DIPLOMARBEIT

Erneuerbare Energien für Rechenzentren

Strategien, Technologien und Zukunftsperspektiven im Zeitalter von KI – mit praktischer Demonstration am Modell eines Mini-Rechenzentrums

Diplomand	Sidar Denli
Lehrgang	Dipl. Informatiker HF, Fachrichtung Systemtechnik
Klasse	_Z-TIP-23-T-a
Schule	TEKO Schweizerische Fachschule, Zürich
Diplomcoach	Uta Enke
Experte/Expertin	Dominic Merz
Klassifizierung	Öffentlich
Ort, Datum	Glattbrugg, 27.10.2026

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der im Quellenverzeichnis angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Die wörtlich oder inhaltlich den im Quellenverzeichnis aufgeführten Quellen und Hilfsmitteln entnommenen Stellen sind in der Arbeit als Zitat beziehungsweise Paraphrase kenntlich gemacht. Der Einsatz von Hilfsmitteln der künstlichen Intelligenz ist im Vorwort offengelegt.

Diese Diplomarbeit ist noch nicht veröffentlicht worden. Sie ist somit weder anderen Interessenten zugänglich gemacht noch einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt worden.

Glattbrugg, 27.10.2026



Ort, Datum

Unterschrift Sidar Denli

Vorwort

Diese Arbeit entstand als Abschlussprojekt der Weiterbildung zum Dipl. Informatiker HF an der TEKO Schweizerische Fachschule. Sie verbindet zwei Themen, die meinen beruflichen Alltag in der IT-Infrastruktur zunehmend prägen: den rasant wachsenden Strombedarf von Rechenzentren durch künstliche Intelligenz und die Frage, wie sich dieser Bedarf klimaverträglich decken lässt.

Hinweise für Leserinnen und Leser

- Die Arbeit folgt einem roten Faden von der Problemstellung (Kapitel 2) über die Lösungsansätze (Kapitel 3 bis 5) und den praktischen Teil (Kapitel 6) bis zur gesellschaftlichen Einordnung, kritischen Würdigung und den Empfehlungen (Kapitel 7 bis 9).
- Abkürzungen sind im Abkürzungsverzeichnis erläutert. Quellen werden im Text nach dem Autor-Jahr-Prinzip angegeben und sind im Quellenverzeichnis vollständig aufgeführt.
- Eigene Berechnungen und Rückrechnungen sind in Text und Abbildungen ausdrücklich als solche gekennzeichnet.
- Sämtliche Skripte und Konfigurationsdateien des praktischen Teils sind in Kapitel 6 vollständig abgebildet und erläutert; der Node-RED-Flow befindet sich in Anhang B.

Hinweis zum Einsatz von KI und zur Qualitätssicherung

- Konzeption, Aufbau und inhaltliche Ausrichtung der Arbeit stammen von mir. Als unterstützendes Hilfsmittel habe ich KI-Werkzeuge eingesetzt, etwa bei der Gliederung, bei der Recherche, für erste Textentwürfe und bei der Erstellung von Skripten.
- Alle KI-gestützten Inhalte habe ich kritisch geprüft, überarbeitet und in meine eigene Argumentation eingebettet. Zahlenangaben habe ich anhand der Primärquellen verifiziert, die Skripte habe ich selbst getestet und nachvollzogen.
- Für den Inhalt der Arbeit trage ich die volle Verantwortung.

Dank

Mein Dank gilt meinen Arbeitskolleginnen und -kollegen für den fachlichen Austausch sowie meinem Umfeld für die Geduld und Unterstützung während der intensiven Projektphasen.

Management Summary

Rechenzentren bilden die physische Grundlage der Digitalisierung. 2024 verbrauchten sie weltweit rund 415 Terawattstunden Strom – etwa siebenmal so viel wie die gesamte Schweiz. Prognosen der Internationalen Energieagentur zufolge wird sich der Verbrauch durch den Ausbau künstlicher Intelligenz bis 2030 auf rund 945 Terawattstunden mehr als verdoppeln. Allein 2025 stieg der Strombedarf KI-fokussierter Rechenzentren um 50 Prozent.

Ziel dieser Arbeit war es, aufzuzeigen, mit welchen erneuerbaren Energiequellen, Versorgungsmodellen und Effizienzmassnahmen Rechenzentren trotz dieses Wachstums klimaverträglich betrieben werden können. Dazu wurden Fachliteratur, Statistiken und Praxisbeispiele ausgewertet und durch einen praktischen Teil ergänzt: das Konzept und die Implementierung eines Mini-Rechenzentrums auf Basis zweier Raspberry Pi, das die Kennzahlen PUE und CUE nach DIN EN 50600 erfasst..

Die zentrale Erkenntnis lautet: **Nicht die Rechenleistung allein entscheidet über die Klimawirkung eines Rechenzentrums, sondern der Strommix am Standort und die Effizienz der Infrastruktur.** Ein Serverraum mit identischer Last und identischer Effizienz verursacht in Indien rund fünfzehnmal mehr CO_2 als in der Schweiz. Die verbreitete Effizienzkennzahl PUE bildet diesen Unterschied nicht ab und muss deshalb durch die CO_2-Kennzahl CUE ergänzt werden.

Von den erneuerbaren Quellen eignen sich Wasserkraft und Geothermie am besten für den 24-Stunden-Betrieb von Rechenzentren, während Photovoltaik und Wind nur in Kombination mit Speichern und Netzbezug tragfähig sind. Die Schweiz ist mit einem Wasserkraftanteil von rund 60 Prozent an der Stromproduktion und einer CO_2-Intensität von rund 40 Gramm pro Kilowattstunde ein ausgesprochen günstiger Standort. Bei der Kühlung als grösstem Effizienzhebel erreichen Free Cooling, Seewasser- und Immersionskühlung PUE-Werte nahe 1,0; Schweizer Beispiele wie das Rechenzentrum D4 in Genf (PUE 1,09) zeigen, dass dies auch hierzulande umsetzbar ist.

Zunehmend entscheidet zudem die gesellschaftliche Akzeptanz über den Ausbau. In den USA lehnen inzwischen bis zu drei Viertel der Befragten ein Rechenzentrum in ihrer Nähe ab, während in Deutschland zwei Drittel einem Neubau am Wohnort positiv gegenüberstehen. Abwärmenutzung, geringer Wasserverbrauch und transparente Kommunikation werden damit zur Voraussetzung, überhaupt bauen zu dürfen.

Die Arbeit empfiehlt Betreibern, neben dem PUE systematisch CUE und Wasserverbrauch auszuweisen, erneuerbaren Strom über langfristige Abnahmeverträge mit nachweisbarer Zusätzlichkeit zu beschaffen, Kühlkonzepte auf Free Cooling und Abwärmenutzung auszurichten und den Standortvorteil der Schweiz gezielt zu nutzen.

Inhaltsverzeichnis

Ehrenwörtliche Erklärung I
Vorwort II
Management Summary III
Inhaltsverzeichnis IV
Abbildungsverzeichnis VIII
Tabellenverzeichnis IX
Abkürzungsverzeichnis X
1 Einleitung 1
1.1 Ausgangslage und Motivation 1
1.2 Zielsetzung der Arbeit 2
1.3 Zentrale Fragestellungen 2
1.4 Abgrenzung 3
1.5 Methodik 3
1.6 Soll-Ist-Vergleich 4
1.7 Aufbau der Arbeit 4
1.8 Terminplan 5
2 Rechenzentren und ihr Energiebedarf 6
2.1 Grundlagen 6
2.1.1 Begriff und Typen von Rechenzentren 6
2.1.2 Aufbau und Energieverbraucher 6
2.2 Der globale Energieverbrauch 7
2.2.1 Ausgangslage 7
2.2.2 Geografische Verteilung 8
2.2.3 Prognosen bis 2030 8
2.2.4 Unsicherheiten der Prognosen 9
2.3 Der KI-Effekt 9
2.3.1 Warum KI-Rechenzentren anders sind 9
2.3.2 Training und Inferenz 9
2.3.3 Ein Widerspruch in der Forschung 10
2.3.4 Lastschwankungen als neue Herausforderung 10
2.3.5 Das Effizienzparadox 10
2.4 Rechenzentren in der Schweiz 11

2.4.1 Aktueller Stand 11
2.4.2 Entwicklung und Prognose 11
2.4.3 Die Ausgangslage der Schweiz 12
2.4.4 Politische Debatte 12
2.5 Die Kennzahl PUE 12
2.5.1 Herkunft und Definition 12
2.5.2 Interpretation und Referenzwerte 12
2.5.3 Messkategorien 13
2.5.4 Grenzen der Kennzahl 13
2.5.5 Ergänzende Kennzahlen 14
2.6 Regulatorisches Umfeld 15
2.6.1 Europäische Union 15
2.6.2 Deutschland 15
2.6.3 Schweiz 16
2.7 Zwischenfazit 16
3 Erneuerbare Energiequellen 17
3.1 Anforderungen des Rechenzentrumsbetriebs an die Energieversorgung 17
3.2 Wasserkraft 18
3.3 Photovoltaik 19
3.4 Windenergie 19
3.5 Geothermie 20
3.6 Vergleichsmatrix 21
3.7 Zwischenfazit 21
4 Versorgungsmodelle und Standortfaktoren 22
4.1 Power Purchase Agreements 22
4.2 Eigenerzeugung am Standort 22
4.3 Energiespeicher 23
4.3.1 Batteriespeicher 23
4.3.2 Pumpspeicher 23
4.3.3 Grüner Wasserstoff 23
4.4 CO_2-Intensität von Strommixen im Ländervergleich 24
4.5 Standortwahl im Vergleich 24
4.6 Greenwashing durch Zertifikatehandel 26
4.7 Zwischenfazit 26

