Zukunft benötigten Re-

chenleistung aufgrund von Wachstum und Weiterentwicklung der Anforderungen. Mit der steigenden Nutzung von KI werden die Anforderungen stetig größer und auch der Bedarf an High-Performance-Computing (HPC) steigt stark an. Oft werden diese Lösungen als Online-Service im Rahmen des Cloud-Computing angeboten, was wiederum eine gut ausgebaute Netzwerkinfrastruktur voraussetzt. Eine weitere Möglichkeit ist das Geschäftsmodell Co-Location, was die Bereitstellung der Infrastruktur wie Elektrizität und Kühlkapazität für externe IT-Hardware bedeutet. Hierbei hat das Rechenzentrum keine Kontrolle über die tatsächlich abgerufene Energie und Kühlleistung.

Auslastungsmanagement/Betriebsstrategie

Mit einer geschickten Steuerung der Auslastung kann ein hoher Energieverbrauch zu Zeiten hoher regenerativer Energieerzeugung erfolgen. Dadurch kann der Strombezug aus tatsächlich nachhaltigen Quellen realisiert und zeitlich optimiert werden. Diese Betriebsstrategie ist sicher nicht immer möglich, da manche Berechnungen sofort erfolgen müssen. Eine Umsetzung ließe sich beispielsweise mit dynamischen Strompreisen oder der Verfügbarkeit von erneuerbarer Energie koppeln. Die günstigere Leistung könnte dann in Teilen an Kunden weitergegeben werden, somit entstünde ein nachhaltiger und günstiger Tarif für Anwender, die eine Flexibilität in ihren Aufgaben aufweisen. Dieses Smart Scheduling wird in dieser Arbeit nicht weiter behandelt, stellt jedoch eine Chance dar, große Nachhaltigkeitsgewinne bei Hochleistungsrechnungen zu erzielen.

Notstrom

Der Notstrombereich besteht aus den Teilen USV und Notstromgeneratoren. Die USV hat die Aufgabe die Zeit zwischen Netzausfall und Anlaufen der Notstromgeneratoren zu überbrücken. Sie besteht üblicherweise aus Batterien oder physikalischen Speichern wie beispielsweise Schwungrädern. Die nach aktuellem Stand meist mit Diesel betriebenen Generatoren laufen im Normalfall innerhalb von ein paar Minuten an und erreichen nach etwa 5 Minuten ihre Höchstlast. Je nach Einstufung des Rechenzentrums, beispielsweise als kritische Infrastruktur und der Auslegung kann, muss der Brennstoffvorrat der Generatoren für bis zu 48 Stunden ausreichen. Das Funktionsprinzip ist in nachfolgender Grafik (Abbildung 3) dargestellt.

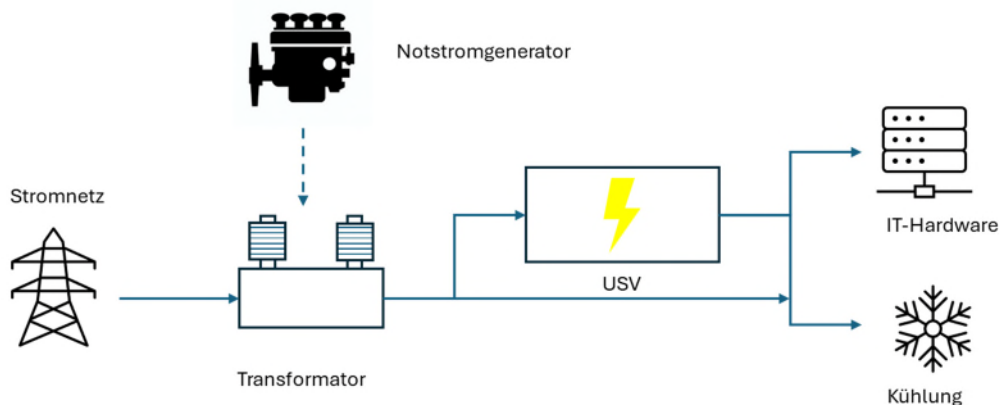


Abbildung 3: Vereinfachte Darstellung der Energieversorgung im Rechenzentrum (eigene Darstellung auf Basis der Betreiberinterviews)

Rechenzentren werden ab einer bestimmten Größe und je nach verarbeiteten Daten als kritische Infrastruktur eingestuft [6]. So zum Beispiel Rechenzentren aus Konzernen, die in der Verteilung von Lebensmitteln tätig sind. In der DIN EN 50600 wird eine Autarkie von 24 Stunden festgelegt, in der Praxis werden von den meisten Industrieunternehmen jedoch 48 – 72 Stunden realisiert (Quelle: Experteninterviews). Für diesen Zeitraum muss ein entsprechender Brennstoff bevorratet werden. In der Praxis kommen hier ausschließlich Dieselmotoren, ergänzt durch Batteriepacks als USV, zum Einsatz.

Diese könnten durch einen nachhaltigen Generator, beispielsweise eine Brennstoffzelle, ersetzt werden.

Kühlung

Sie ist ein zentraler Faktor, da hier das größte Potenzial liegt, durch intelligente Strategien eine Verbesserung in der Energieeffizienz und damit der Nachhaltigkeit zu erzielen. Die Abwärmestrategie hat auch maßgeblichen Einfluss auf den Aufbau der Infrastruktur, da sie das zugrundeliegende Kühlungskonzept miteinschließt. Der Aufbau unterscheidet sich, nach Verwendung von Luft- oder Wasserkühlung und deren jeweilige Unterkonzepte wie beispielsweise das Kaltgangprinzip. Weiter gibt es Vorgaben zur Abwärmenutzung in der IT, wie beispielsweise das Energieeffizienzgesetz (EnEfG). So müssen ab Juli 2026 die Betreiber nachweisen, dass mindestens 10 % der Abwärme weiterverwendet wird [7]. Von der Art der Kühlung hängen maßgeblich die Möglichkeiten der Abwärmenutzung und damit der erreichte Wiederverwendungsgrad der Energie ab. In nachfolgender Tabelle 2. sind einige relevante Kühlarten mit Vor- und Nachteilen dargestellt.

Tabelle 2: Darstellung ausgewählter Kühlarten mit Vor- und Nachteilen (eigene Darstellung basierend auf den Studienergebnissen und [8])

Art	Beschreibung	Vorteile	Nachteile	Erreichbarer PUE
Luftkühlung (Raumkühlung)	Der ganze Raum wird klimatisiert. Geeignet für Standardanwendungen im Bereich Storage. Luft kann durch freie Kühlung gegen kühle Umgebungsluft erfolgen oder falls tiefe Temperaturen notwendig sind über bspw. Kompressionskältemaschinen .	- Apparativ und konstruktiv sehr leicht zu realisieren - Wartung einfach, da Standardteile	- sehr ungezielte Kühlung - höherer Kühlbedarf, da für die größte Auslastung gekühlt werden muss - Luft schlechter Wärmeleiter - Wärmekapazität Luft: 1,005 kJ/kg/K - Geringere Wartungsfrequenz, da Lüfter wartungsintensiv	1,38 – 1,92
Luftkühlung (Reihenkühlung)	Es werden die einzelnen Rack-Reihen gekühlt. Geeignet für Standardanwendungen ohne viel Last. Kühlung der Luft siehe Raumkühlung.	- Apparativ und konstruktiv sehr leicht zu realisieren - Wartung einfach, da Standardteile	- ungezielte Kühlung - Kühlbedarf anhand der höchsten Anforderungen der Reihe - Luft schlechter Wärmeleiter- Wärmekapazität Luft: 1,005 kJ/kg/K - Redundanz wegen Ausfall benötigt - Geringere Wartungsfrequenz, da Lüfter wartungsintensiv	1,31 – 1,36
Luftkühlung (Racks)	Jedes einzelne Rack wird gekühlt. Geeignet für Standardanwendungen mit höherem Energieeinsatz, wie Simulationen und High Performance Computing. Kühlung der Luft siehe Raumkühlung.	- gezielte Kühlung möglich - für Luftkühlung relativ niedriger Kühlerenergiebedarf - Wartung einfach, da Standardteile	- hoher apparativer Aufwand (viele Konstruktionen) - Kalt/Warmgang - nötig) - Luft schlechter Wärmeleiter - Wärmekapazität Luft: 1,005 kJ/kg/K - Redundanz wegen Ausfall benötigt - Geringere Wartungsfrequenz, da Lüfter wartungsintensiv	1,28

Art	Beschreibung	Vorteile	Nachteile	Erreichbarer PUE
Flüssigkeitskühlung (direkt, Direct-to-Chip, Direct-to-Plate)	Kühlflüssigkeit wird über Rohrleitungen direkt zu den Kühlplatten geleitet. Dort wird die Wärme der Komponenten abgeleitet. Abkühlung über weiteren Wärmetauscher. Gut geeignet für energieintensive Anwendungen wie die Entwicklung von KI.	- Wasser hat höheren Wärmeübergangskoeffizient - Wärmekapazität Wasser: 4,19 kJ/kg/K - Wasser muss gereinigt werden (Ablagerungen vermeiden) - längeres Wartungsintervall, da nicht sehr fehleranfällig	- Probleme bei Leckage - Flüssigkeit muss geführt werden - höherer konstruktiver Aufwand - höherer Aufwand bei der Wartung, da Flüssigkeit	1,1 – 1,28
Flüssigkeitskühlung (Immersion)	Server werden in nichtleitender Flüssigkeit versenkt. Klimatisierung mit 1-2-Phasen-Kühlung. Gut geeignet für energieintensive Anwendungen wie die Entwicklung von KI.	- Hohe Effizienz im Vergleich zu Luft - geringere Leckageineigung - einfache Prozessführung - längeres Wartungsintervall, da nicht sehr fehleranfällig	- U.u. extra Kühlmittel nötig - höhere Kühlmittelmengen als in Direct-to-Chip - Je nach Kühlmittel: Korrosion, Kalkbildung - höherer Aufwand bei der Wartung, da Flüssigkeit	1,04 – 1,15
Flüssigkeitskühlung (Unterwasser)	RZ in Schiffen/U-Booten, Kühlung mit Meerwasser Direkte Verwendung von Naturwasser, welches gefiltert und aufbereitet wird. Internes System dicht. Gut geeignet für energieintensive Anwendungen wie die Entwicklung von KI.	- Keine Kühlmittel nötig - Effektive Kühlung im Vergleich zu Luft und Mineralölen - guter PUE erreichbar - relativ günstig da nicht nachgekühlt werden muss - Sehr gute Umweltverträglichkeit - längeres Wartungsintervall, da nicht sehr fehleranfällig	- Wasserreinigung erforderlich - Vollständige Trennung von innerem und äußerem System - Unterdruck, um Flüssigkeitsaustritt zu vermeiden - nur 1-Phasen-Kühlung - höherer Aufwand bei der Wartung, da Flüssigkeit	1,04 – 1,15

Art	Beschreibung	Vorteile	Nachteile	Erreichbarer PUE
Flüssigkeitskühlung (Rear Door Heat Exchanger)	Wasser fließt durch Rohre an der Rückseite der Racks. Gut geeignet für energieintensive Anwendungen wie die Entwicklung von KI.	- kein Kontakt zwischen Kühlflüssigkeit und Hardware - längeres Wartungsintervall, da nicht sehr fehleranfällig	- Kühlung über Luft - Kühlflüssigkeit bzw. Wärmeleitung Material - sehr ineffizient - höherer Aufwand bei der Wartung, da Flüssigkeit	1,81
Flüssigkeitskühlung Verdunstungskühlung)	Luft wird zwischen Filtern durchgeleitet, Wärme geht ins Wasser und verdampft dieses. 2-Phasen-Kühlung. Gut geeignet für energieintensive Anwendungen wie die Entwicklung von KI.	- Höhere Wärmeaufnahme durch Phasenübergang - siehe 2-Phasen Technologie	- siehe 2-Phasen Technologie	Keine Daten vorhanden

3.2 Methoden zur Verbesserung der Nachhaltigkeit im Rechenzentrum

Die in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Technologien und Zusammenhänge weisen auf verschiedene Potenziale zur Steigerung der Nachhaltigkeit hin. Dabei zeigt sich, dass einzelne Maßnahmen, beispielsweise im Bereich der Kühlung, der Eigenstromversorgung oder der Notstromabsicherung, zwar jeweils für sich genommen Beiträge zur Dekarbonisierung leisten können, die größtmögliche Wirkung jedoch erst durch eine kombinierte Betrachtung und ganzheitliche Umsetzung erzielt wird. Daher werden im Folgenden die zentralen technischen Maßnahmen in Bezug auf ihr Potenzial bewertet, wobei ökologische Wirkung, wirtschaftliche Tragfähigkeit und praktische Umsetzbarkeit einbezogen werden.

Ein wesentlicher Hebel zur Reduktion des Energieverbrauchs liegt in der Wahl und Ausgestaltung des Kühlsystems. Während klassische Kompressionskältemaschinen nach wie vor weit verbreitet sind, weisen sie im Vergleich zu moderneren Technologien eine deutlich geringere Energieeffizienz auf. Der Kühlaufwand ist insbesondere bei höheren IT-Komponententemperaturen beträchtlich, was sich in hohen PUE-Werten niederschlägt. Demgegenüber bietet die Nutzung von moderneren Kühlmethoden wie Adsorptionskälte klare Vorteile. Die hier verwendete Technologie macht sich thermische Energie zunutze und erlaubt damit eine effizientere Nutzung vorhandener Ressourcen – insbesondere dann, wenn die Kühlung über vorhandene Abwärmequellen gespeist wird. In Verbindung mit einem geeigneten Temperaturniveau der IT-Komponenten (etwa 55 °C) lassen sich deutliche Effizienzgewinne erzielen.

Ein weiterer Aspekt mit hohem Potenzial ist die direkte Nutzung der im Betrieb entstehenden Abwärme. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass bereits eine teilweise Rückführung in Heizkreisläufe oder Nahwärmenetze zu signifikanten Einsparungen bei der extern zugeführten thermischen Energie führt. Die rechtlichen Vorgaben, die ab Juli 2026 eine Abwärmenutzung von mindestens 10 % vorschreiben [9], unterstreichen die Bedeutung dieses Ansatzes. Technologisch ist diese Umsetzung mit relativ überschaubarem Aufwand verbunden, insbesondere wenn moderne Wasserkühlungssysteme oder Adsorptionsanlagen zum Einsatz kommen. Aus wirtschaftlicher Sicht hängt das tatsächliche Nutzungspotenzial stark von der regionalen Wärmeabnahmesituation ab – etwa dem Vorhandensein eines geeigneten Nahwärmenetzes oder gewerblicher Abnehmer in unmittelbarer Nähe. In ländlichen oder isolierten Lagen könnte die Abwärmenutzung trotz technischer Machbarkeit an infrastrukturellen Grenzen scheitern.