5 Kühlung und Effizienz 27
5.1 Bedeutung der Kühlung 27
5.2 Luftkühlung 27
5.3 Flüssigkühlung 28
5.4 Immersionskühlung 28
5.5 Free Cooling und Seewassernutzung 28
5.6 Abwärmenutzung 29
5.7 Praxisbeispiele aus der Schweiz 29
5.8 KI-gestützte Optimierung 30
5.9 Wasserverbrauch als unterschätzter Faktor 30
5.10 Zwischenfazit 30
6 Praktischer Teil: Mini-Rechenzentrum 31
6.1 Zielsetzung des Demonstrators 31
6.2 Anforderungen 31
6.3 Variantenvergleich und Komponentenauswahl 32
6.3.1 Varianten der Leistungsmessung 32
6.3.2 Hardware 32
6.3.3 Software 33
6.4 Systemarchitektur und Messkonzept 34
6.5 Implementierung 34
6.5.1 Schritt 1: Grundinstallation 35
6.5.2 Schritt 2: Abfrage der Messsteckdosen 35
6.5.3 Schritt 3: Auslesen der Temperatursensoren 36
6.5.4 Schritt 4: Automatischer Start 37
6.5.5 Schritt 5: Datenfluss in Node-RED 37
6.5.6 Schritt 6: Berechnung von PUE und CUE 38
6.5.7 Schritt 7: Lastszenarien 39
6.5.8 Schritt 8: Visualisierung 39
6.6 Berechnungsgrundlagen und Rechenbeispiele 40
6.6.1 Erwartete Kennzahlen des Demonstrators 40
6.6.2 Rechenbeispiel Standortvergleich 40
6.7 Modellgrenzen 42
6.8 Zwischenfazit 42
7 Zukunftsperspektiven und gesellschaftliche Akzeptanz 43

7.1 Zukünftige Energiequellen 43
7.1.1 Small Modular Reactors 43
7.1.2 Kernfusion 43
7.1.3 Geothermie der nächsten Generation 44
7.1.4 Speicher als Schlüsseltechnologie 44
7.2 Leben neben einem Rechenzentrum 44
7.2.1 Belastungen 44
7.2.2 Chancen 44
7.2.3 Der Verteilungskonflikt 45
7.3 Was die Bevölkerung denkt 45
7.3.1 Vereinigte Staaten 45
7.3.2 Deutschland 45
7.3.3 Erklärungsansätze 46
7.3.4 Akzeptanz als wirtschaftlicher Faktor 46
7.4 Die Schweizer Perspektive 47
8 Herausforderungen und kritische Würdigung 48
8.1 Intermittenz erneuerbarer Energien 48
8.2 Netzkapazität 48
8.3 Graue Energie der Hardware 48
8.4 Datenqualität und Transparenz 48
8.5 Zielkonflikt zwischen KI-Wachstum und Klimazielen 49
8.6 Kritische Würdigung der eigenen Arbeit 49
9 Fazit und Empfehlungen 50
9.1 Beantwortung der Fragestellungen 50
9.2 Handlungsempfehlungen 51
9.3 Ausblick 52
9.4 Persönliche Reflexion 52
Quellenverzeichnis 54
Anhang 57
Anhang A: Abkürzungen und Glossar der Kennzahlen 57
Anhang B: Beruflicher Lebenslauf 57
Anhang C: Protokolle der Zwischengespräche 57

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Stromverbrauch von Rechenzentren im Vergleich zum Schweizer Landesverbrauch 7
Abbildung 2: Regionale Verteilung des Stromverbrauchs von Rechenzentren 2024 8
Abbildung 3: Globaler Stromverbrauch von Rechenzentren 2017–2030 8
Abbildung 4: Stromverbrauch der Rechenzentren in der Schweiz 2019–2030 11
Abbildung 5: Bedeutung des PUE: Energieaufwand für Infrastruktur je Kilowattstunde IT-Leistung 13
Abbildung 6: Globale gewichtete Kapazitätsfaktoren erneuerbarer Technologien 2024 17
Abbildung 7: Zusammensetzung der Schweizer Landeserzeugung 2024 18
Abbildung 8: CO_2-Intensität des Strommixes ausgewählter Länder 24
Abbildung 9: Typische PUE-Bandbreiten nach Kühlkonzept und Anlagentyp 27
Abbildung 10: Systemarchitektur des Mini-Rechenzentrums 34
Abbildung 11: Installationsskript für den Monitoring-Stack (01_installation.sh) 35
Abbildung 12: Abfrage der Messsteckdosen über die lokale Schnittstelle (02_shelly_abfrage.sh) 36
Abbildung 13: Auslesen der Temperatursensoren (03_bme280_sensoren.py) 36
Abbildung 14: Systemdienst für die Temperaturmessung (06_sensor.service) 37
Abbildung 15: Aufbau des Node-RED-Flows (schematische Darstellung) 37
Abbildung 16: Berechnung von PUE und CUE im Node-RED-Function-Knoten (04_node_red_berechnung.js) 38
Abbildung 17: Skript für die Lastszenarien (05_lastszenarien.sh) 39
Abbildung 18: Skript für das Rechenbeispiel Standortvergleich (07_standortvergleich.py) 41
Abbildung 19: Jährliche CO_2-Emissionen eines identischen Serverraums an verschiedenen Standorten (Rechenbeispiel) 41
Abbildung 20: Ablehnung neuer Rechenzentren am Wohnort in den USA und in Deutschland 46

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Energieverbraucher in einem Rechenzentrum (eigene Darstellung nach IEA, 2025) 6
Tabelle 2: Einordnung typischer PUE-Werte (eigene Darstellung nach Google, o. J.; prior1, 2026) 13
Tabelle 3: Kennzahlen der Normenreihe DIN EN 50600-4 (eigene Darstellung nach rechenzentren.org, 2026; Öko-Institut, o. J.; Stulz, o. J.) 14
Tabelle 4: Anforderungen an Rechenzentren nach § 11 EnEfG (eigene Darstellung nach EnEfG, 2023) 15
Tabelle 5: Vergleichsmatrix erneuerbarer Energiequellen für den Rechenzentrumsbetrieb (eigene Bewertung) 21
Tabelle 6: Vergleich von physischen und virtuellen PPAs (eigene Darstellung nach Kyos, o. J.) 22
Tabelle 7: Standortvergleich Island, Norwegen und Schweiz (eigene Darstellung nach atNorth, 2023; Allianz Trade, 2026; BFE, 2025b) 25
Tabelle 8: Nachhaltige Rechenzentren in der Schweiz (eigene Darstellung nach IT Reseller, 2026) 29
Tabelle 9: Anforderungen an den Demonstrator 31
Tabelle 10: Varianten der Leistungsmessung 32
Tabelle 11: Stückliste und Kosten des Demonstrators (Richtpreise Schweizer Handel, Stand Oktober 2026) 33
Tabelle 12: Erwartete Kennzahlen des Demonstrators (eigene Berechnung auf Basis von Literaturwerten, keine Messwerte) 40
Tabelle 13: Verteilung von Nutzen und Lasten eines Rechenzentrums (eigene Darstellung) 45
Tabelle 14: Soll-Ist-Vergleich mit den Erfolgskriterien der Themeneingabe **Fehler! Textmarke nicht definiert.**
Tabelle 15: Zuordnung der Studieninhalte zu den Kapiteln der Arbeit **Fehler! Textmarke nicht definiert.**
Tabelle 16: Beruflicher Werdegang 57
Tabelle 17: Protokollvorlage Zwischengespräch 57

Abkürzungsverzeichnis

API	Application Programming Interface, Programmierschnittstelle
BFE	Bundesamt für Energie
CEF	Carbon Emission Factor, CO_2-Emissionsfaktor des Stroms
CER	Cooling Efficiency Ratio
CO_2	Kohlendioxid
CPU	Central Processing Unit, Hauptprozessor
CUE	Carbon Usage Effectiveness
DIN EN	Deutsche Norm, Europäische Norm
EnEfG	Energieeffizienzgesetz (Deutschland)
ERF	Energy Reuse Factor
GPU	Graphics Processing Unit, Grafikprozessor
GWh	Gigawattstunde (1 Million kWh)
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
I2C	Inter-Integrated Circuit, serieller Datenbus
IEA	International Energy Agency, Internationale Energieagentur
IRENA	International Renewable Energy Agency
JSON	JavaScript Object Notation, Datenformat
KI	Künstliche Intelligenz
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
kWh	Kilowattstunde
LCOE	Levelized Cost of Electricity, Stromgestehungskosten
MW	Megawatt
PPA	Power Purchase Agreement, langfristiger Stromliefervertrag
PUE	Power Usage Effectiveness
PV	Photovoltaik
REF	Renewable Energy Factor
RPC	Remote Procedure Call, entfernter Funktionsaufruf
SMR	Small Modular Reactor, kleiner modularer Reaktor
TWh	Terawattstunde (1 Milliarde kWh)
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
WLAN	Wireless Local Area Network, Funknetzwerk
WUE	Water Usage Effectiveness

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Motivation

Kaum eine Infrastruktur ist im Alltag so allgegenwärtig und zugleich so unsichtbar wie das Rechenzentrum. Jede E-Mail, jede Videokonferenz, jede Online-Zahlung und jede Anfrage an ein Sprachmodell wird in einem Rechenzentrum verarbeitet. Mit der Verbreitung von Cloud-Diensten und insbesondere von Anwendungen der künstlichen Intelligenz (KI) wächst der Bedarf an Rechenleistung derzeit schneller als je zuvor.

Diese Entwicklung hat auch eine physische Kehrseite: Rechenleistung braucht Strom. Laut Internationaler Energieagentur (IEA) verbrauchten Rechenzentren 2024 weltweit rund 415 Terawattstunden (TWh) – etwa 1,5 Prozent des globalen Stromverbrauchs. Bis 2030 wird ein Anstieg auf rund 945 TWh erwartet, also mehr als eine Verdopplung (IEA, 2025). Die Entwicklung im Jahr 2025 bestätigte diese Prognose: Der Stromverbrauch von Rechenzentren stieg um 17 Prozent, bei KI-fokussierten Rechenzentren sogar um 50 Prozent (IEA, 2026).

Auch in der Schweiz ist das Thema angekommen. Eine im Mai 2026 im Auftrag des Bundesamts für Energie (BFE) veröffentlichte Studie beziffert den Stromverbrauch inländischer Rechenzentren auf 2,1 TWh beziehungsweise rund 3,6 Prozent des Landesverbrauchs (BFE, 2026). Auf kantonaler Ebene werden bereits Vorstösse diskutiert, die Betreiber etwa zur Nutzung ihrer Abwärme verpflichten sollen (SRF, 2026).

Gleichzeitig wächst der Druck auf Unternehmen, ihre Treibhausgasemissionen zu senken. Daraus entsteht ein Spannungsfeld, das im Zentrum dieser Arbeit steht: Wie lässt sich der stark steigende Strombedarf von Rechenzentren decken, ohne dass die Digitalisierung zum Bremsklotz für den Klimaschutz wird?

Meine Motivation für dieses Thema ergibt sich auch aus meinem beruflichen Umfeld. Als Informatiker in der Systemtechnik arbeite ich täglich mit Server-Hardware und Infrastruktur. Welche energetischen Folgen der Betrieb dieser Systeme hat und wie er nachhaltiger gestaltet werden kann, ist daher nicht nur gesellschaftlich, sondern auch unmittelbar beruflich relevant.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Die Arbeit zeigt auf, mit welchen Strategien und Technologien Rechenzentren trotz des steigenden Energiebedarfs durch KI nachhaltig und wirtschaftlich betrieben werden können. Auf dieser Grundlage werden praxisnahe Handlungsempfehlungen für Betreiber und IT-Verantwortliche abgeleitet.

Konkret verfolgt die Arbeit folgende Teilziele:

- Analyse des aktuellen und zukünftigen Energieverbrauchs von Rechenzentren, insbesondere im Kontext von KI-Anwendungen.
- Vergleich der erneuerbaren Energiequellen Wasserkraft, Photovoltaik, Windenergie und Geothermie hinsichtlich ihrer Eignung für den Rechenzentrumsbetrieb in einer eigenen Vergleichsmatrix.
- Untersuchung von Versorgungsmodellen wie Power Purchase Agreements, Eigenerzeugung und Energiespeichern sowie der Bedeutung des Standorts.
- Analyse von Kühl- und Effizienzstrategien anhand von Praxisbeispielen, darunter Schweizer Rechenzentren.
- Konzeption und Implementierung eines Mini-Rechenzentrums als praktischer Demonstrator für die Kennzahlen PUE und CUE.
- Einordnung der gesellschaftlichen Akzeptanz von Rechenzentren und Ableitung von Handlungsempfehlungen.

1.3 Zentrale Fragestellungen

Die Arbeit beantwortet folgende Leitfragen:

- **F1:** Wie stark steigt der Energiebedarf von Rechenzentren durch das Wachstum von KI, und welche Rolle spielt die Schweiz dabei?
- **F2:** Welche erneuerbaren Energiequellen eignen sich am besten für die zuverlässige Versorgung von Rechenzentren?
- **F3:** Mit welchen Versorgungsmodellen lässt sich eine nachhaltige und wirtschaftliche Energieversorgung sicherstellen?
- **F4:** Welche technischen Massnahmen, insbesondere bei der Kühlung, tragen am meisten zur Reduktion des Energieverbrauchs bei?
- **F5:** Wie lässt sich die Klimawirkung eines Rechenzentrums messbar machen, und welchen Einfluss hat der Standort?
- **F6:** Wie steht die Bevölkerung zu Rechenzentren, und was folgt daraus für Betreiber?

1.4 Abgrenzung

Die Arbeit konzentriert sich auf den **Betrieb** von Rechenzentren und dessen Strombedarf. Folgende Aspekte werden bewusst nicht oder nur am Rande behandelt:

- Die graue Energie und die Emissionen aus Herstellung und Entsorgung der Hardware werden in Kapitel 8 kritisch eingeordnet, aber nicht quantifiziert.
- Die Effizienz von Software und KI-Modellen selbst, etwa durch effizientere Algorithmen, ist nicht Gegenstand der Arbeit.
- Kernenergie wird in Kapitel 7 als CO_2-arme Zukunftsoption diskutiert, ist jedoch keine erneuerbare Energiequelle und wird entsprechend gekennzeichnet.
- Eine betriebswirtschaftliche Investitionsrechnung für einzelne Rechenzentren erfolgt nicht; Kosten werden auf Ebene der Stromgestehungskosten verglichen.
- Der praktische Demonstrator bildet die Funktionsweise von Kennzahlen im Kleinmassstab ab. Er ist nicht als massstabsgetreues Modell eines realen Rechenzentrums gedacht.

1.5 Methodik

Die Arbeit verbindet eine strukturierte Literatur- und Datenanalyse mit einem praktischen Teil.

Literatur- und Datenanalyse. Als Grundlage dienen Berichte internationaler und nationaler Institutionen, insbesondere der Internationalen Energieagentur (IEA), der International Renewable Energy Agency (IRENA), des Bundesamts für Energie (BFE) und des deutschen Umweltbundesamts. Hinzu kommen Normen der Reihe DIN EN 50600, Gesetzestexte, Fachpublikationen sowie Unternehmens- und Branchenberichte. Widersprechen sich Quellen, werden die unterschiedlichen Positionen dargestellt und eingeordnet.

Praxisbeispiele. Anhand von Betreibern wie Google, Microsoft und atNorth in Island sowie mehreren Schweizer Rechenzentren wird veranschaulicht, wie sich die theoretisch beschriebenen Ansätze in der Praxis umsetzen lassen.

Praktischer Teil. Für den Demonstrator wurden Anforderungen festgelegt, Varianten verglichen, eine Systemarchitektur entworfen und die Software implementiert. Die erwarteten Kennzahlen werden auf Basis von Herstellerangaben und Literaturwerten berechnet. Ergänzend veranschaulicht ein Rechenbeispiel, wie sich der Standort auf die CO_2-Bilanz eines realistisch dimensionierten Serverraums auswirkt.

Eigene Berechnungen. Alle Werte, die nicht direkt aus einer Quelle übernommen, sondern selbst berechnet wurden, sind im Text und in den Abbildungen ausdrücklich gekennzeichnet.

1.6 Soll-Ist-Vergleich

Tabelle 14 vergleicht die Ergebnisse mit den Erfolgskriterien aus der Themeneingabe.

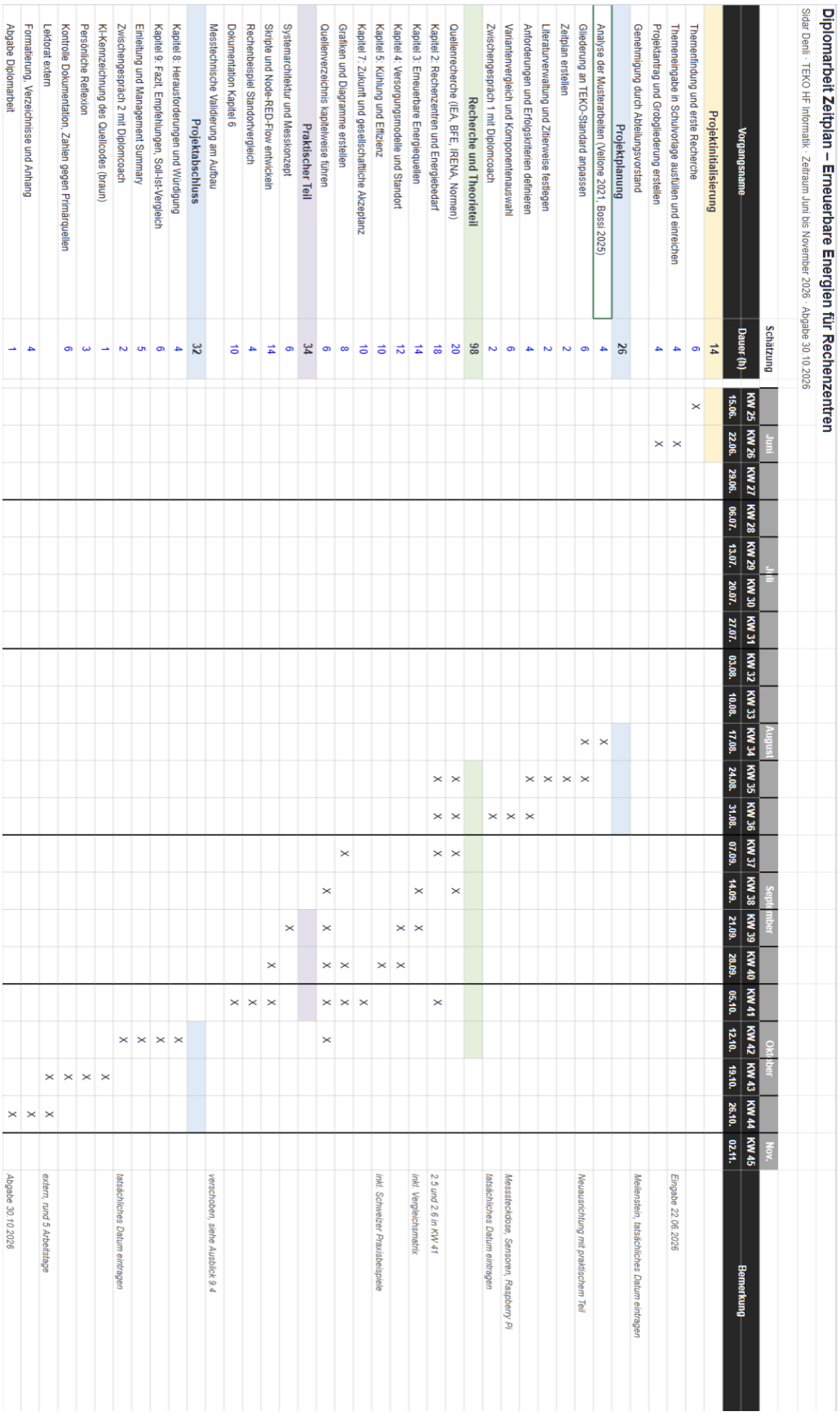
Tabelle 1: Soll-Ist-Vergleich mit den Erfolgskriterien der Themeneingabe