Ein zentrales Element nachhaltiger Rechenzentrumsarchitekturen stellt die Integration erneuerbarer Energien dar. Je nach Standort und verfügbarer Fläche können, wie in Studien festgestellt wurde, abhängig von den Randbedingungen wie der nutzbaren Dachlast und Dachfläche ungefähr 31,7 % des Gesamtenergiebedarfs eines Rechenzentrums durch lokal erzeugte Solarenergie gedeckt werden [10]. Die Batteriespeicher erhöhen darüber hinaus die Flexibilität im Netzbezug und erlauben eine Entkopplung des Lastprofils der Erzeugungslogik. Besonders in Verbindung mit dynamischen Stromtarifen (z.B. basierend auf stündlich variierenden Strommarktpreisen) ergeben sich daraus substantielle Vorteile, sowohl im Hinblick auf die Emissionsvermeidung als auch auf die Reduktion der Betriebskosten. Allerdings hängt die Wirtschaftlichkeit dieser Maß-

nahmen in hohem Maße von den Rahmenbedingungen ab: Die verfügbare Fläche für PV-Anlagen, die lokalen Einspeisevergütungen sowie die Ausgestaltung des Strommarktdesigns (z. B. Flexibilitätsanreize oder Netzentgelte) beeinflussen maßgeblich die Amortisationszeit. Ohne entsprechende Förderkulissen oder hohe Eigenverbrauchsanteile kann sich insbesondere der Einsatz größerer Batteriespeicher in kleinen Rechenzentren als wirtschaftlich herausfordernd erweisen. Die Verbesserung der Effizienz und damit der Nachhaltigkeit im Rechenzentrum kann neben dem Einsatz von Wasserstoff zur Dekarbonisierung in anderen Bereichen noch besser erreicht werden. Einige besondere Methoden sind in nachfolgender Tabelle 3 dargestellt:

Tabelle 3: Übersicht und Beschreibung der verschiedenen effizientesten Kühlmethoden im Rechenzentrum (Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der Interviews)

Methode	Beschreibung
Wasserkühlung	Effizientere Kühlung für immer energieintensivere Hardware. Durch besseren Wärmeübergang können höhere Eingangs- und Ausgangstemperaturen realisiert werden, was zu mehr Nutzungspotenzial für die Abwärme führt.
Adsorptionskühlung	Bekanntes aber wenig genutztes Verfahren um eine gewisse Kühlung mit der vorhandenen Abwärme als treibende Kraft zu realisieren. Hiermit wäre in begrenztem Umfang eine Nutzung der Abwärme zur Erzeugung von Kühlleistung möglich.
Abwärmennutzung	Großes Potenzial, aber abhängig von der gewählten Kühlmethode. Bei Luftkühlung können Niedrigtemperaturanwendungen wie die Beheizung von Gärtnereien genutzt werden, bei Wasserkühlung und der Kombination mit Wärmepumpen, sogar die Einspeisung in Wärmenetze.
Gleichstromversorgung	Die Transformation vom Netzstrom (Wechselstrom) zu Gleichstrom kann an einer zentralen Stelle erfolgen. Damit können effiziente Methoden der Abwärmennutzung eingesetzt werden, da diese zentral in großen Mengen anfällt. Weiterhin entfallen viele Einzelnetzteile für die IT-Hardware.
Gesamtkonzepte	Bei der Nutzung von Gesamtkonzepten, beispielsweise beim Neubau von Rechenzentren, kann ein vollumfängliches Konzept erstellt werden. Dieses kann den Einsatz von PV zur Energieversorgung und die Etablierung eines kommunalen Wärmenetzes zur Nutzung der Abwärme beinhalten. Dabei müssen die entstehenden Energiemengen abgeschätzt werden und das Konzept entsprechen, auch mit Backups, gestaltet werden.

Die Nutzung solcher Methoden und die Kombination machen ein sehr effizientes und nachhaltiges Rechenzentrum möglich. Die Möglichkeiten hängen auch von der Zielsetzung des Rechenzentrums (Standard oder Höchstleistung) und den örtlichen Gegebenheiten ab. Entsprechende Planungen können dies jedoch berücksichtigen und damit hohe Effizienzen ermöglichen.

Wasserstoff im Rechenzentrum

In diesem Kapitel wird der Einsatz von Wasserstoff im Rechenzentrumskontext überprüft. Dabei werden die potenziellen Einsatzzwecke identifiziert, die notwendige Logistik mit dem dazugehörigen Energiekonzept aufgezeigt und am Ende des Kapitels bewertet.

Leitfragen des Kapitels:

- **Welches Potenzial bietet Wasserstoff für den Einsatz in Rechenzentren und welche Einschränkungen ergeben sich daraus?**

Wasserstoff kann im Notstrombereich zur Dekarbonisierung beitragen, weist jedoch aufgrund hoher Anforderungen an Lagerung, Versorgungssicherheit und Kosten nur ein geringes Gesamteinsatzpotenzial auf. Für den regulären Energiebedarf ist er ungeeignet, sodass effizientere Kühlstrategien und andere Nachhaltigkeitsmaßnahmen deutlich wirkungsvoller sind.

- **Welche Anforderungen und Herausforderungen ergeben sich beim Einsatz von Wasserstoff für das Energiekonzept und die Logistik der Notstromversorgung von Rechenzentren?**

Der Einsatz von Wasserstoff in der Notstromversorgung eines Rechenzentrums erfordert eine sichere, genehmigungspflichtige und platzintensive Lagerung sowie eine zuverlässige Liefer- oder Produktionslogistik, wobei sowohl Transportwege, Speichermethoden, Infrastrukturbedarf, Sicherheitsauflagen als auch wirtschaftliche und ökologische Faktoren berücksichtigt werden müssen. Gleichzeitig zeigen die unterschiedlichen Speichertechnologien, Transportoptionen und Kostenstrukturen, dass Wasserstoff trotz seiner emissionsarmen Nutzung hohe technische Komplexität und Investitionen verlangt und daher sorgfältig an den jeweiligen Bedarf und Standort angepasst werden muss.

4.1 Potenzialbewertung für den Einsatz von Wasserstoff

Der Energiebedarf in Rechenzentren wird nahezu ausschließlich über eine elektrische Netzanbindung gedeckt. Brennstoffe finden praktisch primär im Bereich der Notstromversorgung Verwendung. Üblicherweise wird aktuell Diesel als Energieträger verwendet. Wasserstoff könnte hier als Substitut eingesetzt werden. Dieses bietet Vor- aber auch Nachteile. Positiv ist die mit der Verwendung einhergehende Dekarbonisierung und damit die Steigerung der Nachhaltigkeit, speziell mit Blick auf das immer wichtiger werdende Nachhaltigkeitsberichtsweisen. Gegebenenfalls kann auch eine lokale Versorgung mit grünem Wasserstoff etabliert werden, was den Regionalbezug und die Autarkie bei der Versorgung fördert. Aufgrund der niedrigen Verbrauchsmengen ist der Brennstoffpreis nicht so sehr relevant wie beispielsweise bei höheren Umsätzen zum Beispiel in der energieintensiven Industrie. Auf der Gegenseite hingegen ist die effiziente Lagerung des relativ schwer handhabbaren Wasserstoffs eine große Herausforderung. Spezielle Materialien, diffuse Emissionen, Aufrechterhaltung hoher Drücke sind typische Herausforderungen. Aus diesen Gründen ist das Potenzial für den Einsatz von Wasserstoff im Bereich der Rechenzentren gering. Das Versorgungsrisiko, die Lagerung und der Verlust während der Speicherung sind die Hauptgründe für eine niedrige Eignung in diesem Bereich. Selbst bei Betrachtung von Sekundärnutzung von Wasserstoff,

beispielsweise als Unterstützung für die Kühlung (siehe Technologiekapitel), bietet Wasserstoff keine lohnenswerte Alternative. Zur Steigerung der Energieeffizienz und Nachhaltigkeit sollten daher andere Möglichkeiten, beispielsweise eine effizientere Kühlung bei höheren Temperaturniveaus in Betracht gezogen werden. Diese versprechen bei niedrigerem finanziellem Risiko einen höheren Gewinn, sowohl bei der Nachhaltigkeit als auch bei den potenziellen Kosten. In den folgenden Abschnitten wird eine Bewertung des Einsatzes im Notstrombereich in den Feldern Technologie, Logistik und Umfeld durchgeführt (Abbildung 4):



Abbildung 4: Betrachtete Bereiche der Notstromversorgung in Rechenzentren (eigene Darstellung)

Technologisch

Generell handelt es sich bei der Verwendung von Wasserstoff im Notstrombereich um die thermische Verwendung eines Brenngases zur Erzeugung von Kraft, die wiederum zu Elektrizität umgewandelt wird. Hier gibt es die Möglichkeit die vorhandenen Diesel umzurüsten. Alternativ kann der Wasserstoff direkt über Brennstoffzellen in Strom umgewandelt werden. Beide Technologien sind am Markt vorhanden und lassen sich mit wenig Aufwand für ein Rechenzentrum einsetzen. Beachtet werden müssen die jeweiligen Randbedingungen, mit Blick auf die Geschwindigkeit der Verstromung.

Logistisch

Die relevanten Eigenschaften für den Einsatz im Notstrombereich sind Lagerstabilität, Lagervolumen und Verfügbarkeit in entsprechenden Quantitäten. Daher ist Wasserstoff aus Sicht der Nachhaltigkeit sinnvoll, jedoch aufgrund seiner Flüchtigkeit (Verlust von etwa 0,5 % pro Tag durch Abdampfen, Boil-off) und den damit einhergehenden Herausforderungen bei Lagerung und Transport eher nicht geeignet. Bessere Alternativen sind Wasserstoffderivate, wie beispielsweise grünes Methan oder Ammoniak. Diese sind leichter zu transportieren und zu lagern. Außerdem können diese direkt mit Verbrennungskraftmaschinen in elektrischen Strom umgewandelt werden. Auch die Verfügbarkeit ist im Vergleich zu grünem Wasserstoff höher und damit die Versorgungssicherheit besser.

Umfeld

Beim Einsatz von Wasserstoff sind mehrere verschiedene Stakeholder aus dem Umfeld beteiligt. Beispiele hier sind Lieferanten für grünen Wasserstoff und Wartungsdienstleister. Hierbei spielt die Versorgungsproblematik eine große Rolle. Je nach Region sind diese beteiligten Gruppen ansässig, was die Thematik erleichtert, oder müssen durch räumlich entferntere Vertreter abgedeckt werden. Generell spielt hier der niedrige Anwendungsgrad von Wasserstoff eine Rolle. Bisher konnte sich aufgrund fehlender politischer Rahmenbedingungen und Perspektiven keine umfängliche Wirtschaft entwickeln.

Einschätzung Zukunftspotenzial

Der sinnvolle Einsatz von H_2 im Rechenzentrum ist in hohem Maße vom gesellschaftlichen, politischen und wirtschaftlichen Umfeld abhängig. Die Analyse relevanter Anspruchsgruppen zeigt, dass insbesondere auf politischer Ebene starke Impulse zur Förderung von Wasserstofftechnologien gesetzt werden, beispielsweise durch die Nationale Wasserstoffstrategie, Programme zur Dekarbonisierung kritischer Infrastrukturen oder regulatorische Vorgaben im Rahmen des Energieeffizienzgesetzes. Auch auf Seiten der Betreiber besteht grundsätzlich ein wachsendes Interesse an nachhaltigen Energielösungen. Gleichzeitig äußern sich technische Dienstleister und Planungsverantwortliche Vorbehalte hinsichtlich der Betriebssicherheit, des Aufwands zur Integration in bestehende Systeme sowie der aktuell noch unzureichenden Standardisierung wasserstoffbasierter Anwendungen im Rechenzentrumsumfeld. Energieversorger bewerten den Einsatz von Wasserstoff dort als besonders sinnvoll, wo größere Lastzentren mit Sektorkopplungspotenzial bestehen. Einzelne Rechenzentren gelten in der aktuellen Marktentwicklung jedoch nicht als prioritäre Zielgruppe. Darüber hinaus ist die öffentliche Wahrnehmung ambivalent: Während die Notwendigkeit klimafreundlicher Energieversorgung grundsätzlich befürwortet wird, bestehen teils Bedenken hinsichtlich potenzieller Risiken der Wasserstofflagerung, insbesondere in städtischen Gebieten. Insgesamt zeigt sich, dass das Umfeld sowohl Chancen als auch strukturelle Herausforderungen für den Einsatz von Wasserstoff im Rechenzentrum bietet. Die erfolgreiche Umsetzung hängt maßgeblich von der lokalen Infrastruktur, der Akzeptanz durch kommunale Akteure sowie der Möglichkeit zur Integration in übergeordnete Versorgungskonzepte ab.

Für die vollständige Versorgung eines Rechenzentrums ist der Netzstrom unerlässlich, da sehr große Energiemengen in kurzer Zeit und kontinuierlich benötigt werden. Hier bietet sich kein Einsatzpotenzial für Wasserstoff, da ein komplettes Brennstoffmanagement mit Lieferung, Lagerung und Rückverstromung benötigt würde. Im Bereich der Notstromversorgung ist Wasserstoff aufgrund seiner Eignung für die Energiespeicherung geeignet. Allerdings ergeben sich Herausforderungen wie zum Beispiel der hohe Platzbedarf bei großen Mengen. Daher eignet sich Wasserstoff primär bei Rechenzentren, die nicht zur kritischen Infrastruktur gehören und damit keine längerfristige Autarkie sicherstellen müssen.

Insgesamt kann daher der Einsatz von Wasserstoff im Kontext von Rechenzentren, selbst unter Berücksichtigung der Dekarbonisierung, nicht als primäres Mittel der Dekarbonisierung erachtet werden. Wie bereits festgestellt, eignet sich nur der Notstrombereich, jedoch ist die Anschaffung der benötigten Hardware wie Speicher, Ladeeinrichtung und Stromerzeuger zu teuer. Die Beschaffung von nachhaltig erzeugtem Wasserstoff ist aktuell sehr kostenintensiv. Aktuell liegen die Gesteungskosten von grünem Wasserstoff bei ca. 9.80 €/kg und werden vermutlich bis 2040 nur auf etwa 7.40 €/kg fallen [11]. Das bedeutet einen Preis von ca. 0,6 €/kWh und dabei sind die Transportkosten noch nicht berücksichtigt. Durch die geringen umgesetzten Mengen, die nur bei Routine-Tests und im Notfall anfallen, ist das Dekarbonisierungspotenzial sehr niedrig. Die Primärenergie von Rechenzentren stammt aus dem Stromnetz, weswegen die Erhöhung des Anteils an erneuerbaren Energien im Gesamtenergienetz mehr CO_2 einspart als der Einsatz im Notstrombereich. Im Folgenden Kapitel wird den-

noch ein Energie- und Logistikkonzept betrachtet, um die Herausforderungen und Herangehensweisen von dieser Seite zu beleuchten.

4.2 Energiekonzept und Logistik

Der Einsatz von Wasserstoff im Energiesystem fokussiert sich, wie im Kapitel 4.1 dargelegt, hauptsächlich auf den Bereich der Notstromversorgung. Da Wasserstoff nur im Ernstfall genutzt wird, sind die benötigten Mengen vergleichsweise gering. Ein zentraler Aspekt ist die Speicherung, da der Brennstoff über längere Zeiträume gespeichert und im Bedarfsfall kurzfristig rückverstromt werden muss. Abhängig von der benötigten Leistung und der vorgesehenen Dauer der Autarkie, kann die Lagerung von Wasserstoff eine erhebliche technische und genehmigungsrechtliche Herausforderung darstellen. Die Notstromversorgung mittels Wasserstoffs hat für ein Rechenzentrum das Ziel, eine emissionsarme, zuverlässige und nachhaltige Alternative zur herkömmlichen Notstromversorgung, zumeist mit Dieselaggregaten, bereitzustellen.