Nr.	Erfolgskriterium (Soll)	Ergebnis (Ist)	Bewertung
1	Mindestens 4 erneuerbare Energiequellen analysiert und in einer Vergleichsmatrix bewertet	Wasserkraft, Photovoltaik, Wind und Geothermie analysiert; Vergleichsmatrix in Tabelle 5	erfüllt
2	Mindestens 3 Fallstudien inkl. Schweizer Beispiel	Google, Microsoft, atNorth in Island sowie fünf Schweizer Rechenzentren (Tabelle 8)	erfüllt
3	Umfang 50–70 Seiten mit praktischem Begleitprojekt	Demonstrator konzipiert und implementiert; Kennzahlen als Erwartungswerte berechnet, messtechnische Validierung ausstehend	teilweise erfüllt
4	Klar formulierte, begründete und anwendbare Handlungsempfehlungen	acht Handlungsempfehlungen in Abschnitt 9.2	erfüllt

1.7 Aufbau der Arbeit

Kapitel 2 beschreibt Rechenzentren, ihren Energiebedarf, den Einfluss von KI, die Situation in der Schweiz sowie die Kennzahl PUE und den regulatorischen Rahmen. Kapitel 3 vergleicht die erneuerbaren Energiequellen und schliesst mit einer Vergleichsmatrix. Kapitel 4 behandelt Versorgungsmodelle, Speicher und die CO_2-Intensität verschiedener Strommixe. Kapitel 5 widmet sich der Kühlung als grösstem Effizienzhebel und stellt Praxisbeispiele vor. Kapitel 6 dokumentiert Konzeption und Implementierung des Mini-Rechenzentrums sowie das Rechenbeispiel zum Standortvergleich. Kapitel 7 richtet den Blick auf zukünftige Energiequellen und die gesellschaftliche Akzeptanz. Kapitel 8 würdigt die Ergebnisse kritisch, bevor Kapitel 9 die Fragestellungen beantwortet und Handlungsempfehlungen form

1.8 Terminplan



Diplomarbeit Zeitplan – Erneuerbare Energien für Rechenzentren

Sidar Denli · TEKO HF Informatik · Zeitraum Juni bis November 2026 · Abgabe 30.10.2026

Vorgangsname	Schätzung Dauer (h)	Juni KW 25 15.06.	Juni KW 26 22.06.	Juni KW 27 29.06.	Juli KW 28 06.07.	Juli KW 29 13.07.	Juli KW 30 20.07.	Juli KW 31 27.07.	August KW 32 03.08.	August KW 33 10.08.	August KW 34 17.08.	August KW 35 24.08.	August KW 36 31.08.	September KW 37 07.09.	September KW 38 14.09.	September KW 39 21.09.	September KW 40 28.09.	Oktober KW 41 05.10.	Oktober KW 42 12.10.	Oktober KW 43 19.10.	Oktober KW 44 26.10.	Nov. KW 45 02.11.	Bemerkung
Projektinitialisierung	14																						
Themenfindung und erste Recherche	6	X																					
Themeneingabe in Schulvorlage ausfüllen und einreichen	4		X																				*Eingabe 22.06.2026*
Projektantrag und Grobgliederung erstellen	4		X																				
Genehmigung durch Abteilungsvorstand																							*Meilenstein, tatsächliches Datum eintragen*
Projektplanung	26																						
Analyse der Musterarbeiten (Vellone 2021, Bossi 2025)	4									X													
Gliederung an TEKO-Standard anpassen	6									X	X												*Neuausrichtung mit praktischem Teil*
Zeitplan erstellen	2										X												
Literaturverwaltung und Zitierweise festlegen	2										X												
Anforderungen und Erfolgskriterien definieren	4											X	X										
Variantenvergleich und Komponentenauswahl	6												X										*Messstellen, Sensoren, Raspberry Pi*
Zwischengespräch 1 mit Diplomcoach	2												X										*tatsächliches Datum eintragen*
Recherche und Theorieteil	98											X	X	X	X	X	X	X					
Quellenrecherche (IEA, BFE, IRENA, Normen)	20											X	X	X	X	X	X	X					
Kapitel 2: Rechenzentren und Energiebedarf	18											X	X	X	X	X	X	X					
Kapitel 3: Erneuerbare Energiequellen	14														X	X	X	X					*2.5 und 2.6 in KW 41*
Kapitel 4: Versorgungsmodelle und Standort	12															X	X	X					*inkl. Vergleichsmatrix*
Kapitel 5: Kühlung und Effizienz	10															X	X	X					
Kapitel 7: Zukunft und gesellschaftliche Akzeptanz	10													X				X					*inkl. Schweizer Praxisbeispiele*
Grafiken und Diagramme erstellen	8															X	X	X					
Quellenverzeichnis kapitelweise führen	6														X	X	X	X					
Praktischer Teil	34																						
Systemarchitektur und Messkonzept	6															X							
Skripte und Node-RED-Flow entwickeln	14																X	X					
Rechenbeispiel Standortvergleich	4																	X					
Dokumentation Kapitel 6	10																	X					
Messtechnische Validierung am Aufbau																							*verschoben, siehe Ausblick 9.4*
Projektabschluss	32																						
Kapitel 8: Herausforderungen und Würdigung	4																		X				
Kapitel 9: Fazit, Empfehlungen, Soll-Ist-Vergleich	6																		X				
Einleitung und Management Summary	5																		X				
Zwischengespräch 2 mit Diplomcoach	2																		X				*tatsächliches Datum eintragen*
KI-Kennzeichnung des Quellcodes (braun)	1																			X			
Persönliche Reflexion	3																			X			
Kontrolle Dokumentation, Zahlen gegen Primärquellen	6																			X			
Lektorat extern																				X	X		*extern, rund 5 Arbeitstage*
Formatierung, Verzeichnisse und Anhang	4																				X		
Abgabe Diplomarbeit	1																				X		*Abgabe 30.10.2026*

2 Rechenzentren und ihr Energiebedarf

2.1 Grundlagen

2.1.1 Begriff und Typen von Rechenzentren

Ein Rechenzentrum ist eine bauliche Einrichtung, in der IT-Systeme zur Verarbeitung, Speicherung und Übertragung von Daten zentral betrieben werden. Neben den eigentlichen Servern umfasst es stets die technische Infrastruktur, die deren unterbrechungsfreien Betrieb sicherstellt: Stromversorgung, Kühlung, Brandschutz und physische Zutrittskontrolle.

In der Fachliteratur werden üblicherweise vier Kategorien unterschieden, die sich in Grösse, Betreibermodell und Effizienz deutlich unterscheiden:

- **Enterprise-Rechenzentren** werden von einem Unternehmen für den Eigenbedarf betrieben, häufig im eigenen Gebäude. Sie sind oft über Jahre gewachsen, ohne dass die Kühlinfrastruktur im gleichen Mass modernisiert wurde, und weisen deshalb im Durchschnitt die schlechtesten Effizienzwerte auf.
- **Colocation-Rechenzentren** vermieten Fläche, Strom und Netzanbindung an mehrere Kunden. Der Betreiber verantwortet die Infrastruktur, die Kunden bringen ihre eigene Hardware ein. Dieses Modell prägt den kommerziellen Schweizer Markt.
- **Hyperscale-Rechenzentren** werden von grossen Cloud-Anbietern wie Google, Microsoft oder Amazon betrieben. Sie sind standardisiert, auf maximale Effizienz ausgelegt und erreichen die besten Kennzahlen der Branche.
- **Edge-Rechenzentren** sind kleine, dezentrale Anlagen nahe beim Nutzer. Sie verringern Latenzzeiten, spielen beim Gesamtverbrauch bislang aber eine untergeordnete Rolle.

2.1.2 Aufbau und Energieverbraucher

Der Energiebedarf eines Rechenzentrums verteilt sich auf mehrere Funktionsbereiche. Die IEA gliedert ihn wie in Tabelle 1 dargestellt (IEA, 2025).

Tabelle 2: Energieverbraucher in einem Rechenzentrum (eigene Darstellung nach IEA, 2025)

Komponente	Funktion	Anteil am Verbrauch
Server	Rechenleistung (CPU, GPU)	rund 60 %
Speichersysteme	Datenhaltung und Backup	rund 5 %
Netzwerktechnik	Switches, Router, Load Balancer	bis 5 %
Kühlung und Klimatisierung	Temperatur- und Feuchteregelung	7 % bis über 30 %
USV und Notstrom	Ausfallsicherheit, Umwandlungsverluste	variabel

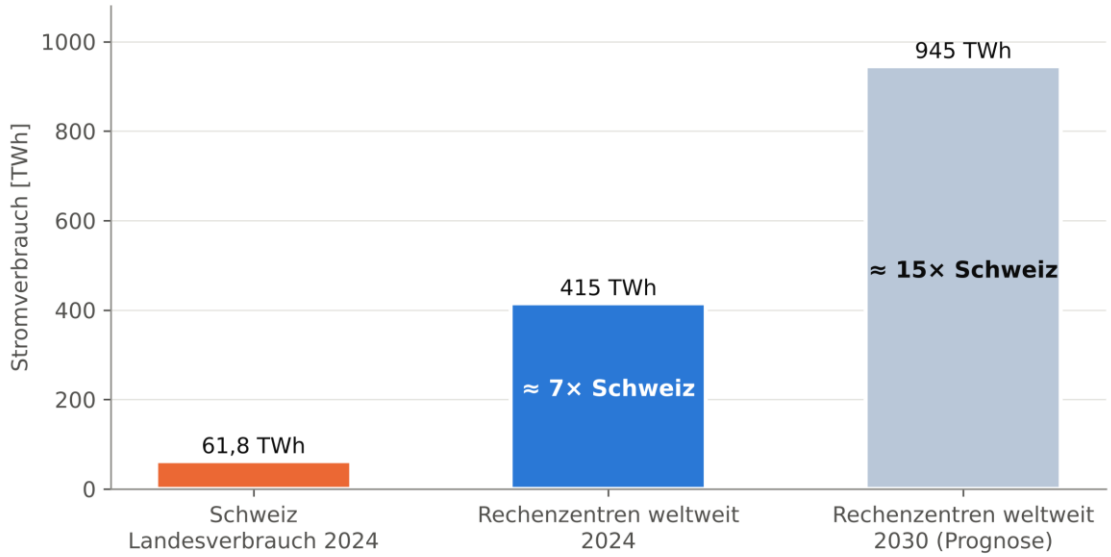
Bemerkenswert ist die grosse Spannweite beim Kühlungsbedarf: Effiziente Hyperscale-Anlagen benötigen dafür rund 7 Prozent ihres Gesamtverbrauchs, während es bei weniger effizienten Enterprise-Rechenzentren über 30 Prozent sind (IEA, 2025). Damit ist die Kühlung neben der IT selbst der grösste einzelne Effizienzhebel. Sie wird in Kapitel 5 vertieft und im praktischen Teil dieser Arbeit gezielt als eigenständige Messgrösse erfasst.