Transport/Versorgung

Im Falle einer Notstromversorgung mit Wasserstoff fallen relativ kleine Mengen an, die auch durch lokale Gasversorger abgedeckt werden können. Insbesondere in Regionen, die bereits eine entwickelte Infrastruktur für Wasserstoff aufweisen. Zudem arbeiten weitere Versorger derzeit aktiv daran, die Gasnetze für die Wasserstoffversorgung umzurüsten, somit kann ein Übergang zu klimaneutralen Energien geschaffen werden [12]. Hierbei kommen vor allem Unternehmen in Frage, die sich auf Energietransporte spezialisiert haben, oder auch Tankstellen, von denen ein Bezug kleiner Mengen denkbar ist [13]. Sollten Mengen größer als ungefähr 50 kg Wasserstoff für die Versorgung notwendig werden, muss der Bezug von Großhändlern in Betracht gezogen werden. Beispielsweise ist es möglich Wasserstoff über den Hamburger Hafen in größeren Mengen zu beziehen, hierbei muss jedoch der Weitertransport vom Hafen zum finalen Zielort, also das Firmengelände, berücksichtigt werden. Für den Transport bieten sich je nach Entfernung verschiedene Möglichkeiten an. Diese sind in nachfolgender Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Bewertung der Transportoptionen und verschiedene H₂-Carrier über verschiedene Distanzen [14]

Transportvariablen Transportmittel		Transportdistanz			Transportmenge		
		Kurze Distanzen (bis 150 km)	Mittlere Distanzen (150-1.000 km)	Große Distanzen (ab 1.000 km)	Kleine Mengen (bis zu 500 kg)	Mittlere Mengen (500 bis 1.500 kg)	Große Mengen (ab 1.500 kg)
Straße (LKW)	CGH2	+	+	-	+	S	-
	LH2	-	S	+	-	-	+
	LOHC	-	S	+	-	+	+
Pipeline	CGH2	+	+	S	-	-	+
Schiene (Zug)	CGH2	-	+	+	S	S	+
	LH2	0	0	S	0	0	S
	LOHC	-	S	+	-	+	+
Schifffahrt	CGH2	-			-		
	LH2	0	S	+	-	-	+
	LOHC	0	S	+	-	S	+

Legende:

Keine Empfehlung, da ungeeignet: - / Empfehlung, da geeignet: + / Keine Aussage: 0 / Szenarioabhängig: S

Quelle: Übersicht über Transportvektoren für Wasserstoff und deren optimale Distanz und Menge, gegliedert nach Transportform Darstellung nach [14], [15], [16], [17], [18], [19]

Die Option des Wasserstoffbezugs stellt vor allem dann eine Alternative dar, wenn keine Produktion vor Ort erfolgen kann oder diese sich aufgrund geringer Abnahmemengen nicht lohnt. Letzteres ist im Szenario Wasserstoff im Notstrombereich der Fall. Über spezialisierte Tanklastwagen oder den Zugang zu einer Pipeline kann dann der Wasserstoff geliefert werden, allerdings müssen die entsprechenden Anschlüsse vorhanden sein und es muss ein zuverlässiger Liefervertrag mit einem Anbieter bestehen, damit die Notstromversorgung zuverlässig abgedeckt ist.

Speicherung

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Speicherung des Wasserstoffs vor Ort. Dies stellt eine zentrale Herausforderung dar, bei der zahlreiche technische, wirtschaftliche, regulatorische und sicherheitstechnische Aspekte berücksichtigt werden müssen. Da Wasserstoff hochentzündlich ist, werden strenge Sicherheitsmaßnahmen wie beispielsweise Druckentlastungsvorrichtungen und Gasdetektoren benötigt (bspw. nach DIN EN 676 oder ISO/TR 15916). Aufgrund der kleinen Molekülgröße kann der Wasserstoff schon durch kleinste Risse entweichen, weshalb hochwertige, feuerfeste und widerstandsfähige Materialien für die Tanks und die Dichtungen erforderlich sind. Zudem sind die Umgebungsbedingungen zu berücksichtigen, eine Lagerung sollte nur in sicherem Abstand zu Zündquellen erfolgen. Weiterhin sind gegebenenfalls Auflagen in Bezug auf die Umgebung zu berücksichtigen, beispielsweise in Wohn- oder Wasserschutzgebieten.

Hinsichtlich der Speicherdichte und Effizienz zeigt sich, dass flüssiger Wasserstoff eine deutlich höhere volumetrische Energiedichte als gasförmiger Wasserstoff aufweist. Diese Eigenschaft ermöglicht eine kompakte Lagerung, erfordert jedoch aufwendige Kühltechnik, da die Verflüssigung bei -253 °C stattfindet und diese Temperatur gehalten werden muss. Alternativ wird gasförmiger Wasserstoff in Hochdrucktanks gelagert, wobei Drücke von bis zu 700 bar notwendig sind, um eine platzsparende Speicherlösung zu gewährleisten [20]. Die Speicherung ist ein wichtiger Faktor, da der Brennstoff lange Zeit lagern und die Energie in kurzer Zeit freigegeben werden muss. Je nach Leistung und geplanter Autarkiezeit stellt die Lagerung des Wasserstoffs eine Herausforderung dar. Ein Vergleich von Energiedichte und Dichte zwischen verschiedenen Energieträgern ist in nachfolgender Tabelle (Tabelle 5) dargestellt und für die beispielhaften Berechnungen als Annahmen verwendet:

Tabelle 5: Vergleich Energiedichte und Dichte verschiedener Energieträger (eigene Darstellung, basierend auf der Datenbank des National Institute of Standards and Technology (NIST))

Brennstoff	Gravimetrische Energiedichte (kWh/kg)	Dichte (kg/m ³)
Diesel	11,9	850
H ₂ (350 bar)	33,3	24
H ₂ (700 bar)	33,3	40
Ammoniak	5,2	682

Beispielhaft berechnen wir die benötigte Masse (m) für 1 MWh (1.000 kWh) **für verschiedene Energieträger**.

Berechnung der Masse für 1 MWh:

Dabei gelten die Annahmen der obigen Tabellen bezüglich der Energiedichten, wobei die Energiemenge 1000 kWh (1 MWh) ist.

$$m = \frac{e}{w}$$

m = Masse in kg

w = Gravimetrische Energiedichte in kWh/kg

e = Energiemenge in kWh

Berechnung des Volumens

$$v = \frac{m}{\rho}$$

v = Volumen in m³

m = Masse in kg

ρ = Dichte in kg/m³

Somit ergeben sich folgende Ergebnisse für die verschiedenen Energieträger (Tabelle 6):

Tabelle 6: Masse und Volumen nach Energieträgern für den exemplarischen Einsatz (eigene Darstellung)

Energieträger	Masse (kg)	Volumen (m ³)
Diesel	84,03	0,099
H ₂ , 350 bar	30,03	1,25
H ₂ , 700 bar	30,03	0,73
Ammoniak	192,31	0,282

Die Berechnung zeigt, dass das benötigte Volumen des Speichers stark von der Energiedichte und der Speichermethode des Energieträgers abhängt. Diesel benötigt mit 0,099 m³ pro MWh vergleichsweise wenig Platz, da er eine hohe Energiedichte besitzt. Wasserstoff, obwohl sehr energiereich pro Kilogramm, braucht deutlich mehr Volumen – insbesondere bei 350 bar (1,25 m³) im Vergleich zu 700 bar (0,73 m³). Ammoniak liegt dazwischen mit 0,282 m³, bietet aber aufgrund der chemischen Eigenschaften wie beispielsweise Schmelzpunkt bei -77,7 °C und einen Siedepunkt von -33 °C sowie generell einer niedrigeren Flüchtigkeit, da das Molekül größer ist als Wasserstoff, eine einfachere Handhabung als dieser.

Die Wahl des Speichermediums hängt stark vom Einsatzzweck ab. Gasförmiger Wasserstoff eignet sich sowohl für mobile als auch stationäre Anwendungen, da robuste Hochdrucktanks genutzt werden. Allerdings hat es, aufgrund des hohen Speichervolumens, Nachteile bei größeren Energiebedarfen. Für größere Speichermengen bietet sich die Verflüssigung an, wobei kryogene Tanks verwendet werden, die jedoch aufgrund des hohen Energieaufwands für die Verflüssigung deutlich ineffizienter sind. Eine dritte Möglichkeit stellt die physikalische oder chemische Bindung des Wasserstoffs dar, etwa in Metallhydriden oder organischen Trägersubstanzen wie Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC), was vor allem für spezielle industrielle Anwendungen von Interesse ist [21]. Eine Gegenüberstellung der Speichermedien Hochdrucktank und kryogene Tanks anhand spezifischer Anforderungen und Eigenschaften ist nachfolgender Tabelle (Tabelle 7) zu entnehmen [22].

Tabelle 7: Gegenüberstellung Hochdrucktanks und Kryogene Tanks (eigene Darstellung auf Basis von [22])

Eigenschaft	Hochdrucktanks	Kryogene Tanks
Speicherform	Gasförmiger Wasserstoff bei 200 – 700 bar	Flüssiger Wasserstoff bei -253 °C
Energiedichte	Niedriger (40 kg/m ³ bei 700 bar)	Höher (70,79 kg/m ³)
Platzbedarf	ca. 25-30 m ³ pro 1.000 kg/H ₂ → Weniger Platz durch kompakte Bauweise	ca. 15-20 m ³ pro 1.000 kg/H ₂ → Größerer Platzbedarf aufgrund von Isolierung
Bauweise	Stahl- oder Verbundbehälter	Isolierte Doppelwände mit Vakuumschicht
Temperaturanforderungen	Keine besonderen Anforderungen	Ca. -253 °C
Kosten	600 – 1600 €/kg	400 €/kg
Anwendungsbereich	Flexibel, besonders bei kleineren Speichermengen	Ideal für größere Energiemengen

Auch die Infrastruktur und der Platzbedarf spielen eine entscheidende Rolle. Wasserstofftanks und die zugehörigen Sicherheitseinrichtungen beanspruchen Platz, insbesondere in dicht bebauten urbanen Gebieten. Daher ist eine flexible und skalierbare Auslegung der Speichersysteme essenziell, um zukünftige Anforderungen und Erweiterungen zu ermöglichen.

Gasförmiger Wasserstoff wird in Drucktanks bei 350bar (Dichte ~24 kg/m³) bis 700 bar (Dichte ~40 kg/m³) gespeichert und benötigt relativ viel Platz. Um beispielsweise 1.000 Kilogramm Wasserstoff zu lagern – was etwa 33,3 Megawattstunden Energie entspricht – wären mehrere große Druckbehälter erforderlich, die schätzungsweise ein Volumen von 25 bis 42 Kubikmetern beanspruchen. Flüssiger Wasserstoff hingegen, der bei -253 °C gelagert wird, weist eine deutlich höhere Energiedichte (~71 kg/m³) auf. Dadurch verringert sich der Platzbedarf auf etwa 14 Kubikmeter für die gleiche Menge, wobei zusätzliche Flächen für Isolierung und sicherheitstechnische Einrichtungen notwendig sind. Die benötigte Fläche für die Speichereinrichtungen hängen sehr stark von der Bauform des Tanks, beispielsweise liegend oder stehend, ab. Daher lässt sich dieser nicht direkt abschätzen.

Die Brennstoffzellen-Systeme zur Umwandlung von Wasserstoff in elektrische Energie sind deutlich platzsparender. Der gesamte Platzbedarf ist allerdings von der Bauweise und der Leistungsdichte abhängig. Nach Schätzungen kann man hier von ca. 10 – 20 m² ausgehen. Darüber hinaus muss bei der Planung auch die Infrastruktur und Sicherheit berücksichtigt werden. Sicherheitsbereiche mit Sensoren, Ventilen und Feuerlöscheinrichtungen erhöhen den Platzbedarf um etwa 20 bis 30 % [23]. Zusätzlicher Raum kann außerdem durch Überbrückungssysteme wie Batterien, die in den ersten Sekunden eines Stromausfalls zum Einsatz kommen, oder durch Wartungs- und Zugangszonen erforderlich sein.

Wirtschaftlichkeit

Wirtschaftlich lässt sich die Verwendung von Wasserstoff in zwei Teilabschnitte unterteilen. Zum einen die anfänglichen Investitionen in die Hardware wie Tanks und Brennstoffzellen und zum anderen in den Betrieb der Anlage. Darunter fallen Bezugskosten

für Wasserstoff aber auch Wartungsaufwände. Der erste Teil ist gut abzuschätzen, da die benötigten Teile einfach zu benennen sind: Tank, Brennstoffzellen, gegebenenfalls Elektrolyseur und Infrastruktur. Daher lassen sich hier die Kosten auch gut planen. Im zweiten Teil geht es primär um die dauerhafte Lagerung des Wasserstoffs und die damit verbundenen Kosten, inklusive des Bezugs von Wasserstoff. Je nach Art der Speicherung müssen Wartungen für Dichtigkeit und Funktionalität der Infrastruktur durchgeführt werden. Auch eine Kühlung oder Verflüssigung von Wasserstoff zur effizienteren Lagerung ist mit hohen Kosten verbunden. Beim Bezug von Wasserstoff ist entscheidend, ob grüner Wasserstoff gewünscht ist oder ob auch grauer genügt. Diese Punkte haben einen entscheidenden Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit und müssen daher individuell betrachtet werden. [24]

Regulatorik

Darüber hinaus sind umfangreiche gesetzliche Anforderungen zu erfüllen. Die Einhaltung internationaler Normen ist ebenso verpflichtend wie nationale Vorschriften. Genehmigungsprozesse für Lagerung und Transport unterliegen strengen Sicherheits- und Umweltauflagen [25], [26]. Da der Wasserstoff nur im Falle einer Notstromversorgung zum Einsatz kommen soll, müssen Sicherheitsmaßnahmen durchgeführt werden, die Gefahren vermindern sollen. Es müssen Schulungen für das Personal, welches die Wasserstoffsysteme betreibt, durchgeführt werden. Hinzu kommen für Rechenzentren spezifische Auflagen, beispielsweise wenn dieses für kritische Infrastruktur wie Lebensmittelversorgung oder Wasserversorgung benötigt wird. Beispielsweise müssen Rechenzentren bis zu 48 Stunden autark betrieben werden können.

Wartung

Damit das System für die Notstromversorgung jederzeit einsatzbereit ist, müssen regelmäßige Wartungen der Tanks, Ventile, Brennstoffzellen und anderer Komponenten sichergestellt werden. Dabei kann vor allem die Integration eines Monitoring-Systems mit Echtzeit-Datenüberwachung Abhilfe schaffen und potenzielle Probleme frühzeitig erkennbar machen. Oft werden dazu Dienstleister benötigt, die sich mit der Wartung der Wasserstoffeinrichtungen auskennen. Meist wird dieser Punkt in Form von Wartungsverträgen abgedeckt.

Exkurs: Vergleich Eigenproduktion und Bezug Wasserstoff

Bei Wasserstoff Anwendungen stellt sich prinzipiell die Frage des Wasserstoffbezugs. Es gibt die Option den Wasserstoff on-site herzustellen oder extern zu beziehen. Die Wahl zwischen dem Bezug von Wasserstoff und der Eigenproduktion bringt jeweils spezifische Vor- und Nachteile mit sich, die sowohl wirtschaftliche, technische als auch ökologische Aspekte betreffen. Die folgende Gegenüberstellung (Tabelle 8) vergleicht nochmals beide Optionen anhand zentraler Kriterien wie Verfügbarkeit, Kosten, Infrastrukturbedarf und Umweltfreundlichkeit. Ziel ist es, eine fundierte Entscheidungsgrundlage zu bieten, die den jeweiligen Rahmenbedingungen und strategischen Zielsetzungen des Rechenzentrums gerecht wird [27].

Tabelle 8: Gegenüberstellung von Bezug und Eigenproduktion von Wasserstoff in ausgewählten Kategorien (eigene Darstellung)

Kriterium	Bezug von Wasserstoff	Eigenproduktion von Wasserstoff
Verfügbarkeit	Die Verfügbarkeit hängt von regionalen Lieferanten und der Wasserstoff-Logistik ab. Lieferverzögerungen oder -engpässe sind mögliche	Eine Eigenproduktion ermöglicht die Produktion von Wasserstoff zu günstigen Zeiten, beispielsweise wenn regenerativer Strom verfü-

	Herausforderungen. Abhängig ist dieser Punkt auch davon, ob grüner Wasserstoff gewählt wird.	bar ist. Die Lokale Speicherung ermöglicht den gezielten Einsatz zur Energiebereitstellung.
Investitionskosten	Es fallen Kosten für Tanks, Infrastruktur, Brennstoffzellen und Sicherheitseinrichtungen an. Das erfordert eine geringere Anfangsinvestition, gemessen an der Eigenproduktion.	Die Investitionskosten umfassen den Aufbau von Elektrolyseuren, Wasserstoffspeichern, Kühltechnik (falls erforderlich) und der notwendigen Infrastruktur. Dies erfordert eine hohe Anfangsinvestition.
Betriebskosten	Abhängig von den Lieferverträgen und den Marktpreisen für Wasserstoff. Variationen bei den Preisen und langfristige Abhängigkeit von Lieferanten können Risiken bergen. Jedoch sind die Bezugspreise gut planbar.	Dynamische Kosten, da die Eigenproduktion stark von den Stromkosten abhängt. Die Erzeugung sollte intelligent gesteuert werden, um den Wasserstoff möglichst günstig, beispielsweise bei hoher Verfügbarkeit von Solarstrom, zu erzeugen. Allerdings fallen Kosten für die Wartung an.
Infrastrukturbedarf	Es werden lediglich geeignete Tanks (Hochdruck oder kryogen), ein Leitungssystem und Entladevorrichtungen sowie Sicherheitseinrichtungen benötigt, da keine Produktionssysteme erforderlich sind.	Zusätzlich zu den Wasserstofftanks wird Platz für die Produktionseinheiten (z. B. Elektrolyseure) benötigt. Sicherheitsanforderungen und Energiezufuhr erhöhen die Komplexität.
Flexibilität	Die Flexibilität ist durch Lieferpläne und Vertragsbedingungen festgelegt. Eine kurzfristige Erhöhung der Wasserstoffmenge erfordert einen Diskurs mit den Lieferanten, ist jedoch jederzeit möglich.	Der benötigte Wasserstoff kann bei der Verfügbarkeit von nachhaltiger Energie dynamisch erzeugt werden. Somit kann eine Versorgung mit grünem Wasserstoff sichergestellt werden.
Umweltfreundlichkeit	Die Umweltfreundlichkeit hängt von der Herkunft des gelieferten Wasserstoffs ab (grauer, blauer oder grüner Wasserstoff). Der Transport des Wasserstoffs kann den CO ₂ -Fußabdruck erhöhen.	Eigenproduktion kann umweltfreundlich gestaltet werden, wenn grüner Strom (z. B. aus Solar- oder Windenergie) verwendet wird.
Technische Risiken	Risiken liegen hauptsächlich im Transport und der Lagerung von Wasserstoff, insbesondere bei kryogenem Wasserstoff aufgrund der extremen Bedingungen.	Die Eigenproduktion birgt Risiken im Betrieb der Elektrolyseure, der Wasserstoffkomprimierung oder -verflüssigung sowie in der Lagerung. Diese erfordern ein hohes technisches Know-how.
Abhängigkeit	Abhängigkeit von Lieferanten und deren Lieferfähigkeit. Ein Lieferengpass	Die Eigenproduktion minimiert externe Abhängigkeiten, setzt jedoch

pass kann die Versorgungssicherheit gefährden, dem sollte durch lokale Wasserstoffspeicherung vorgebeugt werden.

Wasserstoff im Rechenzentrum

Skalierbarkeit	Die Skalierbarkeit ist durch die Kapazitäten der Lieferanten und die Lagergröße begrenzt. Zusätzliche Lieferungen können bei hoher Nachfrage nicht immer sofort bereitgestellt werden.	Eine Skalierung ist aufgrund von verfügbarem Platz und finanziellen Mitteln schwierig. und mit erheblichen Aufwänden verbunden. Jedoch ist es prinzipiell möglich die Eigenproduktion größer zu dimensionieren.
----------------	--	---

Eine Beispielrechnung zur Verdeutlichung ist im Anhang 1 zu finden.

Im Zuge der Energiewende rücken innovative Konzepte zur Erhöhung der Effizienz sowie zur Nutzung erneuerbarer Energien in den Fokus. Ein vielversprechender Ansatz ist die Kopplung verschiedener Energiesektoren zur Optimierung des Energieverbrauchs. Der IPAI in Baden-Württemberg bietet ein ideales Umfeld, um neue Technologien und Konzepte für nachhaltige Rechenzentren zu entwickeln und zu erproben. Ziel der hier vorgestellten Untersuchung ist es, mithilfe einer Simulation verschiedene Konfigurationen eines nachhaltigen Energiesystems zu analysieren und deren wirtschaftliche sowie ökologische Potenziale zu bewerten. Auf Basis der beschriebenen Zielsetzung wird im Folgenden die methodische Vorgehensweise zur Simulation des Rechenzentrumökosystems vorgestellt. Neben dem zugrunde liegenden Simulations- und Optimierungsmodell umfasst die Methodik auch die Definition der Untersuchungskonzepte, welche die verschiedenen technologischen Ausprägungen und Systemkonfigurationen abbilden, die im Rahmen dieser Studie analysiert werden. Anschließend werden die verwendeten Inputdaten und Lastganganalyse beschrieben, gefolgt von der Vorstellung

Leitfragen des Kapitels:

- **Wie trägt die Simulation zur Bewertung nachhaltiger Energiesysteme für Rechenzentren bei?**

Die Simulation bildet Energieflüsse, Lastprofile und Wechselwirkungen der Systemkomponenten über ein ganzes Jahr ab und ermöglicht dadurch die techno-ökonomische Optimierung hinsichtlich Kosten, Emissionen und Effizienz. Sie liefert eine fundierte Entscheidungsgrundlage, indem unterschiedliche Konfigurationen systematisch miteinander verglichen und hinsichtlich ihrer ökologischen und wirtschaftlichen Wirkung bewertet werden.

- **Welche Rolle spielen Inputdaten und Modellparameter für die Aussagekraft der Simulation?**

Die Simulation basiert auf detaillierten Zeitreihen zur PV-Erzeugung, Lastprofilen sowie technologie- und modellbasierten Parametern, die die Leistungsfähigkeit aller Komponenten definieren. Diese präzisen Eingabedaten stellen sicher, dass die Ergebnisse realistische energetische, technische und wirtschaftliche Aussagen ermöglichen.

- **Welche zentralen Erkenntnisse liefern die untersuchten Versorgungskonzepte im Hinblick auf Emissionen und Kosten?**

Es zeigt sich, dass klassische Konzepte mit reiner Kältetechnik weder ökonomisch noch ökologisch tragfähig sind, während Abwärmenutzung, PV und Batteriespeicher deutliche Verbesserungen bringen. Reine Wasserstofflösungen schneiden schlecht ab, entfalten jedoch in Kombination mit PV, Speichern und Wärmenutzung ihr Potenzial.

- **Welche Bedeutung hat die Kombination verschiedener Technologien für die Dimensionierung und Effizienz des Gesamtsystems?**

Die Simulation verdeutlicht, dass die optimale Dimensionierung von PV, Batteriespeichern und Wasserstoffkomponenten stark vom gewählten Technologieverbund abhängt und nur integrierte Konzepte niedrige Kosten und Emissionen ermöglichen. Technologien wie Abwärmenutzung, dynamische Strompreise oder Wasserstoff beeinflussen die Systemauslegung maßgeblich und führen je nach Kombination zu unterschiedlichen Flexibilitäts- und Effizienzgewinnen.

der Simulationsergebnisse. Basierend auf den Simulationsergebnissen erfolgt eine Bewertung der Ergebnisse der untersuchten Konzepte, bevor die wesentlichen Erkenntnisse im Fazit zusammengefasst werden.

5.1 Methodik und Untersuchungskonzepte

Zur Evaluierung der identifizierten Konzepte wird ein Simulationsmodell entwickelt, das auf Grundlagendaten und Lastprofilen basiert. Dieses Modell zur techno-ökonomischen Optimierung von lokalen Multi-Energie-Systemen simuliert die Energieflüsse eines Rechenzentrums über ein ganzes Jahr und erlaubt eine detaillierte Analyse der Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Systemkomponenten und deren Regelalgorithmen, um optimale Betriebsszenarien hinsichtlich Kosten, Emissionen oder Pareto-Effizienz zu ermitteln (siehe Abbildung 5). Zusätzlich werden dynamische Zeitreihen analysiert, darunter variable CO₂-Emissionsfaktoren [28] und Strompreise. Die Simulation bietet eine parallele Szenarioberechnung für eine effiziente Entscheidungsfindung. Kernaspekte der Simulation umfassen:

- Sektorenkopplung: Die Einbindung und Vernetzung verschiedener Energiesektoren, um Synergien zwischen Strom-, Wärme- und Speichersystemen zu nutzen.
- Mathematische Optimierung: Anwendung der gemischt-ganzzahligen linearen Programmierung zur Optimierung der Anlagendimensionierung und des Betriebsverhaltens.
- Komponenten des Energiesystems: Modellierung und Integration verschiedener Energiequellen und Speichersysteme:
 - o Elektrische Infrastruktur: Netzanschluss (Grid), Photovoltaik (PV), stationäre Batteriespeicher
 - o Thermische Infrastruktur: Nahwärmenetz, Abwärmenutzung, Adsorptionskältemaschine, Kältemaschine
 - o Wasserstofftechnologie: Brennstoffzelle, Elektrolyseur, Wasserstoffspeicherung

Die gemischt-ganzzahlige Optimierung (MILP) liefert eine fundierte Entscheidungsgrundlage für die nachhaltige Gestaltung von Rechenzentren, indem sie eine Vielzahl von Konfigurationen systematisch hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit und ökologischen Auswirkungen bewertet. Dabei werden nicht nur traditionelle Kennzahlen wie Investitions- und Betriebskosten, sondern auch Umweltaspekte wie CO₂-Emissionen und Energieeffizienz berücksichtigt. Die daraus gewonnenen Ergebnisse ermöglichen es, unterschiedliche Handlungsoptionen zu identifizieren und zu vergleichen – sei es zur Optimierung der Energieflüsse, zur Integration erneuerbarer Energien oder zur Verbesserung der Regelalgorithmen einzelner Systemkomponenten. Im Kontext des IPAI liefert die Analyse konkrete Ansatzpunkte für die Implementierung zukunftsicherer Technologien in Rechenzentren, die sowohl den ökonomischen als auch den ökologischen Herausforderungen gerecht werden. Darüber hinaus können die gewonnenen Erkenntnisse als Blaupause für weitere Rechenzentrumsprojekte dienen, indem sie Entscheidungsträgern einen transparenten Überblick über die Effekte verschiedener Energiesystemkonfigurationen bieten und so den Weg für innovative und nachhaltige Investitionen ebnen.

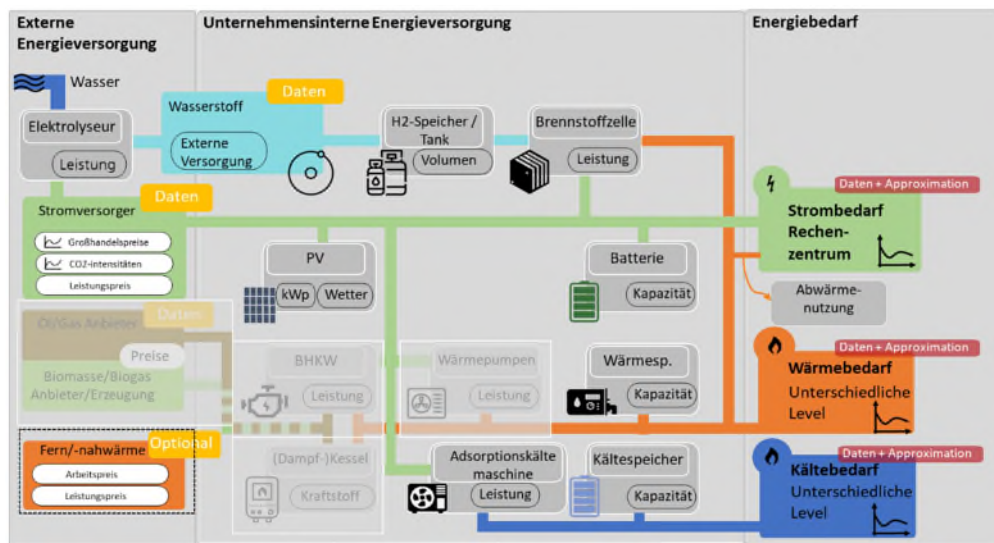


Abbildung 5: Superstruktur des Simulationsmodells

Das beschriebene Simulationsmodell bildet die Grundlage für die systematische Analyse unterschiedlicher Auslegungs- und Betriebsstrategien. Aufbauend auf diesem Modell werden im nächsten Schritt verschiedene Untersuchungskonzepte als Beispiele für mögliche Umsetzungen definiert. Die verschiedenen Szenarien berücksichtigen unterschiedliche Technologien zur Kühlung, Abwärmenutzung sowie zur Integration erneuerbarer Energiequellen. Die entsprechenden Simulationsansätze zur Optimierung des Energieverbrauchs und der Kühlung in Rechenzentren sind in Tabelle 9 zusammengefasst. Eine detaillierte Beschreibung der Konzepte findet sich im Anhang 2.

Tabelle 9: Beschreibung der Untersuchungskonzepte

Konzept	(Energie-)Komponenten
1	Elektrischer Bedarf, Thermischer Bedarf, Stromnetz, Nahwärmenetz, Kompressionskältemaschine, 45 °C, 55 °C, 65 °C
2	Elektrischer Bedarf, Thermischer Bedarf, Stromnetz, Nahwärmenetz, Adsorptionskühlung, 45 °C, 55 °C, 65 °C
3	Elektrischer Bedarf, Thermischer Bedarf, Stromnetz, Nahwärmenetz, Nutzung der Abwärme (direkt für Heizkreislauf/Warmwasservorbereitung), Adsorptionskühlung, 45 °C, 55 °C, 65 °C
4	Konzept 1 + PV und Batteriespeicher (Freie Dimensionierung und Optimierung)
5	Konzept 2 + PV und Batteriespeicher (Freie Dimensionierung und Optimierung)
6	Konzept 3 + PV und Batteriespeicher (Freie Dimensionierung und Optimierung)
7	Konzept 3 + Wasserstoffkomponenten (Elektrolyseur, Brennstoffzelle, Wasserstoffspeicherung) (Freie Dimensionierung und Optimierung)
8	Einführung RTP (Spotmarket) für Konzepte 1, 2 und 3 Nur für 55 °C Abwärme (Freie Dimensionierung und Optimierung)

9	Konzept 8 + PV und Batteriespeicher nur für 55 °C Abwärme (Freie Dimensionierung und Optimierung)	Simulation des Rechenzentrumökosystems
10	Paretoanalyse in 6 Inkrementsschritten (Kosten vs. Emissionen) Nutzung der Abwärme (55 °C), Alle Komponenten möglich (Freie Dimensionierung und Optimierung)	
11	0-90 % der Lastspitzen des maximalen Energiebedarfs durch H2-Komponentenabdeckung, Nutzung der Abwärme (55 °C), kein BES und keine PV (Freie Dimensionierung und Optimierung)	
12	20 % und 80 % der Lastspitzen des maximalen Energiebedarfs durch H2-Komponentenabdeckung, Nutzung der Abwärme (55 °C), Alle Komponenten möglich (Freie Dimensionierung und Optimierung)	

5.2 Inputdaten

Für die Anwendung des beschriebenen Simulations- und Optimierungsansatzes sind belastbare Eingangsgrößen erforderlich, die die energetischen und betrieblichen Rahmenbedingungen des Rechenzentrums realistisch abbilden. Im folgenden Abschnitt werden daher die verwendeten Inputdaten sowie die maßgeblichen energetischen Rahmenbedingungen vorgestellt.

Modellparameter

Die photovoltaische Stromerzeugung pro installiertem Kilowattpeak (kWp) kann in dieser Studie als exogene Variable betrachtet werden. Die Zeitreihen für die PV-Stromerzeugung auf einem Flachdach wurden mithilfe des Global Solar Energy Estimator (GSEE) [29] generiert (vgl. Abbildung 6). Dabei kamen historische Daten zur Lufttemperatur sowie Messungen der Sonneneinstrahlung aus dem simulierten Wohnquartier zum Einsatz, die über die Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes (DWD) erfasst wurden.