2.2 Der globale Energieverbrauch

2.2.1 Ausgangslage

Rechenzentren verbrauchten 2024 weltweit rund 415 TWh Strom. Das entspricht etwa 1,5 Prozent des globalen Stromverbrauchs. Seit 2017 stieg ihr Stromverbrauch jährlich um rund 12 Prozent und damit mehr als viermal so schnell wie der gesamte Stromverbrauch (IEA, 2025).

Diese Grössenordnung lässt sich anschaulich einordnen: Der gesamte Landesverbrauch der Schweiz lag im selben Jahr bei 61,8 TWh (BFE, 2025a). Weltweit verbrauchen Rechenzentren somit rund siebenmal so viel Strom, wie die Schweiz für Haushalte, Industrie, Dienstleistungen und Verkehr zusammen benötigt. Legt man die IEA-Prognose für 2030 zugrunde, steigt dieses Verhältnis auf etwa das Fünfzehnfache. Abbildung 1 veranschaulicht den Vergleich.



Eigene Darstellung nach IEA (2025) und BFE (2025a). Verhältniszahlen: eigene Berechnung.

Abbildung 1: Stromverbrauch von Rechenzentren im Vergleich zum Schweizer Landesverbrauch

2.2.2 Geografische Verteilung

Der Verbrauch ist räumlich stark konzentriert. Auf die Vereinigten Staaten entfielen 2024 rund 45 Prozent des weltweiten Stromverbrauchs von Rechenzentren, auf China 25 Prozent und auf Europa 15 Prozent (IEA, 2025). Abbildung 2 zeigt diese Verteilung.

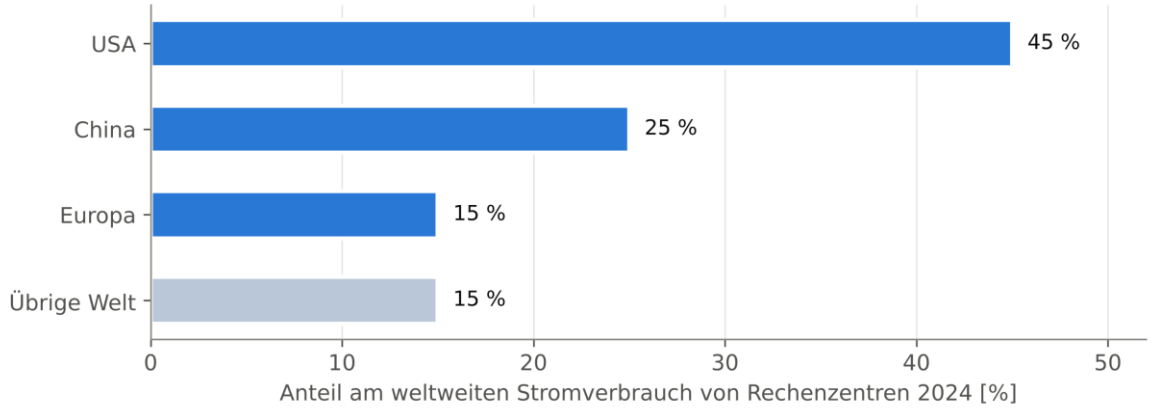
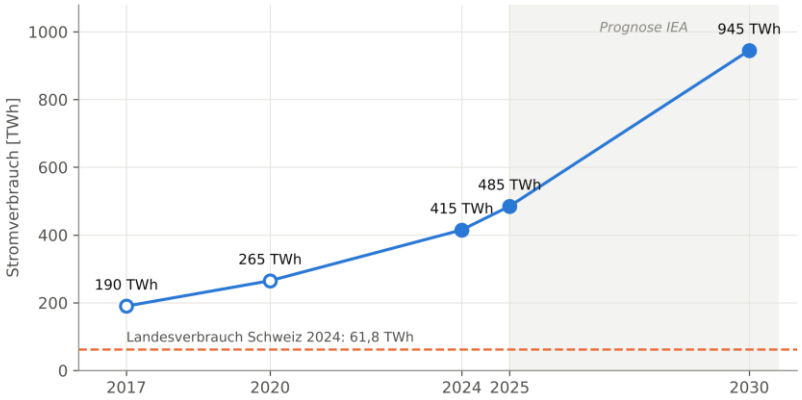


Abbildung 2: Regionale Verteilung des Stromverbrauchs von Rechenzentren 2024

Innerhalb dieser Regionen konzentriert sich die Kapazität noch stärker. In den USA entfällt knapp die Hälfte der Rechenzentrumskapazität auf nur fünf regionale Cluster (IEA, 2025). Im Bundesstaat Virginia verursachen Rechenzentren rund ein Viertel, in Irland rund ein Fünftel des gesamten Stromverbrauchs (Carbon Brief, 2025). Diese Konzentration verdeutlicht, dass die Standortwahl nicht nur die CO_2-Bilanz einzelner Betreiber beeinflusst, sondern ganze Stromnetze belasten kann.

2.2.3 Prognosen bis 2030

Im Basisszenario der IEA verdoppelt sich der Verbrauch bis 2030 auf rund 945 TWh (IEA, 2025). Die bisherige Entwicklung bestätigt diese Prognose: 2025 stieg die Stromnachfrage von Rechenzentren um 17 Prozent, während der weltweite Stromverbrauch insgesamt lediglich um 3 Prozent zunahm (IEA, 2026). Treiber ist eine aussergewöhnliche Investitionsdynamik: Die Investitionsausgaben der fünf grössten Technologiekonzerne überschritten 2025 die Marke von 400 Milliarden US-Dollar und sollen 2026 nochmals um rund 75 Prozent steigen (IEA, 2026). Abbildung 3 fasst diese Entwicklung zusammen.



Eigene Darstellung nach IEA (2025), IEA (2026) und BFE (2025a). Hohle Punkte: eigene Rückrechnung mit der IEA-Wachstumsrate von 12 %/Jahr; 2025: 415 TWh + 17 %.

Abbildung 3: Globaler Stromverbrauch von Rechenzentren 2017–2030

Die Werte für 2017 und 2020 sind in Abbildung 3 als separate Rückrechnungen auf Grundlage der von der IEA angegebenen durchschnittlichen Wachstumsrate ausgewiesen. Der Wert für 2025 wurde ausgehend vom Wert für 2024 und dem dokumentierten Wachstum von 17 Prozent ermittelt.

2.2.4 Unsicherheiten der Prognosen

Bei der Interpretation dieser Zahlen ist methodische Vorsicht geboten. Die Datengrundlage beruht überwiegend auf Angaben der Betreiber und auf Hochrechnungen aus Kapazitätsmeldungen; eine international einheitliche, verpflichtende Erfassung besteht erst in Ansätzen (vgl. Abschnitt 2.6).

Hinzu kommen zwei gegenläufige Effekte. Einerseits sinkt der Energiebedarf pro Rechenoperation rasch; die IEA bezeichnet die Effizienzgewinne bei KI-Anwendungen als in der Geschichte der Energie beispiellos (IEA, 2026). Andererseits wächst die Nutzung noch schneller: mehr Nutzer, häufigere Anfragen und rechenintensivere Anwendungen wie KI-Agenten. Dieses Spannungsverhältnis wird im folgenden Abschnitt vertieft.

2.3 Der KI-Effekt

2.3.1 Warum KI-Rechenzentren anders sind

Klassische Anwendungen wie Webhosting oder Datenbanken erzeugen eine relativ gleichmässige Grundlast. KI-Systeme benötigen dagegen spezialisierte Beschleuniger, meist Grafikprozessoren (GPUs), mit einer deutlich höheren Leistungsdichte pro Rack. Die IEA erwartet, dass der Stromverbrauch solcher beschleunigter Server jährlich um 30 Prozent wächst, jener konventioneller Server dagegen nur um 9 Prozent (IEA, 2025).

Ein typisches KI-fokussiertes Rechenzentrum verbraucht so viel Strom wie 100'000 Haushalte; die grössten derzeit im Bau befindlichen Anlagen werden das Zwanzigfache benötigen (IEA, 2025).

2.3.2 Training und Inferenz

Der Energiebedarf von KI verteilt sich auf zwei grundlegend verschiedene Phasen:

- **• Training bezeichnet das Anlernen eines Modells. Dabei sind über Wochen oder Monate Tausende Beschleuniger gleichzeitig im Einsatz. Für das Training von GPT-3 wird ein Verbrauch von rund 1,29 Gigawattstunden (GWh) geschätzt, für GPT-4 bereits ein Verbrauch von über 50 GWh (Electricity Demand and Grid Impacts of AI Data Centers, 2025).**
- **• Inferenz bezeichnet den laufenden Betrieb, also jede einzelne Nutzeranfrage. Der Verbrauch pro Anfrage ist gering, summiert sich jedoch zu erheblichen Mengen. Für eine Anfrage an ein generatives KI-Modell wurde 2024 ein Verbrauch von rund 2,9 Wattstunden geschätzt, verglichen mit etwa 0,3 Wattstunden für eine herkömmliche Suchanfrage. Neuere Messungen ergeben einen Median von 0,24 bis 0,3 Wattstunden; komplexe oder multimodale Anfragen können deutlich darüber liegen (Brookings, 2026).**

2.3.3 Ein Widerspruch in der Forschung

Die Fachliteratur gewichtet die beiden Phasen unterschiedlich. Eine verbreitete Einschätzung geht davon aus, dass 80 bis 90 Prozent der KI-Rechenleistung auf Inferenz entfallen, weil Training einmalig, Nutzung hingegen dauerhaft stattfindet (Brookings, 2026). Auch Our World in Data kommt zum Schluss, dass der Energiebedarf wahrscheinlich von der Inferenz dominiert wird (Our World in Data, 2026).