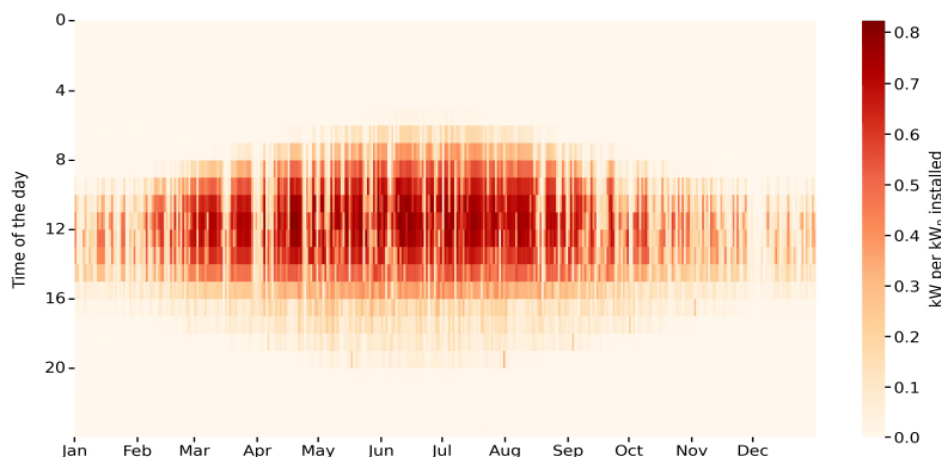


Abbildung 6: Historisches Stromerzeugungsprofil pro kWp installierter Leistung der simulierten PV-Anlage

Die Modellierung des Frameworks hängt von einer Vielzahl von Parametern ab, darunter Technologieparameter, technische Einschränkungen, Wirkungsgrade, Batteriechemie und generellen praktischen Methoden. Für die Simulation werden die folgenden hergeleiteten technologischen und modellbasierten Parameter aufgeführt, basierend auf der einschlägigen Literatur. Diese Annahmen sind für alle Untersuchungskonzepte

gültig. Die allgemeinen Modellparameter werden in Tabelle 10, die technologiespezifischen Parameter in Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 10: Allgemeine Modellparameter

Parameter	Wert
Lastprofil elektrisch	Rechenzentrum: 2,34 GWh
Lastprofil thermisch	Referenzwärmebedarf von 1 GWh
Leistungspreis Netz	150 €/kW
Zeitschritt Δt	15 min
Simulationsperiode	1 Jahr
Diskontierungssatz r	6%
Strompreis	19,14 ct/kWh bzw. 15-minütiger Spotmarktpreis (RTP)
Spitzenlast	3796 kW (Stresstests)
Durchschnittslast	267.28 kW

Tabelle 11: Technologieparameter der untersuchten Energiesystemkomponenten [30], [31], [32], [33]

Technologie	Spezifische Investmentkosten (€/Basis)	RMI (%/a)	Wirtschaftl. Lebensdauer (a)	Input	Effizienz	Output
Elektrolyseur	1295	3,5	14	Elektr.	71 %	H ₂
Brennstoffzelle	1684	3,8	14	H ₂	50 %	Elektr.
Brennstoffzelle	-	-	-	H ₂	34 %	Wärme
PV	1000	2	25	vorgegebenes Profil		Elektr.
Adsorptionskältemaschine	760	1	12	Wärme	0,65 (COP)	Kälte
Kältemaschine	650	2	15	Elektr.	3,1 (COP)	Kälte
Wasserstoffspeicher	10	0,1	23	H ₂	90 %/Zyklus	H ₂
Batteriespeicher	720	2	20	Elektr.	95 %/Zyklus	Elektr.

Das simulierte Rechenzentrum hat einen jährlichen Stromverbrauch von 2,34 GWh und mit einer durchschnittlichen elektrischen Leistungsaufnahme von 276,28 kW wird eine adäquate Kühlstrategie erfordert, um den thermischen Energiehaushalt effizient zu regulieren. Der erforderliche Kühlbedarf ist maßgeblich vom (PUE)-Wert abhängig (siehe Kapitel 2.1), welcher das Verhältnis des gesamten Energieverbrauchs zur reinen IT-Last beschreibt. Da nahezu die gesamte elektrische Energie in Wärme umgewandelt wird, entspricht die minimale erforderliche Kühlleistung im Idealfall der aufgenommenen IT-Leistung. Unter der Annahme eines PUE-Werts von 1,5 ergibt sich eine Gesamtenergieaufnahme des Rechenzentrums, die 50 % über der IT-Leistung liegt. Dies bedeutet, dass im Durchschnitt etwa 138 kW für die Kühlung aufgewendet werden müssen. In Phasen hoher Last, insbesondere bei Stresstests, steigt die elektrische Leistungsaufnahme auf einen Spitzenwert von 3.796 kW, was eine signifikante Erhöhung des Kühlbedarfs nach sich zieht. Bei einem PUE von 1,5 würde der Gesamtstromverbrauch, während dieser Peak-Phasen auf 5,7 MW ansteigen, wovon etwa 1,9 MW ausschließlich für die Kühlung erforderlich wären. Diese Werte verdeutlichen die Notwendigkeit einer skalierbaren und energieeffizienten Kühlstrategie, insbesondere für den Fall hoher thermischer Lasten. Die Wahl einer optimalen Kühltechnologie ist daher entscheidend, um eine zuverlässige thermische Stabilität über verschiedene Lastszenarien hinweg zu gewährleisten.

Lastganganalyse

Eine zentrale Eingangsgröße für die Simulation stellt das elektrische Lastprofil des betrachteten Rechenzentrums dar. Um die charakteristischen Eigenschaften dieses Lastgangs sowie dessen Einfluss auf die Auslegung und den Betrieb des Energiesystems besser einordnen zu können, wurde eine detaillierte Lastanalyse durchgeführt.

Abbildung 7 zeigt die Analyse des Lastprofils für das Jahr 2021. Die obere Grafik zeigt statistische Kennzahlen, während die untere Grafik den Lastverlauf über das Jahr darstellt. Auffällig ist die hohe maximale Leistung von 3.796 kW, während der Durchschnittswert mit 267 kW deutlich niedriger liegt. Dies führt zu einem hohen Peak-to-Average-Ratio von 14,2, was auf extreme Lastspitzen hindeutet. Die Lastkurve in der unteren Grafik zeigt regelmäßige Spitzenlasten (Stresstests). Der Großteil der Leistung bleibt jedoch auf einem wesentlich niedrigeren Niveau. Die Berechnung verschiedener Perzentile in der Grafik (Abbildung 7) zeigt das Potenzial zur Spitzenlastreduktion, wodurch durch gezieltes Lastmanagement die Netzbelastung verringert und Energiekosten gesenkt werden könnten.

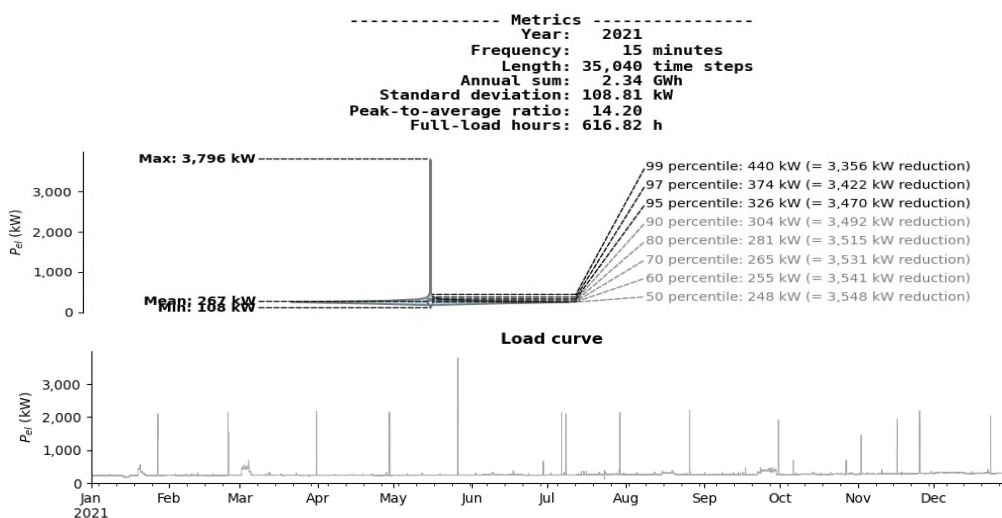


Abbildung 7: Lastanalyse des Rechenzentrums

Optimierungsproblem

Die Zielfunktion des MILP-Problems besteht in der Minimierung der annualisierten Gesamtkosten (aGK) in €/Jahr. Die aGK umfassen Investitionsausgaben (CapEx) und Betriebskosten (OpEx), siehe Gleichung (1).

$$aGK_{min} = CapEx + OpEx \quad (1)$$

Die CapEx stellen die auf das Jahr umgerechneten Investitionskosten für alle technischen Komponenten im Technologiesatz dar. Diese sind für das Rechenzentrum:

- Adsorptionskältemaschine, Kältemaschine
- Brennstoffzelle, Elektrolyseur, Wasserstoffspeicherung
- Photovoltaikanlage
- Stationärer Batteriespeicher

$$CapEx = \sum_{k \in K} a(r, n_k) c_k^{inv} P_k^{capn} \quad (2)$$

wobei c_k^{inv} die spezifischen Investitionskosten und P_k^{capn} die Nennkapazität der Technologie $k \in K$ ist. $a(r, n_k)$ ist der Annuitätsfaktor der Komponente k als Funktion des Diskontierungssatzes r und der wirtschaftlichen Lebensdauer n_k in Jahren, siehe Gleichung (3).

$$a(r, n_k) = \frac{r(1+r)^{n_k}}{(1+r)^{n_k} - 1} \quad (3)$$

Die Betriebskosten (OpEx) eines Energiesystems hängen direkt davon ab, wie die einzelnen Komponenten in der Optimierung ausgelegt werden. Je nachdem, welche Technologien mit welcher Kapazität und Leistungsfähigkeit in das System integriert werden, verändern sich die laufenden Kosten. Wenn beispielsweise ein größerer Batteriespeicher oder eine größere Photovoltaikanlage gewählt wird, kann dies die Abhängigkeit vom Stromnetz reduzieren und damit die Ausgaben für den externen Strombezug senken. Gleichzeitig können höhere Investitionen in langlebigere oder effizientere Komponenten langfristig die Betriebskosten beeinflussen. Die Optimierung bestimmt, welche Technologien in welcher Größe zum Einsatz kommen, wie viel Energie selbst erzeugt, gespeichert oder zugekauft wird und welche Wartungs- und Reparaturkosten dadurch anfallen. Somit sind die Betriebskosten das direkte Ergebnis der getroffenen Entscheidungen zur Systemauslegung und Investitionsstrategie.

Die Energieumwandlungstechnologien – Elektrolyseur, Brennstoffzelle, Adsorptionskältemaschine und Kältemaschine – werden in der Modellierung durch eine lineare (Elektrolyseur und Brennstoffzelle) oder von mehreren Faktoren abhängige Beziehung zwischen der zugeführten und der abgegebenen Leistung beschrieben. Die abgegebene Energie (Output) unterliegt einer Funktion, die durch die spezifischen Wirkungsgrade oder den Coefficient of Performance (COP) der jeweiligen Technologie bestimmt wird. Der COP wird hierbei als eine dynamische, zeitabhängige Größe betrachtet. Eine genaue Berechnung des COP erfolgt unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen den Systemkomponenten und durch vorgegebene Temperaturlevels bzw. Unterschiede. Diese Beziehung kann durch folgende Gleichung ausgedrückt werden: (siehe Tabelle 11).

$$P_t^{in} = \eta P_t^{out} \text{ bzw. } f(COP_t) \forall t \quad (4)$$

$$P_t^{out} \leq P^{Kapazität} \forall t \quad (5)$$

Diese Beziehung stellt sicher, dass die Effizienz der jeweiligen Technologie korrekt berücksichtigt wird. Der Wirkungsgrad beschreibt dabei den Anteil der Eingangsenergie,

der tatsächlich in die gewünschte Energieform umgewandelt wird. Ein höherer Wirkungsgrad bedeutet also eine effizientere Nutzung der eingesetzten Energie. Zusätzlich wird sichergestellt, dass die Ausgangsleistung P_t^{out} zu jedem Zeitpunkt die maximal verfügbare Kapazität der jeweiligen Technologie $P^{Kapazität}$ nicht überschreitet. Das bedeutet, dass jede Umwandlungstechnologie nur bis zu ihrer maximalen Leistungsgrenze betrieben werden kann. Diese Beschränkung stellt sicher, dass das Modell realistisch bleibt und keine unrealistischen Energieflüsse berücksichtigt werden.

Der Speichertechnologien werden als ein Energiespeichersystem modelliert. Die Einschränkungen für die Speichertechnologien sind analog zu betrachten und werden beispielhaft für den Batteriespeicher erläutert. Gleichung (6) drückt den Ladezustand (SOC) des Speichers zu jedem Zeitschritt $t > 0$ aus. In (7) wird der SOC durch die maximale SOC-Kapazität begrenzt. Darüber hinaus beschränken die Gleichungen in (8) und (9), die Entlade- und Ladeleistung.

$$E_t^{BES} = E_{t-1}^{BES} + \Delta t \left(\eta_i^{BES} P_t^{BES, ch} - \frac{P_t^{BES, dis}}{\eta_i^{BES}} \right) \quad \forall t, \text{ if } t > 0 \quad (6)$$

$$E_t^{BES} \leq E^{BES, cap} \quad \forall t \quad (7)$$

$$P_t^{BES, ch} \leq CR^{BES, ch} E^{BES, cap} y_t^{BES, ch} \quad \forall t \quad (8)$$

$$P_t^{BES, dis} \leq CR^{BES, dis} E^{BES, cap} y_t^{BES, dis} \quad \forall t \quad (9)$$

5.3 Ergebnisse der Untersuchungskonzepte

Auf Basis der beschriebenen Methodik, der definierten Untersuchungskonzepte sowie der zugrunde gelegten Inputdaten wurden die Simulationen für die verschiedenen Szenarien durchgeführt. Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Untersuchungskonzepte dargestellt und hinsichtlich ihrer ökonomischen und ökologischen Auswirkungen analysiert.

Abbildung 8 zeigt die jährlichen CO₂-Emissionen in Relation zu den annualisierten Kosten für die Versorgungskonzepte aus Tabelle 9 und Tabelle 10. Deutlich erkennbar ist, dass die Konzepte K1 und K2, welche auf klassische Technologien wie Kompressions-

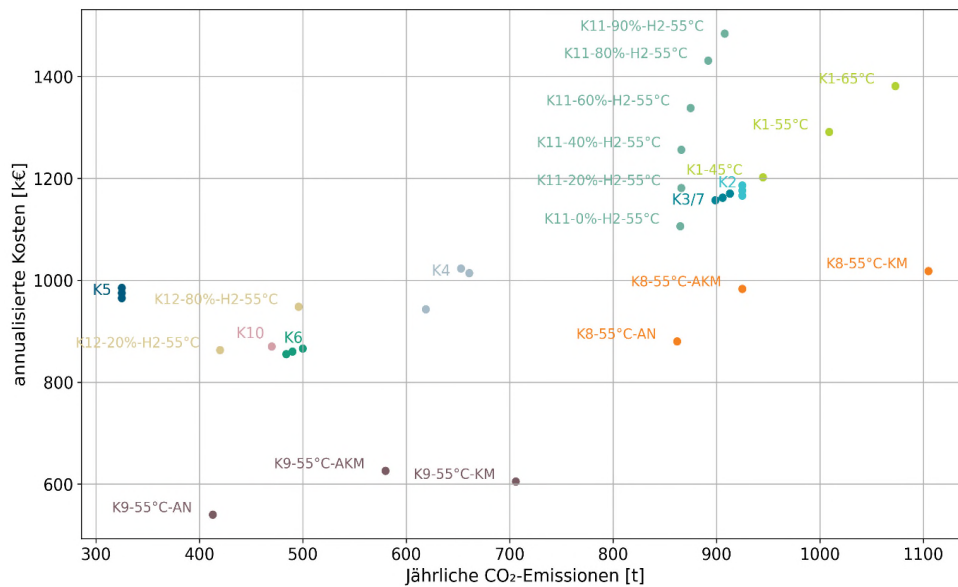


Abbildung 8: CO₂-Emissionen vs. annualisierte Kosten für die Untersuchungskonzepte (KM = Kompressionskältemaschine, AKM = Adsorptionskältemaschine, AN = Abwärmenutzung)

oder Adsorptionskältemaschinen ohne weitere technische Ergänzungen setzen, sowohl die höchsten Emissionen (bis zu 1100 CO₂-Emissionen t/a) als auch die höchsten Kosten (über 1300 k€/a) verursachen. Diese Varianten sind weder aus ökologischer noch ökonomischer Sicht langfristig tragfähig. Im Gegensatz dazu zeigt Konzept K3, das industrielle Abwärme nutzt, ein deutlich besseres Verhältnis zwischen Emissionen und Kosten. Die zusätzliche Nutzung von Abwärme senkt die Emissionen signifikant, ohne die Kosten wesentlich zu erhöhen. Es wird ersichtlich, dass die Einbindung von Abwärme eine der wirkungsvollsten Einzelmaßnahmen zur Emissionsreduktion darstellt.

Mit Integration von PV und Batteriespeichern (Konzepte K4 bis K6) lassen sich die Emissionen nochmals verringern. Besonders hervorzuheben ist K5, das auf dem konventionellen Konzept K2 basiert und durch die Ergänzung um PV und Batteriespeicher eine deutliche Emissionsreduktion auf etwa 330 t/a erzielt. Damit zeigt sich, dass auch ohne die Nutzung industrieller Abwärme eine signifikante ökologische Verbesserung möglich ist, wenngleich das Einsparpotenzial hinter jenen Konzepten zurückbleibt, die thermische Synergien nutzen. In anderen Fällen, wie bei K4, steigen die Kosten durch die zusätzlichen Investitionen leicht, was auf die notwendige Dimensionierung von Speicher- und PV-Anlagen zurückzuführen ist. Dennoch bleibt der Nutzen im Verhältnis zu den Emissionsvorteilen nachvollziehbar. Die Kombination von Eigenerzeugung durch PV mit Abwärmenutzung zeigt sich als besonders effektiv.

Die Einbindung von Wasserstofftechnologien (Konzepte K7, K11 und K12) bringt gemischte Ergebnisse. Während K7, das auf K3 basiert und um H₂-Komponenten ergänzt wurde, keinen Nutzen zeigt, wird bei K11 deutlich, dass ein hoher erforderlicher Wasserstoffanteil mit einem deutlichen Anstieg der Kosten einhergeht. Erst in K12, wo Wasserstoff mit PV, Batterie und Abwärmenutzung kombiniert wird, lassen sich sowohl die Emissionen als auch die Kosten spürbar senken. Es ist jedoch zu beachten, dass bei einem H₂-Anteil von mindestens 80 % an den Lastspitzen des maximalen Energiebedarfs im Jahr die Kosten und auch die Emissionen deutlich ansteigen. Dies verdeutlicht, dass Wasserstoff allein kaum Effizienzvorteile bringt, jedoch im Verbund mit anderen Technologien zu einem insgesamt positiven Ergebnis führen kann.

Ein weiterer Aspekt ist die Einführung dynamischer Strompreise (RTP). Konzept K8, bei dem diese Preisstruktur isoliert betrachtet wird, bringt keinen klaren Kostenvorteil. Erst durch die Kombination mit PV und Speichern in Konzept K9 entsteht ein hoch attraktives Gesamtbild: K9 erreicht sowohl niedrige Emissionen (~400–700 t/a) als auch die geringsten annualisierten Kosten im gesamten Vergleich (~550–630 k€/a). Daraus lässt sich schließen, dass flexible Strompreise ihr Potenzial erst in Verbindung mit entsprechenden Flexibilitätsoptionen wie Batteriespeichern und Eigenstromerzeugung entfalten können.

Ein besonderes Highlight stellt Konzept K10 dar, das als Ergebnis einer Pareto-Analyse eine ausgewogene Balance zwischen Emissionen und Kosten anstrebt. Dabei wurde der Durchschnitt der sechs Pareto-optimalen Lösungen herangezogen, wobei die Variante mit ausschließlichem Fokus auf die Minimierung der CO₂-Emissionen nicht berücksichtigt wurde. Diese Konfiguration erwies sich als unrealistisch und wirtschaftlich nicht tragfähig, weshalb sie aus der Bewertung ausgeschlossen wurde, um ein ausgewogeneres und praxisnäheres Bild zu gewährleisten. Somit erreicht K10 mit moderaten Kosten von etwa 850 k€/a und CO₂-Emissionen von rund 470 t/a ein ausgewogenes Ergebnis. Das Konzept zeigt, dass durch eine gezielte, technologieoffene Systemoptimierung sowohl ökologische als auch ökonomische Zielgrößen effektiv in Einklang gebracht werden können.

Insgesamt sticht das Konzept K9 als besonders effizient hervor. K9 überzeugt durch minimalen Ressourceneinsatz bei gleichzeitig maximaler Wirkung in Bezug auf Emissionsvermeidung und Kosteneffizienz. K12 wiederum bietet durch eine abgestimmte

Kombination aus H₂-Technologien, PV, Batteriespeicher und Abwärmenutzung eine ausgewogene Lösung mit Vorteil gegenüber Konzepten mit Einzelmaßnahmen. Die Analyse macht deutlich, dass die besten Ergebnisse durch eine intelligente Verknüpfung verschiedener Technologien erreicht werden. Klassische Systeme ohne Weiterentwicklung sind dagegen nicht mehr wettbewerbsfähig. Zukünftige Energieversorgungskonzepte sollten daher auf Technologiekombinationen setzen, die sowohl auf Effizienz als auch auf Flexibilität ausgerichtet sind.

Simulation des
Rechenzentrumökosystems

Die Ergebnisse der Abbildung 9 zeigen die Dimensionierung der zwei Technologien –

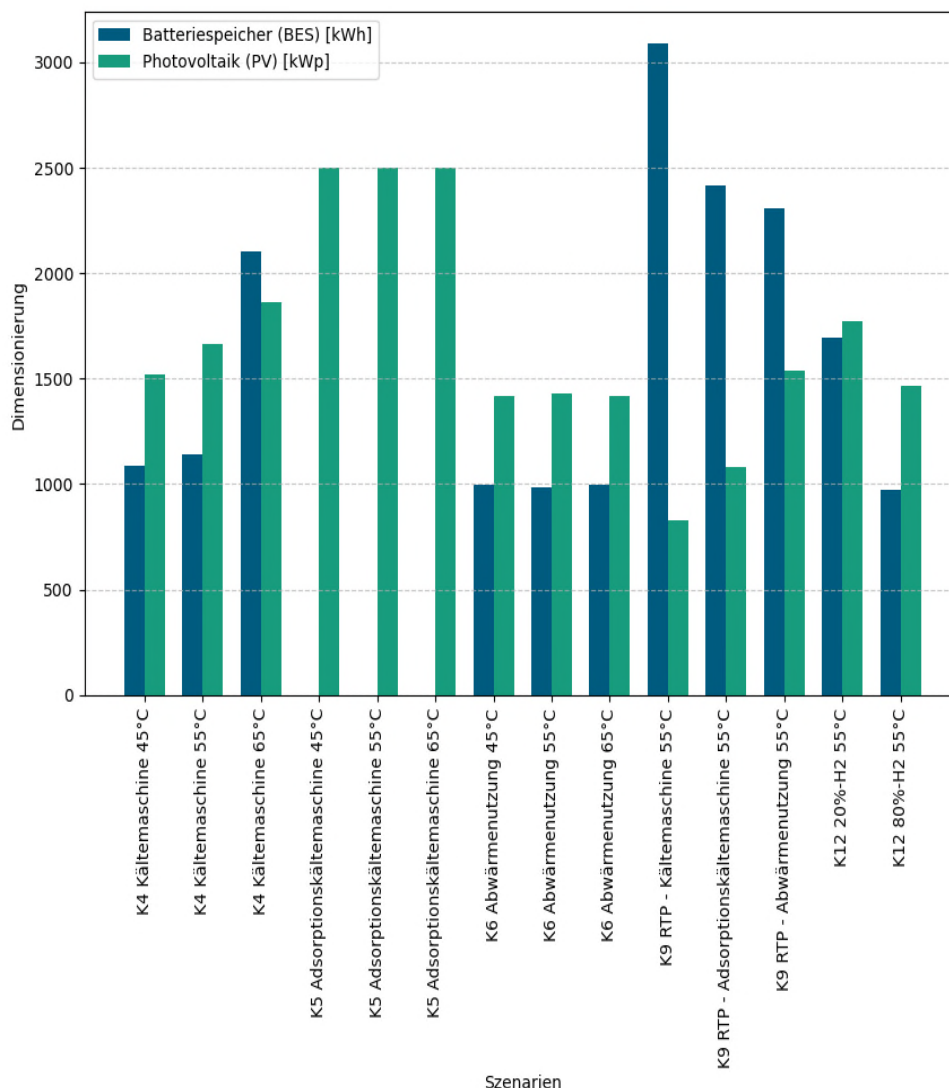


Abbildung 9: Vergleich der Dimensionierung von Batteriespeicher und Photovoltaik

Batteriespeicher (BES) in Kilowattstunden (kWh) und Photovoltaik (PV) in Kilowatt-Peak (kWp) – für die untersuchten Szenarien, die eine Dimensionierung für PV und BES erlauben. Die Analyse der Dimensionierung von PV und BES verdeutlicht, wie unterschiedliche Konzeptansätze und Technologiekombinationen die Systemauslegung prägen. Im Szenario K4 zeigt sich eine ausgewogene Dimensionierung der Komponenten: Die PV-Anlagen liegen bei 1500–1800 kWp, während die Batteriespeicher bei 45 °C und 55 °C mit 1000–1250 kWh vergleichsweise moderat dimensioniert sind. Auffällig ist jedoch der extreme Anstieg der BES-Kapazität auf 21.00 kWh bei 65 °C. Dies deutet auf einen erhöhten Speicherbedarf hin, bedingt durch eine höhere elektrische Last für

die Kühlung in Kombination mit den Leistungsspitzen. Die PV-Dimensionierung bleibt dabei stabil, was auf eine priorisierte Nutzung von Solarenergie hindeutet.

Im Szenario K5 fällt die PV-Dimensionierung mit etwa 2500 kWp deutlich höher aus, während Batteriespeicher als unwirtschaftlich eingestuft und nicht dimensioniert werden. Die Szenarien zur Abwärmenutzung (K6) zeigen hingegen eine stabile Auslegung: Die PV-Kapazität liegt knapp unter 1500 kWp, und die BES-Systeme sind konstant bei etwa 1000 kWh dimensioniert – unabhängig von der Temperaturstufe (45 °C, 55 °C, 65 °C). Dies unterstreicht die Effizienz der direkten Abwärmenutzung, die den Gesamtenergiebedarf senkt und somit geringere PV- und Speicherkapazitäten erfordert. Die Stabilität über alle Temperaturstufen deutet zudem auf ein robustes Systemdesign hin, das weniger anfällig für Lastschwankungen ist.

Ein markantes Ergebnis liefert das Szenario K9 RTP: Hier erreicht der Batteriespeicher mit 2300–3100 kWh eine außergewöhnlich hohe Dimensionierung, während die PV-Anlage mit 800–1500 kWp vergleichsweise gering ausfällt. Dieses Muster zeigt, dass volatile Energiepreise die Wirtschaftlichkeit von Speichersystemen stark begünstigen, um Strom zu Niedrigpreiszeiten zu speichern und bei Preisspitzen einzuspeisen. Die PV-Anlage spielt hier eine unterstützende Rolle, während der BES zum zentralen Flexibilitätsinstrument wird.

Die Wasserstoff-Szenarien (K12) verdeutlichen den Einfluss von H₂-Integration auf die Systemdimensionierung: Bei 20 % Deckung der Lastspitzen des maximalen Energiebedarfs sind PV und BES nahezu identisch dimensioniert (ca. 1700 kWp bzw. kWh), was auf eine ausgewogene Ergänzung der Technologien hindeutet. Steigt der Wasserstoffanteil jedoch auf 80 %, sinken beide Kapazitäten deutlich – die PV liegt bei etwa 1500 kWp, der BES bei 1000 kWh. Dies lässt sich durch die Substitutionswirkung von Wasserstoff erklären: Je höher der Anteil der H₂-Komponenten (Elektrolyseur, Brennstoffzelle, Speicher), desto stärker können PV und BES reduziert werden. Die PV bleibt jedoch dominant, was ihre Rolle als primäre Energiequelle für die Wasserstofferzeugung unterstreicht.

Die Ergebnisse reflektieren grundlegende Prinzipien der Energiesystemplanung:

1. **Technologieabhängigkeit:** Die Wahl der Kältetechnik (Kompressions- vs. Adsorptionsmaschine) oder die Nutzung von Abwärme beeinflusst die PV-/BES-Dimensionierung maßgeblich. Kompressionskühlung erfordert hohe PV-Kapazitäten, Abwärmenutzung stabilisiert das System.
2. **Preisdynamik:** Szenarien mit dynamischen Tarifen verschieben den Fokus auf Speicherlösungen, da diese zur Kostenoptimierung beitragen.
3. **Wasserstoff:** H₂-Integration reduziert die Abhängigkeit von PV und BES, zeigt aber Grenzen auf – die PV bleibt auch bei hohen H₂-Anteilen unverzichtbar zur Deckung des Grundlastbedarfs oder zur Versorgung der Elektrolyseure.
4. **Temperaturabhängigkeit:** Extreme Temperaturen (z.B. 65 °C in K4) können den Speicherbedarf drastisch erhöhen, was auf komplexe Wechselwirkungen zwischen thermischer und elektrischer Last hindeutet.

Diese Erkenntnisse sind entscheidend für die Planung zukunftsfähiger Energiesysteme: Sie zeigen, dass eine intelligente Kombination aus erneuerbaren Energien, Speichern und alternativen Technologien (wie Wasserstoff) die Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit optimieren kann. Gleichzeitig unterstreichen sie, dass kein universelles »Optimaldesign« existiert – die Auslegung muss stets an konkrete Randbedingungen wie Lastprofile, Preismechanismen und verfügbare Infrastruktur angepasst werden.

5.4 Fazit der Simulationsergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationen verdeutlichen, dass die Entwicklung nachhaltiger und ökonomisch tragfähiger Energieversorgungskonzepte maßgeblich von der optimalen Kombination und Integration verschiedener Technologien abhängt. Konzepte, die nur auf klassischen Technologien wie Kompressions- oder Adsorptionskältemaschinen (K1 und K2) basieren, sind sowohl in ökologischer als auch in ökonomischer Hinsicht langfristig nicht wettbewerbsfähig. Diese Konzepte verursachen hohe CO₂-Emissionen und hohe annualisierte Kosten, was ihre Eignung für eine zukunftsfähige Energieversorgung in Frage stellt. Die Bedeutung dieser Konzepte liegt darin, dass sie als Ausgangspunkt für den Vergleich mit innovativeren Technologien dienen und die Notwendigkeit von Veränderungen im Systemdesign verdeutlichen.

Im Gegensatz dazu zeigen Konzepte, die auf die Nutzung industrieller Abwärme (K3), Photovoltaik oder Batteriespeicher setzen, signifikante Vorteile sowohl in der Emissionsreduktion als auch in der Kostenoptimierung. Besonders hervorzuheben ist Konzept K9, das durch die Integration dynamischer Strompreise in Verbindung mit PV und Batteriespeichern herausragende Ergebnisse erzielt. Es erreicht sowohl niedrige CO₂-Emissionen als auch eine Minimierung der jährlichen Kosten und stellt damit eine besonders effiziente Lösung dar.