Eine 2026 in der Fachzeitschrift Joule veröffentlichte Untersuchung widerspricht dieser Gewichtung jedoch in einem entscheidenden Punkt: Die grösste Belastung der Stromnetze entstehe nicht durch die Inferenz, sondern durch Trainingslasten, das Tempo der KI-Verbreitung und den räumlich konzentrierten Kapazitätsaufbau (Energy use of AI inference, 2026).

Der Widerspruch löst sich auf, wenn man zwei Fragen unterscheidet. Gemessen am **Energieverbrauch** dominiert die Inferenz, die über viele Standorte verteilt ist. Gemessen an der **Netzbelastung** dominiert das Training, das konzentriert und mit hohen Lastspitzen auftritt. Für die Fragestellung dieser Arbeit ist die zweite Perspektive besonders relevant, weil sie die Anforderungen an die Energieversorgung bestimmt.

2.3.4 Lastschwankungen als neue Herausforderung

KI verändert nicht nur die Höhe, sondern auch das Profil der Last. Die IEA stellt fest, dass KI-Training und Modellnutzung im Unterschied zum herkömmlichen Rechenzentrumsbetrieb grosse und schnelle Leistungsschwankungen verursachen, weshalb Energiespeicher für eine zuverlässige Versorgung entscheidend werden (IEA, 2026). Die Versorgung von KI-Rechenzentren ist damit nicht allein eine Frage der verfügbaren Energiemenge, sondern auch der Fähigkeit, Lastspitzen abzufedern. Lösungsansätze dafür werden in Abschnitt 4.3 behandelt.

2.3.5 Das Effizienzparadox

Die Entwicklung des KI-Energiebedarfs wird von zwei gegenläufigen Kräften bestimmt. Der Energiebedarf pro Anfrage sinkt, wie der Rückgang von 2,9 auf 0,24 bis 0,3 Wattstunden zeigt. Gleichzeitig meldeten die grossen Modellanbieter innerhalb eines Jahres eine Verdreifachung der aktiven Nutzer und eine Verfünffachung ihrer Umsätze (IEA, 2026).

In der Energieökonomie wird dieses Phänomen als **Rebound-Effekt** bezeichnet: Effizienzgewinne senken die Kosten einer Leistung und fördern dadurch deren vermehrte Nutzung, sodass die erwartete Einsparung teilweise oder vollständig aufgezehrt wird (Sorrell, 2009). Im Fall von KI wird die Einsparung nicht nur aufgezehrt, sondern überkompensiert: Der Gesamtverbrauch steigt trotz sinkendem Verbrauch pro Vorgang.

2.4 Rechenzentren in der Schweiz

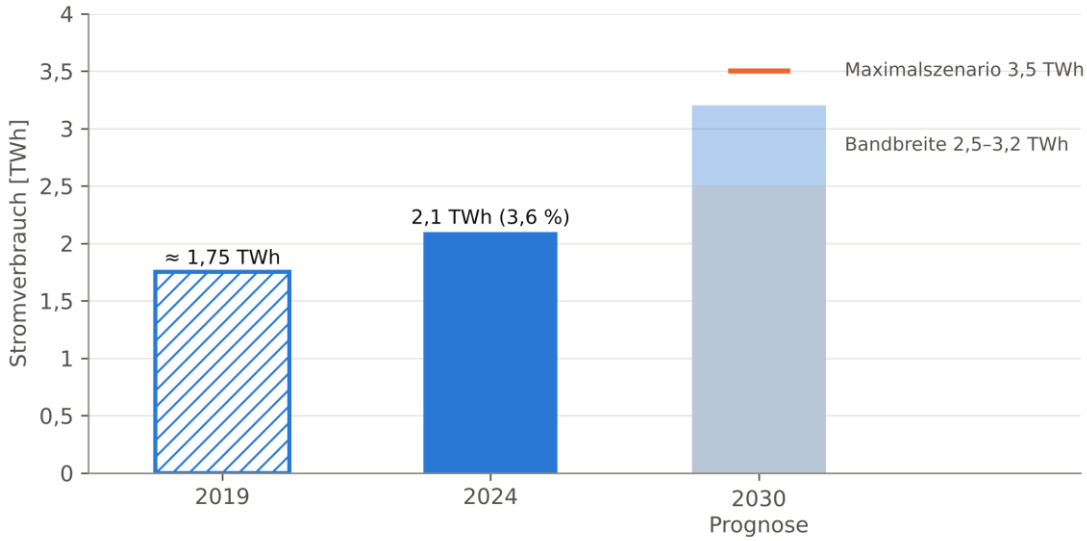
2.4.1 Aktueller Stand

Für die Schweiz liegt seit Mai 2026 eine im Auftrag von EnergieSchweiz erstellte Studie vor. Demnach verbrauchten Schweizer Rechenzentren im Jahr 2024 rund 2,1 TWh Strom, was etwa 3,6 Prozent des Landesverbrauchs entspricht. Auf grosse kommerzielle Rechenzentren entfielen 44 Prozent des Verbrauchs, auf unternehmensinterne Anlagen 56 Prozent (BFE, 2026).

Der hohe Anteil unternehmensinterner Rechenzentren ist bemerkenswert. Da gerade diese Kategorie tendenziell schlechtere Effizienzwerte aufweist (vgl. Abschnitt 2.1.1), liegt hier ein erhebliches Optimierungspotenzial. Die Studie beziffert das gesamte Effizienzpotenzial auf 200 bis 400 Gigawattstunden, im Mittel rund 14 Prozent des Verbrauchs (IT Reseller, 2026). Regional ist die Bedeutung teils noch grösser: Im Kanton Zürich entfielen 2024 rund 6 Prozent des Stromverbrauchs auf Rechenzentren (IT Reseller, 2026).

2.4.2 Entwicklung und Prognose

Seit 2019 ist der Stromverbrauch der Schweizer Rechenzentren um knapp 20 Prozent gestiegen. Ohne die seither erzielten Effizienzgewinne der Hardware wäre er nach Angaben der Studie um 20 bis 40 Prozent höher ausgefallen. Für 2030 werden 2,5 bis 3,2 TWh erwartet; in einem Maximalszenario sind bis zu 3,5 TWh möglich, was rund 6 Prozent des Landesverbrauchs von 2024 entspräche (BFE, 2026; IT Reseller, 2026). Abbildung 4 zeigt diese Entwicklung.



Eigene Darstellung nach BFE (2026). Wert 2019 schraffiert: eigene Rückrechnung aus der Angabe «knapp 20 % Zunahme seit 2019».

Abbildung 4: Stromverbrauch der Rechenzentren in der Schweiz 2019–2030

Auffällig ist, dass das erwartete Schweizer Wachstum mit 20 bis 50 Prozent bis 2030 deutlich moderater ausfällt als die weltweit erwartete Verdopplung. Als mögliche Gründe kommen begrenzte Netzanschlusskapazitäten, hohe Flächen- und Strompreise sowie das bislang weitgehende Fehlen grosser Hyperscale-Ansiedlungen in Frage. Projekte wie das geplante KI-Rechenzentrum von Flexbase in Laufenburg mit bis zu 500 Megawatt Leistung (IT Reseller, 2026)

zeigen jedoch, dass sich dies ändern könnte; ein einzelnes Vorhaben dieser Grösse würde die heutigen Prognosen deutlich übersteigen.

2.4.3 Die Ausgangslage der Schweiz

Für die Fragestellung dieser Arbeit ist die Schweiz aus einem bestimmten Grund ein besonders interessanter Standort: Ihr Strommix weist mit rund 40 Gramm CO_2 pro Kilowattstunde eine sehr niedrige CO_2-Intensität auf, während es in Indien über 600 Gramm sind (Allianz Trade, 2026). Dieselbe Rechenleistung verursacht hier somit ein Vielfaches weniger Emissionen. Dieser Umstand begründet die zentrale These der Arbeit und wird in Abschnitt 4.4 sowie im Rechenbeispiel in Abschnitt 6.6 vertieft.

2.4.4 Politische Debatte

Der wachsende Strombedarf von Rechenzentren ist in der Schweiz zunehmend Gegenstand politischer Auseinandersetzung. Der Kantonsrat Schaffhausen hat einen Vorstoss angenommen, der die Wiederverwendung der Abwärme von Rechenzentren fordert. Während bürgerliche Stimmen die Zuständigkeit bei den Kantonen sehen, fordern andere nationale Regeln zu Stromherkunft, Abwärme und Wasserverbrauch (SRF, 2026).

Anders als in der Europäischen Union besteht in der Schweiz bislang keine verbindliche Berichtspflicht zum Energieverbrauch von Rechenzentren. Die verfügbaren Zahlen beruhen deshalb auf Erhebungen und Hochrechnungen, was bei ihrer Interpretation zu berücksichtigen ist.

2.5 Die Kennzahl PUE

2.5.1 Herkunft und Definition

Die Power Usage Effectiveness (PUE) ist die bekannteste Kennzahl zur Bewertung der Energieeffizienz von Rechenzentren. Sie wurde 2006 von der Branchenorganisation The Green Grid eingeführt und ist heute normativ verankert: international seit 2016 in der ISO/IEC 30134-2, europäisch in der DIN EN 50600-4-2 (prior1, 2026).

Die PUE setzt den jährlichen Gesamtenergiebedarf eines Rechenzentrums ins Verhältnis zum jährlichen Energiebedarf der IT-Ausrüstung (Stulz, o. J.):

PUE = Gesamtenergiebedarf des Rechenzentrums [kWh] ÷ Energiebedarf der IT-Ausrüstung [kWh]

Die Kennzahl gibt an, wie viel Energie über den reinen IT-Bedarf hinaus für die unterstützende Infrastruktur aufgewendet wird, insbesondere für Kühlung, unterbrechungsfreie Stromversorgung und Beleuchtung.