Auch Konzept K12, das die Kombination von Wasserstofftechnologien mit PV, Batteriespeichern und Abwärmenutzung beinhaltet, bietet eine ausgewogene Lösung, die sowohl ökologische als auch ökonomische Vorteile vereint. Dabei wird jedoch deutlich, dass die Integration von Wasserstoff in Kombination mit anderen Technologien eine weitaus effektivere Strategie darstellt als der alleinige Einsatz von Wasserstofftechnologien, der kaum wirtschaftlich ist.

Die Analyse der Dimensionierung von PV und BES zeigt, dass diese stark von den jeweiligen Technologien abhängt. Konzepte, die Abwärme oder Wasserstoff integrieren, erlauben eine effizientere Auslegung der PV- und Batteriespeicherkapazitäten und reduzieren somit die Gesamtkosten. Insbesondere in Szenarien mit flexiblen Stromtarifen werden Batteriespeicher als zentrale Flexibilitätsinstrumente zur Kostenoptimierung und Emissionsreduktion identifiziert, da sie eine effiziente Nutzung von Strom zu Niedrigpreisspitzen ermöglichen.

Die Simulationsanalyse zeigt, dass die besten Ergebnisse in Bezug auf ökologische und ökonomische Zielgrößen durch eine gezielte Kombination und Integration unterschiedlicher Technologien erzielt werden. Zukünftige Energieversorgungskonzepte sollten daher auf ein ganzheitliches Systemdesign setzen, das sowohl Flexibilität als auch Effizienz maximiert. Die ausschließliche Verwendung traditioneller Technologien reicht nicht mehr aus, um den komplexen Anforderungen einer nachhaltigen und kosteneffizienten Energieversorgung gerecht zu werden. Eine Weiterentwicklung hin zu integrierten, technologieübergreifenden Lösungen ist unerlässlich, um langfristig wettbewerbsfähig und zukunftsfähig zu bleiben.

Zusammenfassung und Diskussion

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein umfassender Überblick über die Funktionsweise eines Rechenzentrums mit Fokus auf das Energiesystem geschaffen. Dabei standen sowohl aktuell verwendete als auch zukünftig interessante Technologien, hauptsächlich im Bereich der Kühlung, im Zentrum. Im Lauf der Arbeit wurden viele Möglichkeiten zur Einsparung von Energie und der Steigerung der Nachhaltigkeit identifiziert und evaluiert. Dabei kristallisierte sich heraus, dass Kühlung der größte Hebel ist. Das liegt darin begründet, dass die benötigte Energie für den Betrieb der IT-Hardware praktisch vollständig in Wärme umgesetzt wird. Durch steigende Bedarfe aufgrund des vermehrten Einsatzes und der Entwicklung von KI, steigt folglich auch die Wärmeleistung, die abgeführt werden muss. Somit werden innovative und effiziente Systeme für Kühlsysteme in Rechenzentren den zentralen Faktor für die Nachhaltigkeit darstellen. Neben der reinen Kühlung ist die Nutzung der abgeführten Wärmeenergie relevant. Diese hängt, wie sich in Kapitel 3.1 gezeigt hat, stark von der verwendeten Kühlmethode ab. Grundsätzlich gilt, je höher das Temperaturniveau der Abwärme, desto vielseitiger lässt sie sich weiterverwenden. Die Abwärme lässt sich für eine Bandbreite beginnen bei der Niedrigtemperaturbeheizung von Gärtnereien oder Büroflächen bis hin zur Einspeisung in Wärmenetze verwenden. Zu bedenken ist der sich ergebende infrastrukturelle Mehraufwand, um die Wärmeenergie zu transportieren, sowie gegebenenfalls der Einsatz von Wärmepumpen, um das Niveau auf das benötigte Level zu heben.

Der Einsatz von Wasserstoff wurde ebenso analysiert. Das Ergebnis zeigt, dass die Verwendung nur im Bereich des Notstroms einigermaßen sinnvoll ist, da hier der aktuelle Brennstoff Diesel substituiert werden kann. Auf der positiven Seite stehen hier die Dekarbonisierung und die Anwendung einer im Vergleich zur Motorentechnik effizienteren Brennstoffzelle. Auf der negativen Seite der hohe Preis, die Schwierigkeiten bei der Speicherung, verursacht durch die geringe volumetrische Energiedichte und die Herausforderungen bei der zusammenhängenden Logistik und Technologiebeschaffung. Alle Punkte lassen sich technisch abbilden, verursachen jedoch aktuell noch hohe Kosten. Mögliche Alternativen zum Wasserstoff wären grüner Ammoniak oder grünes LNG bzw. Erdgas. Diese sind einfacher bei der Handhabung und meist günstiger als der grüne Wasserstoff. Durch die geringen Verbräuche im Notstromsektor und die bessere Lagerfähigkeit der Alternativbrennstoffe sind diese oft sinnvoller.

Diskussion

Die in dieser Studie gewonnenen Erkenntnisse zeigen, dass die Gestaltung zukünftiger Rechenzentren vor allem von zwei Faktoren geprägt sein wird: der konsequenten Reduktion des Energiebedarfs und der intelligenten Integration in lokale Energieinfrastrukturen. Während heutige Anlagen primär auf Betriebssicherheit und Skalierbarkeit ausgelegt sind, rückt durch steigende Energiekosten, Dekarbonisierungsanforderungen und den wachsenden Einfluss von KI-Systemen die Frage nach nachhaltigen Betriebsstrategien zunehmend in den Mittelpunkt.

Ein wesentliches Handlungsfeld ergibt sich aus der Wahl der Kühltechnologie. Der Vergleich verschiedener Methoden legt nahe, dass flüssigkeitsbasierte Systeme zukünftig eine zentrale Rolle spielen werden, da sie höhere Abwärmeparamperaturen ermöglichen und damit neue Optionen für die energetische Weiterverwendung eröffnen. Gleichzeitig zeigt sich, dass der Übergang zu solchen Technologien nicht allein technischer Natur ist, sondern veränderte Arbeitsprozesse, Schulungen der Mitarbeitenden sowie Anpassungen in Planung und Betrieb voraussetzt. Dies verdeutlicht, dass Nachhaltigkeit in

Rechenzentren nur systemisch erreichbar ist, also im Zusammenspiel technischer, organisatorischer und infrastruktureller Aspekte.

Die Nutzung von Abwärme stellt ein weiteres bedeutendes Zukunftsthema dar. Zwar zeigt sich, dass hohe Temperaturniveaus die wirtschaftliche Attraktivität deutlich erhöhen, jedoch bleibt die tatsächliche Umsetzung stark von lokalen Gegebenheiten abhängig. Die Nähe zu Wärmenetzen, geeignete Abnehmerstrukturen und regulatorische Rahmenbedingungen beeinflussen maßgeblich die Realisierbarkeit. Für die Planung neuer Rechenzentren könnte daher die Standortwahl künftig stärker unter dem Gesichtspunkt der »Energieökologie« erfolgen und somit die Frage, in welche lokale Infrastruktur ein Rechenzentrum möglichst effizient eingebettet werden kann, adressieren.

Auch im Bereich der Energieversorgung entstehen neue Fragestellungen. Wasserstoff wurde in dieser Studie als Option besonders für den Notstrom identifiziert, doch der tatsächliche Nutzen hängt erheblich von der Einbettung in übergeordnete Energiesysteme ab. Perspektivisch könnten Rechenzentren als flexible Stromverbraucher eine größere Rolle im Energiemarkt spielen, indem sie Lastmanagement, Abwärmenutzung oder Wasserstofftechnologien nicht isoliert, sondern im Verbund mit regionalen Energieerzeugern und -verbrauchern einsetzen. Dies eröffnet langfristig die Möglichkeit, Rechenzentren als aktive Bestandteile lokaler Energienetze zu verstehen, die nicht nur Energie verbrauchen, sondern zur Systemstabilität beitragen.

Darüber hinaus ergeben sich Forschungsbedarfe im Bereich der IT-Systeme selbst. Die Entwicklung energieeffizienter KI-Modelle, die Minimierung redundanter Rechenprozesse und neue Ansätze im Bereich »Green AI« können den Gesamtenergiebedarf erheblich beeinflussen. Damit verschiebt sich das Nachhaltigkeitsthema zunehmend von der reinen Infrastruktur hin zur Software- und Modellarchitektur. Entscheidend wird sein, dass Bewertungsmetriken für Energieeffizienz und Ressourcenverbrauch frühzeitig in die Entwicklung integriert und brancheneinheitlich etabliert werden.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass Rechenzentren der Zukunft stärker ganzheitlich gedacht werden müssen. Effizienzgewinne entstehen nicht durch einzelne Maßnahmen, sondern durch das Zusammenspiel von Standortwahl, Kühlmethoden, Energieversorgung, Abwärmenutzung und softwareseitiger Optimierung. Offene Fragen betreffen insbesondere die Generalisierbarkeit von Konzepten: Welche Maßnahmen lassen sich universell anwenden und welche erfordern eine spezifische Anpassung an lokale Rahmenbedingungen? Um diese Fragen zu beantworten, wären Vergleiche realer Rechenzentren und idealerweise Reallabore notwendig, in denen neue Technologien und Betriebsmodi unter praxisnahen Bedingungen erprobt werden können.

Anhang 1: Beispielrechnung Wasserstoffspeicher

Beispielrechnung

Welche Mengen Wasserstoff für die Notstromversorgung eines Rechenzentrums benötigt.

Annahmen:

Gesamtstromverbrauch: 876.000 kWh pro Jahr

Notstromversorgungsdauer: 48 Stunden

Brennstoffzellen-Wirkungsgrad: 55 % (für typische PEM-Brennstoffzelle)

Energiedichte von Wasserstoff: 33,3 kWh/kg H₂

Wasserstoffspeicherung: Druckgas (350 bar)

Ermittlung des durchschnittlichen Stromverbrauchs pro Stunde:

Gesamtstromverbrauch = 876.000 kWh pro Jahr

Stunden pro Jahr = 8.760 h

Mittlere Leistung = Jährlicher Energieverbrauch / Stunden pro Jahr

Mittlere Leistung = 876.000 kWh / 8.760 h

Mittlere Leistung = 100 kW

Berechnung des Energiebedarfs für 48 Stunden:

Energiebedarf = Stromverbrauch pro Stunde × Notstromversorgungsdauer

Energiebedarf = 100 kWh/h × 48 Stunden = 4.800 kWh

Anpassung des Energiebedarfs basierend auf Brennstoffzellen-Wirkungsgrad:

Da die Brennstoffzellen einen Wirkungsgrad von 55 % haben:

Tatsächlicher Wasserstoff-Energiebedarf = Energiebedarf / Wirkungsgrad

Tatsächlicher Wasserstoff-Energiebedarf = 4.800 kWh / 0,55 ≈ 8.727 kWh

Berechnung der benötigten Menge Wasserstoff:

Energiedichte von Wasserstoff = 33,3 kWh/kg

Wasserstoffmenge = Tatsächlicher Wasserstoff-Energiebedarf / Energiedichte

Wasserstoffmenge = 8.727 kWh / 33,3 kWh/kg ≈ **262 kg H₂**

Ergebnis: Für die Notstromversorgung des Rechenzentrums über 48 Stunden bei den gegebenen Bedingungen werden etwa **262 Kilogramm Wasserstoff** benötigt.

Vergleich zu Diesel

Annahme:

Energiedichte von Diesel: 11,9 kWh/kg

Energiebedarf: 4.800 kWh (für 48 Stunden)

Wirkungsgrad Dieselgeneratoren: 40 %

Berechnung der benötigten Menge Diesel:

Tatsächlicher Dieselbedarf = Energiebedarf / Wirkungsgrad

Tatsächlicher Dieselbedarf = 4.800 kWh / 0,40 ≈ 12.000 kWh

Dieselmenge = Tatsächlicher Dieselbedarf / Energiedichte

Dieselmenge = 12.000 kWh / 11,9 kWh/kg ≈ **1.008 kg Diesel**

Für einen umweltfreundlichen Energiespeicher ist die Menge von 262 kg Wasserstoff für die Notstromversorgung eines Rechenzentrums nicht außergewöhnlich hoch. Im

Vergleich zum Diesel, der weniger Platz benötigt, ist die Verwendung von Wasserstoff technischer aufwendiger in Hinblick auf Lagerung und Transport.

Anhang

Kompressionskältemaschinen (Konzept 1)

In diesem Szenario setzen wir auf die Kühlung mit einer Kompressionskältemaschine. Diese Technologie benötigt in der Regel eine höhere Energieaufnahme, da die aktive Kühlung von IT-Komponenten durch Kompressionskältemaschinen im Vergleich zu anderen Kühlmethoden energieintensiv ist. Bei niedrigeren Temperaturen der IT-Komponenten (z.B. 45°C) sind die Kühlaufwendungen geringer, da die Temperaturdifferenz zwischen den IT-Komponenten und der Umgebung kleiner ist. Dadurch wird weniger Energie für die Kühlung benötigt, was zu einem niedrigeren PUE-Wert führt. Bei höheren Temperaturen der IT-Komponenten (z.B. 55°C oder 65°C) steigt der Kühlbedarf, da mehr Energie aufgewendet werden muss, um die IT-Komponenten im optimalen Temperaturbereich zu halten. Dies führt zu einem höheren PUE-Wert, da ein größerer Anteil der Energie für Kühlung und Infrastrukturkomponenten aufgebracht wird, im Vergleich zur Energie, die für die IT-Leistung genutzt wird.

Adsorptionskühlung (Konzept 2)

In diesem Szenario setzen wir auf Adsorptionskühlung, die thermische Energie zur Kühlung nutzt und eine effizientere Kühltechnologie im Vergleich zur Kompressionskältemaschine darstellt. Da Adsorptionskühlung weniger Energie für die Kühlung benötigt, erwarten wir, dass der PUE-Wert hier etwas niedriger ausfällt (zwischen 1,3 und 1,5). Der Kühlaufwand wird insbesondere bei höheren Temperaturen der IT-Komponenten (55°C und 65°C) reduziert, da die Adsorptionskühlung direkt auf verfügbare Wärmequellen zugreift, wie etwa Abwärme aus anderen Prozessen oder einem externen Nahwärmenetz.

Nutzung der Abwärme (Konzept 3)

In diesem Szenario nutzen wir die Abwärme zur direkten Heizkreislaufspeisung oder Warmwasseraufbereitung, was eine bedeutende Verbesserung der Gesamtenergieeffizienz darstellt. Durch die Integration von Wärmerückgewinnungssystemen wird überschüssige Wärme, die sonst ungenutzt verloren ginge, für andere Zwecke wie die Beheizung von Gebäuden oder die Warmwasserbereitung verwendet (in unserem Fall der Referenzwärmebedarf). Dies hat einen besonders positiven Einfluss auf den PUE-Wert, da es den gesamten thermischen Bedarf reduziert und die Kühlanforderungen verringert. Insbesondere bei höheren Temperaturen der IT-Komponenten (55°C und 65°C) erwarten wir, dass der PUE-Wert noch weiter sinkt, da die Abwärme effizient genutzt wird und keine zusätzliche Energie für die Kühlung erforderlich ist.

Integration von Photovoltaik und Batteriespeichern (Konzept 4 bis 6)

Durch die Integration von PV und Batteriespeichern wird das Rechenzentrum in die Lage versetzt, einen Teil seines eigenen Strombedarfs zu decken, was zu einer Reduktion der externen Energieabhängigkeit führt. Diese Konzepte tragen zur Energieautarkie bei und können sowohl den elektrischen Bedarf als auch den thermischen Bedarf durch erneuerbare Energiequellen senken. Der PUE-Wert profitiert hier, weil durch die Nutzung erneuerbarer Energiequellen der Energieverbrauch für die Infrastruktur sinkt und das Rechenzentrum effizienter betrieben wird.

Wasserstofftechnologien (Konzept 7)

In diesem Szenario führen wir Wasserstofftechnologien wie Elektrolyseur, Brennstoffzelle und Wasserstoffspeicher zur Speicherung und Nutzung überschüssiger Energie

ein. Wasserstoff kann als flexibler Energieträger dienen und den Energiebedarf insbesondere in Zeiten mit geringer Solarstromproduktion decken. Auch wenn diese Technologie mit höheren Investitionskosten verbunden ist, erwarten wir, dass sie langfristig die Energieeffizienz steigert, indem sie den Bedarf an externem Strom reduziert und die Optimierung der Energieverteilung innerhalb des Rechenzentrums ermöglicht. Dies trägt ebenfalls zu einer Senkung des PUE-Werts bei, da weniger Energie für Infrastrukturkomponenten wie Kühlung und Stromversorgung benötigt wird.

Spotmarkt und Echtzeitstrompreise (Konzept 8 und 9)

In diesem Szenario setzen wir auf ein Echtzeitstrompreismodell (RTP) im Spotmarkt, um den Energieverbrauch des Rechenzentrums zu optimieren. Wir arbeiten zu Zeiten mit günstigen Strompreisen und passen unseren Verbrauch durch intelligentes Planen der Aufgabenbearbeitung (smart Scheduling) entsprechend an. Diese dynamische Anpassung an die Strompreisschwankungen ermöglicht es uns, den Betrieb des Rechenzentrums zu optimieren. Da wir den Energieverbrauch in den günstigeren Phasen reduzieren, können wir auch den Kühlaufwand effizienter steuern und so den PUE-Wert weiter senken.

Paretoanalyse der Abwärmenutzung (Konzept 10)

In diesem Szenario konzentrieren wir uns auf die Paretoanalyse der Abwärmenutzung, um die effizienteste Nutzung der 55°C Abwärme zu bestimmen. Wir kombinieren alle Komponenten des Rechenzentrums so, dass die Zielfunktion minimiert wird. Durch die Optimierung der Kombination von Energiequellen und -verbrauch erreichen wir einen besonders niedrigen PUE-Wert, da wir alle verfügbaren Ressourcen zur Energiegewinnung und Nutzung der Abwärme effektiv einsetzen. Dies reduziert den Kühlaufwand und maximiert die Nutzung von bereits vorhandener Energie, was das Rechenzentrum insgesamt effizienter macht und den PUE-Wert weiter senkt.

0-90% des Maximalbedarfs durch H₂-Komponentenabdeckung (Konzept 11)

In diesem Szenario nutzen wir Wasserstofftechnologien, um bis zu 90% der Lastspitzen des maximalen Energiebedarfs im Jahr des Rechenzentrums zu decken. Dazu setzen wir Elektrolyseure, Brennstoffzellen und Wasserstoffspeicher ein, die überschüssige Energie in Wasserstoff umwandeln und diesen bedarfsgerecht zur Strom- und Wärmeerzeugung nutzen. Dies reduziert die Abhängigkeit von externem Strom und verbessert die Energieautonomie des Rechenzentrums erheblich. Zusätzlich zur Wasserstoffintegration optimieren wir die Nutzung der 55°C Abwärme, indem wir alle verfügbaren Energiekomponenten kombinieren. Durch eine intelligente Steuerung der Energiequellen, Verbraucher und Speicher kann das Rechenzentrum flexibel auf unterschiedliche Lastanforderungen reagieren. Dies führt zu einer signifikanten Reduktion des PUE-Werts, da sowohl der externe Strombedarf als auch der Kühlaufwand minimiert werden. Durch die freie Dimensionierung und Optimierung aller verfügbaren Komponenten maximieren wir sowohl die wirtschaftliche als auch die ökologische Effizienz des Systems. Dies ermöglicht eine kosteneffektive und nachhaltige Energieversorgung für das Rechenzentrum. Konzept 12 entspricht Konzept 11 nur mit zusätzlicher Verfügbarkeit von Batteriespeicher und PV.

Vorstellungsrunde aller Teilnehmer:

Name:

Rolle:

Unternehmen:

Hinweise zur Informationsverarbeitung:

- Das Interview dient ausschließlich wissenschaftlichen Zwecken im Rahmen des Projekts.
- Das Transkript sowie jegliche Ergebnisse des Interviews werden anonymisiert, d.h. ohne Namen und Personenangaben gespeichert.
- Das Interview wird aufgezeichnet, transkribiert und anschließend die Audiodatei unwiderruflich gelöscht.
- Auf Wunsch wird das Transkript zur Einsicht bereitgestellt, sodass Aussagen ggf. überarbeitet oder gelöscht werden können.
- Die Transkripte werden nicht veröffentlicht.

Briefing

Kurze Vorstellung des Forschungsvorhabens

Interviewfragen

1. Welche Funktion haben Sie aktuell im Kontext von Rechenzentren?
2. Seit wann arbeiten Sie im Bereich Rechenzentrumsbetrieb bzw. Infrastruktur?
3. Welche Rolle spielen Nachhaltigkeitsthemen in Ihrem beruflichen Alltag?

Rechenzentrumsbetrieb und Rahmenbedingungen

4. Welche zentralen Herausforderungen sehen Sie aktuell im Betrieb moderner Rechenzentren?
5. Welche Faktoren bestimmen aus Ihrer Sicht die langfristige Entwicklung von Rechenzentren?
6. Welche Rolle spielen Energieversorgung und Energieeffizienz in Ihrem Arbeitsbereich?
7. In welchen Phasen (Planung, Bau, Betrieb) sehen Sie die größten Einflussmöglichkeiten auf Nachhaltigkeit?

Nachhaltigkeit und Energiemanagement

8. Welche Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz werden derzeit umgesetzt oder diskutiert?
9. Welche Bedeutung hat die Nutzung erneuerbarer Energien für Ihre Organisation?
10. Welche Rolle spielt Abwärmenutzung oder sektorübergreifende Energiekopplung?
11. Welche Hindernisse bestehen bei der Umsetzung nachhaltiger Energiekonzepte?

Wasserstofftechnologien im Rechenzentrum

12. Welche Erfahrungen oder Berührungspunkte bestehen mit Wasserstofftechnologien?
13. In welchen Anwendungsfeldern sehen Sie potenzielle Einsatzmöglichkeiten von Wasserstoff (z.B. Notstromversorgung)?
14. Welche Vorteile sehen Sie gegenüber konventionellen Lösungen?
15. Welche Risiken oder Unsicherheiten bestehen aus Ihrer Sicht?

Wirtschaftliche und regulatorische Aspekte

16. Welche wirtschaftlichen Faktoren beeinflussen Investitionsentscheidungen im Energiesystem eines Rechenzentrums?
17. Welche regulatorischen Anforderungen oder politischen Rahmenbedingungen sind besonders relevant?

18. Welche Förderinstrumente oder politischen Anreize wären aus Ihrer Sicht notwendig?

Anhang

Stakeholder und Transformationsprozesse

19. Welche Akteure haben den größten Einfluss auf nachhaltige Rechenzentren?
20. Wo sehen Sie Zielkonflikte zwischen verschiedenen Stakeholdern?
21. Welche Kooperationen sind für die Umsetzung neuer Energietechnologien besonders wichtig?
22. Welche Rolle spielen Kundenanforderungen bei Nachhaltigkeitsentscheidungen?

Zukunftsperspektiven

23. Wie schätzen Sie die zukünftige Rolle von Wasserstoff im Rechenzentrumssektor ein?
24. Welche technologischen Entwicklungen werden den größten Einfluss auf nachhaltige Rechenzentren haben?
25. Welche zentralen Schritte sind notwendig, um klimaneutrale Rechenzentren zu erreichen?

- [1] I. Riu, D. Smiley, S. Bessasparis und K. Patel, "Load Growth Is Here to Stay, but Are Data Centers?," Jul. 2024. Zugriff am: 14. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ethree.com/wp-content/uploads/2024/07/E3-White-Paper-2024-Load-Growth-Is-Here-to-Stay-but-Are-Data-Centers-2.pdf>
- [2] X. Yuan, Y. Liang, X. Hu, Y. Xu, Y. Chen und R. Kosonen, "Waste heat recoveries in data centers: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 188, S. 113777, 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113777.
- [3] Equinix, Inc. "Ecosystems unlock digital opportunity." [Online.] Verfügbar: https://www.equinix.com/content/dam/eqxcorp/en_us/documents/insights/GXI_2024_en-US.pdf
- [4] Statistisches Bundesamt, "Data center average annual power usage effectiveness (PUE) worldwide from 2007 to 2024," Mai. 2025. Zugriff am: 17. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.statista.com/statistics/1229367/data-center-average-annual-pue-worldwide/>
- [5] Europäisches Parlament und Rat der europäischen Union, *VERORDNUNG (EU) 2020/852 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES*, 2020. Zugriff am: 2. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2020/852/oj>
- [6] Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz, *Verordnung zur Bestimmung Kritischer Infrastrukturen nach dem BSI-Gesetz (BSI-Kritisverordnung - BSI-KritisV)*. Zugriff am: 13. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/bsi-kritisv/BJNR095800016.html>
- [7] Bundesamt für Justiz, *Energie effizienz Gesetz: EnEfG*. Zugriff am: 15. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/enefg/BJNR1350B0023.html>
- [8] S. Cai und Z. Gou, "Towards energy-efficient data centers: A comprehensive review of passive and active cooling strategies," *Energy and Built Environment*, 2024, doi: 10.1016/j.enbenv.2024.08.009.
- [9] Deutscher Bundestag, *Gesetz zur Steigerung der Energieeffizienz in Deutschland 1 (Energieeffizienzgesetz - EnEfG) § 11 Klimaneutrale Rechenzentren*.
- [10] J. Hyvönen, T. Mori, J. Saunavaara, P. Hiltunen, M. Pärssinen und S. Syri, "Potential of solar photovoltaics and waste heat utilization in cold climate data centers. Case study: Finland and northern Japan," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 201, S. 114619, 2024, doi: 10.1016/j.rser.2024.114619.
- [11] FfE, "Von der Theorie zur Praxis: Warum grüner Wasserstoff teurer ist als gedacht," 2025. Zugriff am: 16. Oktober 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2025/07/Discussion_Paper-Investitionskosten_Elektrolyse-2.pdf
- [12] W. Hansen, R. Dubbert, Breer Sebastian, J. Hofmann und F. Platz, "So machen Kommunen die Eignungsprüfung auf Wasserstoff in Gasnetzgebieten," Nov. 2024. Zugriff am: 13. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://umweltinstitut.org/wp-content/uploads/2024/11/241111_Infoblatt_Eignungspruefung_Waermeplanung.pdf
- [13] DVGW Bonn, "Lokale Versorgung mit Wasserstoff," Mrz. 2025. Zugriff am: 13. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/leistungen/publikationen/lokale-versorgung-wasserstoff-dvgw-2025.pdf>
- [14] C. YANG und J. OGDEN, "Determining the lowest-cost hydrogen delivery mode," *International Journal of Hydrogen Energy*, Jg. 32, Nr. 2, S. 268–286, 2007, doi: 10.1016/j.ijhydene.2006.05.009.
- [15] D. Teichmann, W. Arlt und P. Wasserscheid, "Liquid Organic Hydrogen Carriers as an efficient vector for the transport and storage of renewable energy," *International Journal of Hydrogen Energy*, Jg. 37, Nr. 23, S. 18118–18132, 2012, doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.08.066.

- [16] M. Niermann, A. Beckendorff, M. Kaltschmitt und K. Bonhoff, "Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) – Assessment based on chemical and economic properties," *International Journal of Hydrogen Energy*, Jg. 44, Nr. 13, S. 6631–6654, 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.01.199.
- [17] M. Niermann, S. Timmerberg, S. Drünert und M. Kaltschmitt, "Liquid Organic Hydrogen Carriers and alternatives for international transport of renewable hydrogen," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 135, S. 110171, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110171.
- [18] Nationaler Wasserstoffrat, "Wasserstoff Aktionsplan Deutschland," 07/21. Zugriff am: 10. November 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/06/NWR_Aktionsplan_Wasserstoff_2021-2025.pdf
- [19] R. Moradi und K. M. Groth, "Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis," *International Journal of Hydrogen Energy*, Jg. 44, Nr. 23, S. 12254–12269, 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.03.041.
- [20] A.-L. Klingler et al., "Wasserstoffspeicher für dezentrale Energiesysteme," 2024, doi: 10.24406/publica-3180.
- [21] J. Hergott und G. Petitpas, "Speicherung von kryogenem Wasserstoff zum Einsatz in Langstrecken-Lkw," *MTZ Motortech Z*, Jg. 84, 7-8, S. 30–39, 2023, doi: 10.1007/s35146-023-1487-9.
- [22] Q. Cheng, R. Zhang, Z. Shi und J. Lin, "Review of common hydrogen storage tanks and current manufacturing methods for aluminium alloy tank liners," *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, Jg. 7, Nr. 2, S. 269–284, 2024, doi: 10.1016/j.ijlmm.2023.08.002.
- [23] *Technische Regel für Arbeitsstätten ASR A2.2 Maßnahmen gegen Brände*, Ausschuss für Arbeitsstätten, Ministerialblatt. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bvbf-brandschutz.de/brandschutz-unternehmen/asr-a2-2-massnahmen-gegen-braende/arbeitsstaettenregel-asr-a2-2>
- [24] M. J. Wolf et al., "Wasserstoff-Verflüssigung, Speicherung, Transport und Anwendung von flüssigem Wasserstoff," 2023, doi: 10.5445/IR/1000155199.
- [25] NOW-GmbH, "Genehmigungsleitfaden Wasserstoff-Tankstellen," Zugriff am: 10. November 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2022/03/NOW_Genehmigungsleitfaden_H2-Tankstellen.pdf
- [26] THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, *on the deployment of alternative fuels infrastructure, and repealing Directive 2014/94/EU*. Zugriff am: 10. November 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX%3A32023R1804>
- [27] T. Petersen, "Wasserstoffwirtschaft," 2023, doi: 10.11586/2023015.
- [28] M. Fleschutz und M. Murphy, "elmada: Dynamic electricity carbon emission factors and prices for Europe," *JOSS*, Jg. 6, Nr. 66, S. 3625, 2021, doi: 10.21105/joss.03625.
- [29] S. Pfenninger und I. Staffell, "Long-term patterns of European PV output using 30 years of validated hourly reanalysis and satellite data," *Energy*, Jg. 114, S. 1251–1265, 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.08.060.
- [30] Dr. Simon Philipps, Fraunhofer ISE und Werner Warmuth, PSE Projects GmbH, "Photovoltaics Report,"
- [31] V. Jülch, "Comparison of electricity storage options using levelized cost of storage (LCOS) method," *Applied Energy*, Jg. 183, S. 1594–1606, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.08.165.
- [32] MTA Deutschland GmbH, "Produktübersicht - Industrielle Prozesskühlung: Cooling, conditioning, purifying," [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mta.de/>
- [33] I. Petkov und P. Gabrielli, "Power-to-hydrogen as seasonal energy storage: an uncertainty analysis for optimal design of low-carbon multi-energy systems," *Applied Energy*, Jg. 274, S. 115197, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115197.

9 Impressum

Impressum

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft
und Organisation IAO
Nobelstraße 12,
70569 Stuttgart
www.iao.fraunhofer.de

ist eine rechtlich nicht selbständige Einrichtung der

Fraunhofer-Gesellschaft
zur Förderung der angewandten Forschung e.V.
Hansastraße 27 c
80686 München
www.fraunhofer.de

Titelbild: © elenabs – iStock, Fraunhofer IAO

Kontakt:

Timo Stöhr
Forschungs- und Innovationszentrum Kognitive
Dienstleistungssysteme
Tel. +49 160 8941083
timo.stoehr@iao.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft
und Organisation IAO
Nobelstraße 12,
70569 Stuttgart
www.iao.fraunhofer.de