2.5.2 Interpretation und Referenzwerte

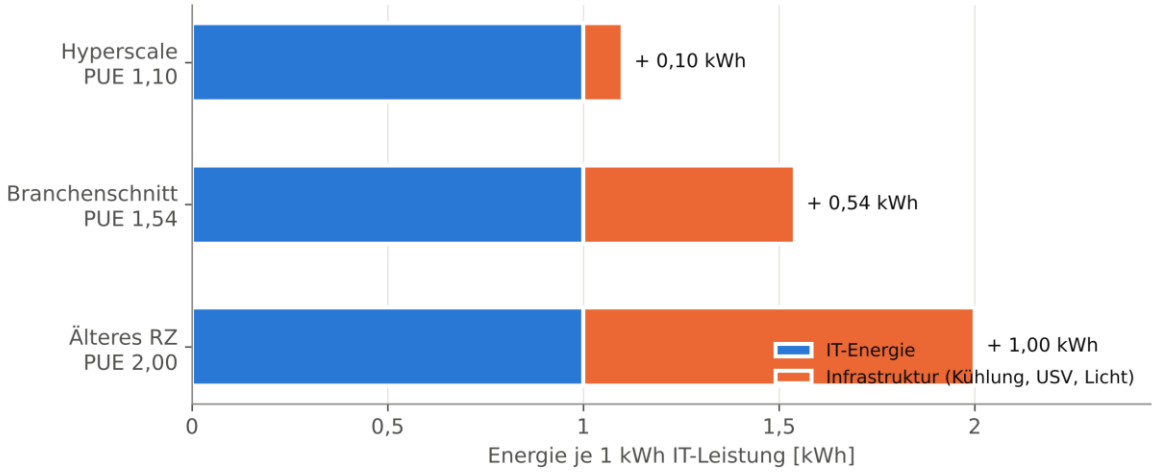
Der theoretische Wertebereich beginnt bei 1,0. Das würde bedeuten, dass die gesamte zugeführte Energie ausschliesslich der IT zugutekommt (ComConsult, 2026). Ein Beispiel zeigt die

Berechnung: Verbraucht ein Rechenzentrum jährlich 1'000'000 kWh für die IT und insgesamt 2'000'000 kWh, liegt der PUE bei 2,0. Für jede Kilowattstunde Rechenleistung wird also eine weitere Kilowattstunde für die Infrastruktur benötigt (aquatherm, 2026).

Tabelle 3: Einordnung typischer PUE-Werte (eigene Darstellung nach Google, o. J.; prior1, 2026)

PUE-Wert	Einordnung
1,0	theoretisches Minimum, praktisch nicht erreichbar
1,1 bis 1,2	hocheffiziente Hyperscale-Anlagen
rund 1,54	globaler Durchschnitt gemäss Uptime Institute (2025)
2,0 bis 3,0	ältere Rechenzentren

Gemäss der Umfrage des Uptime Institute lag der durchschnittliche PUE der befragten Rechenzentren 2025 bei 1,54 (Google, o. J.). Für jede Kilowattstunde Rechenleistung wird im Mittel also mehr als eine halbe Kilowattstunde für Infrastruktur aufgewendet. Ältere Anlagen erreichen Werte von 2,0 oder im schlechtesten Fall 3,0 (prior1, 2026). Abbildung 5 veranschaulicht diese Unterschiede.



Eigene Darstellung. Durchschnittswert: Uptime Institute (2025), zitiert nach Google (o. J.).

Abbildung 5: Bedeutung des PUE: Energieaufwand für Infrastruktur je Kilowattstunde IT-Leistung

2.5.3 Messkategorien

Die DIN EN 50600-4-2 unterscheidet Messkategorien nach der Lage der Messpunkte. Die Kategorie wird dem PUE tiefgestellt angefügt, etwa PUE_1 für eine Messung der Kategorie 1 (Stulz, o. J.). Je höher die Kategorie, desto feiner die Auflösung, von der Erfassung an der Hauptstromversorgung bis zur Messung direkt an den IT-Geräten (Socomec, 2026). Die Messung im praktischen Teil dieser Arbeit erfolgt an der Steckdose und entspricht damit einer einfachen Messkategorie; diese Einordnung wird in Abschnitt 6.7 aufgegriffen.

2.5.4 Grenzen der Kennzahl

Trotz ihrer Verbreitung hat die PUE klare Grenzen:

- **Das Aussenklima bleibt unberücksichtigt.** Bei Freiluftkühlung hat ein Rechenzentrum in Alaska gegenüber einer identischen Anlage in Miami einen deutlichen Vorteil, ohne dass dies ein Verdienst des Betreibers wäre (prior1, 2026).
- **Redundanz verschlechtert die Kennzahl.** Höhere Redundanzstufen nach Tier III oder IV erhöhen den Energiebedarf strukturell (aquatherm, 2026). Eine bewusst robuste Anlage erscheint dadurch ineffizienter.
- **Die IT-Effizienz wird nicht erfasst.** Ob Server ihre Energie sinnvoll nutzen oder im Leerlauf laufen, zeigt die PUE nicht. Paradoxerweise verbessert sich der Wert sogar, wenn die IT mehr Strom verbraucht, weil der Nenner der Formel wächst. Dieser Effekt zeigt sich auch im Rechenbeispiel des Demonstrators in Abschnitt 6.6.
- **Der Energiemix bleibt aussen vor.** Ein Rechenzentrum mit sehr niedrigem PUE kann abhängig vom eingesetzten Energiemix eine schlechtere Klimabilanz aufweisen als eines mit höherem PUE (aquatherm, 2026).

Der letzte Punkt bestätigt die zentrale These dieser Arbeit aus der Fachliteratur: Die Effizienz allein sagt wenig über die tatsächliche Klimawirkung aus. Entscheidend ist, woher der Strom stammt.

2.5.5 Ergänzende Kennzahlen

Die Normenreihe DIN EN 50600-4 sieht deshalb weitere Kennzahlen vor, die den PUE ergänzen (Tabelle 3).

Tabelle 4: Kennzahlen der Normenreihe DIN EN 50600-4 (eigene Darstellung nach rechenzentren.org, 2026; Öko-Institut, o. J.; Stulz, o. J.)

Kennzahl	Norm	Was sie misst	Idealwert
PUE – Power Usage Effectiveness	EN 50600-4-2	Verhältnis Gesamt- zu IT-Energiebedarf	1,0
REF – Renewable Energy Factor	EN 50600-4-3	Anteil erneuerbarer Energien	1,0
ERF – Energy Reuse Factor	EN 50600-4-6	Anteil extern genutzter Abwärme	möglichst hoch
CER – Cooling Efficiency Ratio	EN 50600-4-7	Effizienz der Kühlung	möglichst hoch
CUE – Carbon Usage Effectiveness	EN 50600-4-8	CO_2-Emissionen je kWh IT-Energie	0
WUE – Water Usage Effectiveness	EN 50600-4-9	Wasserverbrauch je kWh IT-Energie	0

Für diese Arbeit ist die **Carbon Usage Effectiveness (CUE)** von besonderer Bedeutung:

$$\text{CUE} = \text{CO}_2\text{-Emissionen [kg CO}_2\text{eq]} \div \text{Energiebedarf der IT-Ausrüstung [kWh]}$$

Ein idealer CUE-Wert wäre 0 (Stulz, o. J.). Da sich die Emissionen aus dem Gesamtenergiebedarf und der CO_2-Intensität des bezogenen Stroms ergeben, lässt sich der CUE nach The Green Grid auch als Produkt aus dem CO_2-Emissionsfaktor des Stroms (Carbon Emission Factor, CEF) und dem PUE darstellen (The Green Grid, 2010):

$$\text{CUE} = \text{CEF [kg CO}_2\text{/kWh]} \times \text{PUE}$$

Diese Beziehung zeigt den Kern der Arbeit in einer Formel: Die Klimawirkung eines Rechenzentrums ergibt sich aus Effizienz (PUE) **und** Strommix (CEF). Sie bildet die Berechnungsgrundlage des Demonstrators in Kapitel 6. Einschränkend ist festzuhalten, dass der CUE nur betriebliche Emissionen erfasst; vorgelagerte Emissionen, etwa aus der Hardwareproduktion, bleiben unberücksichtigt (Stulz, o. J.).

Die **Water Usage Effectiveness (WUE)** sollte bei der Bewertung von Kühlsystemen ergänzend betrachtet werden, da sich PUE und WUE gegenseitig beeinflussen (ComConsult, 2026): Verdunstungskühlung verbessert oft den PUE, erhöht aber den Wasserverbrauch.

2.6 Regulatorisches Umfeld

2.6.1 Europäische Union

Mit der Neufassung der Energieeffizienzrichtlinie hat die EU erstmals eine Berichtspflicht für Rechenzentren eingeführt. Die Delegierte Verordnung (EU) 2024/1364, in Kraft seit Juni 2024, verpflichtet Betreiber mit einer installierten IT-Leistung von mindestens 500 Kilowatt, Kennzahlen zu Energie- und Wasserverbrauch, Abwärmenutzung und erneuerbarem Strom an eine europäische Datenbank zu melden (Europäische Kommission, 2024; DLA Piper, 2024). Ziel ist ein gemeinsames Bewertungssystem für die Nachhaltigkeit von Rechenzentren in der EU.

2.6.2 Deutschland

Deutschland geht mit dem Energieeffizienzgesetz (EnEfG) deutlich weiter und schreibt erstmals verbindliche Grenzwerte vor. Tabelle 4 fasst die Anforderungen des § 11 EnEfG zusammen.

Tabelle 5: Anforderungen an Rechenzentren nach § 11 EnEfG (eigene Darstellung nach EnEfG, 2023)

Anforderung	Stichtag	Vorgabe
PUE bestehender Rechenzentren	ab 1. Juli 2027	höchstens 1,5
PUE bestehender Rechenzentren	ab 1. Juli 2030	höchstens 1,3
PUE neuer Rechenzentren (Betrieb ab 1. Juli 2026)	spätestens 2 Jahre nach Inbetriebnahme	höchstens 1,2
Anteil wiederverwendeter Energie, neue Rechenzentren	Betrieb ab Juli 2026 / 2027 / 2028	10 % / 15 % / 20 %
Strom aus erneuerbaren Energien (bilanziell)	ab 1. Januar 2024	50 %
Strom aus erneuerbaren Energien (bilanziell)	ab 1. Januar 2027	100 %

Bemerkenswert ist der Grenzwert von 1,2 für neue Rechenzentren. Er liegt deutlich unter dem globalen Durchschnitt von 1,54 und gilt in der Branche als anspruchsvoll, insbesondere für Anlagen mit hoher Redundanz. Zudem verlangt das Gesetz die Einführung eines Energie- oder Umweltmanagementsystems und eine Meldung an ein nationales Rechenzentrumsregister (DLA Piper, 2024).

2.6.3 Schweiz

In der Schweiz bestehen bislang keine spezifischen gesetzlichen Effizienzvorgaben für Rechenzentren. Der Bund setzt auf freiwillige Massnahmen und Information, etwa über das Programm EnergieSchweiz, und kündigte an, Verbrauch und Effizienz künftig verstärkt zu beobachten (BFE, 2026). Regulierung entsteht derzeit vor allem auf kantonaler Ebene, etwa mit Vorstössen zur Abwärmenutzung (SRF, 2026). Für Schweizer Betreiber mit Kunden oder Standorten in der EU sind die europäischen Berichtspflichten dennoch faktisch relevant.

2.7 Zwischenfazit

Der Stromverbrauch von Rechenzentren wächst durch KI stark, und KI verändert zusätzlich das Lastprofil hin zu grossen Schwankungen. Die Schweiz wächst moderater, verfügt aber über ein beträchtliches Effizienzpotenzial, insbesondere bei unternehmensinternen Anlagen. Die Kennzahl PUE misst die Effizienz der Infrastruktur, nicht aber die Klimawirkung; dafür ist die CUE erforderlich, die Effizienz und Strommix verbindet. Die Regulierung zieht in Europa an, während die Schweiz bislang auf Freiwilligkeit setzt.

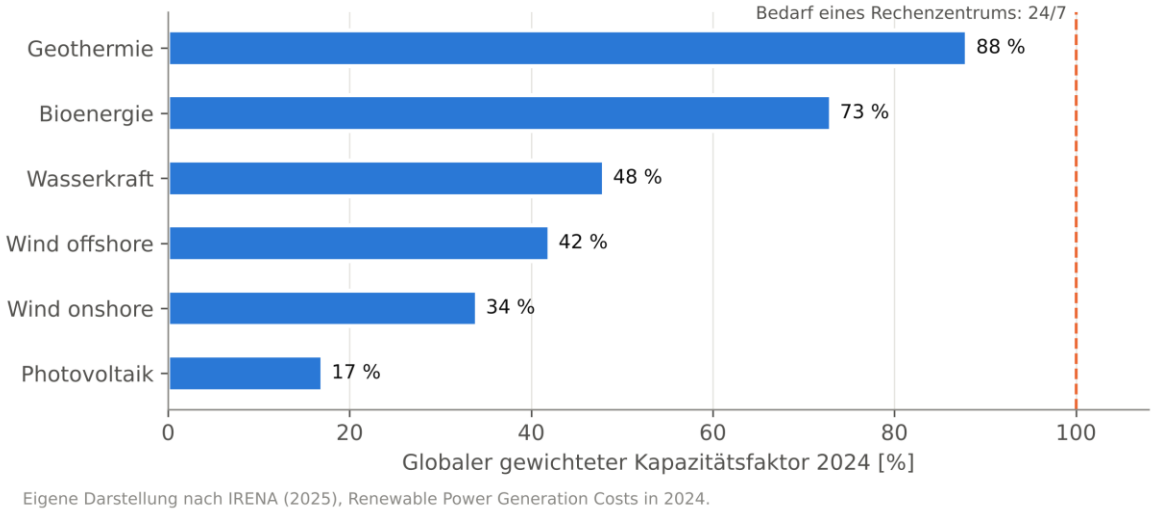
3 Erneuerbare Energiequellen

3.1 Anforderungen des Rechenzentrumsbetriebs an die Energieversorgung

Bevor einzelne Energiequellen bewertet werden können, ist zu klären, was ein Rechenzentrum von seiner Stromversorgung verlangt. Drei Anforderungen stehen im Vordergrund:

- **Kontinuität.** Rechenzentren laufen 24 Stunden an 365 Tagen. Ihr Bedarf ist eine nahezu konstante Bandlast ohne nennenswerte Tag-Nacht- oder Saisonschwankung. Wie in Abschnitt 2.3.4 gezeigt, kommen bei KI-Lasten zusätzlich kurzfristige Lastspitzen hinzu.
- **Verfügbarkeit.** Ein Ausfall der Stromversorgung bedeutet einen Ausfall der Dienste. Rechenzentren sichern sich deshalb mit unterbrechungsfreien Stromversorgungen (USV) und Notstromaggregaten ab; die Primärversorgung muss dennoch zuverlässig sein.
- **Planbarkeit der Kosten.** Strom ist bei Rechenzentren der grösste variable Kostenfaktor. Langfristig stabile Preise sind deshalb ein wesentliches Auswahlkriterium.

Ein zentrales Mass für die erste Anforderung ist der **Kapazitätsfaktor**. Er gibt an, welchen Anteil ihrer theoretisch möglichen Jahresproduktion eine Anlage tatsächlich erzeugt. Ein Kapazitätsfaktor von 100 Prozent würde bedeuten, dass eine Anlage das ganze Jahr ununterbrochen mit voller Leistung produziert, also genau dem Bedarfsprofil eines Rechenzentrums entspricht. Abbildung 6 zeigt die weltweiten Durchschnittswerte für erneuerbare Technologien.



Eigene Darstellung nach IRENA (2025), Renewable Power Generation Costs in 2024.

Abbildung 6: Globale gewichtete Kapazitätsfaktoren erneuerbarer Technologien 2024

Die Spannweite ist erheblich: Photovoltaikanlagen erreichen weltweit im Mittel 17 Prozent, Geothermieanlagen 88 Prozent (IRENA, 2025). Daraus folgt bereits eine wichtige Erkenntnis: Die Eignung einer Quelle für Rechenzentren hängt weniger von ihren Kosten pro Kilowattstunde ab als von ihrer zeitlichen Verfügbarkeit.

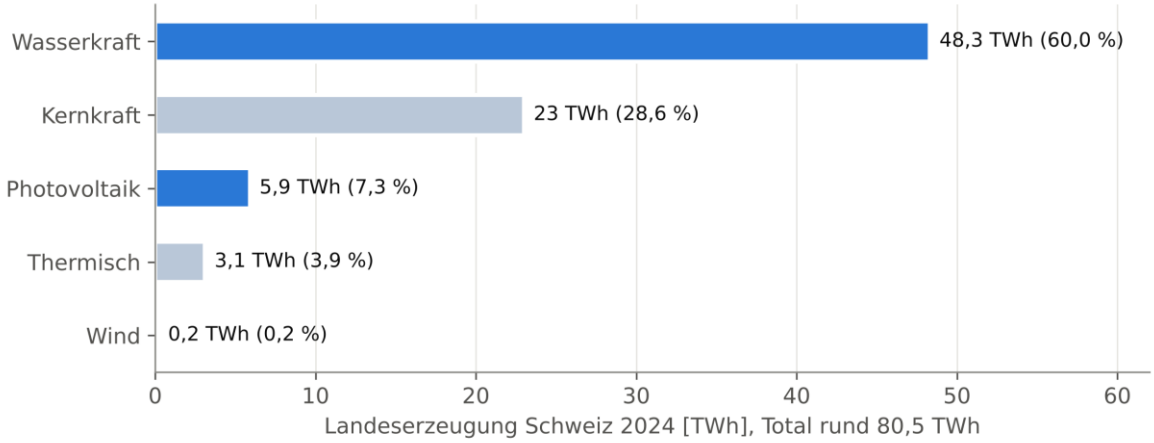
Die folgenden Abschnitte bewerten die vier für die Schweiz und Europa relevantesten Quellen nach einem einheitlichen Schema: Funktionsprinzip, Verfügbarkeit, Eignung für den 24/7-Betrieb, Kosten und Grenzen.

3.2 Wasserkraft

Funktionsprinzip. Wasserkraftwerke wandeln die potenzielle oder kinetische Energie von Wasser über Turbinen in Strom um. Unterschieden werden Laufwasserkraftwerke, die den kontinuierlichen Abfluss eines Flusses nutzen, Speicherkraftwerke, die Wasser in Stauseen zurückhalten und bei Bedarf turbinieren, sowie Pumpspeicherkraftwerke, die zusätzlich Wasser in ein höher gelegenes Becken pumpen und damit als Stromspeicher dienen.

Verfügbarkeit. Wasserkraft erreicht weltweit einen durchschnittlichen Kapazitätsfaktor von 48 Prozent (IRENA, 2025). Entscheidend für Rechenzentren ist jedoch weniger dieser Durchschnitt als die Steuerbarkeit: Speicherkraftwerke können innert Minuten hoch- und heruntergefahren werden und gleichen damit Schwankungen anderer Quellen aus.

Bedeutung für die Schweiz. Die Schweiz ist ein ausgeprägtes Wasserkraftland. Von der Landeserzeugung von rund 80,5 TWh im Jahr 2024 stammten 48,3 TWh oder 60 Prozent aus Wasserkraft, davon 24,1 Prozentpunkte aus Lauf- und 35,9 Prozentpunkte aus Speicherkraftwerken (BFE, 2025b). Abbildung 7 zeigt die Zusammensetzung der Schweizer Stromproduktion.



Eigene Darstellung nach BFE (2025b), provisorische Werte. Prozentanteile für PV, Wind und Thermisch: eigene Berechnung.

Abbildung 7: Zusammensetzung der Schweizer Landeserzeugung 2024

Mit Nant de Drance im Wallis verfügt die Schweiz zudem über eines der leistungsstärksten Pumpspeicherkraftwerke Europas. Es hat eine Leistung von 900 Megawatt und erreicht pro Pumpspeicherzyklus einen Wirkungsgrad von rund 80 Prozent (Nant de Drance, 2023).

Eignung für Rechenzentren. Wasserkraft ist die einzige erneuerbare Quelle, die in der Schweiz in grossem Umfang bandlastfähig und gleichzeitig regelbar verfügbar ist. Praxisbeispiele wie das Rechenzentrum von Energie Wasser Luzern, das vollständig mit erneuerbarem Strom, vor allem aus Wasserkraft, betrieben wird (IT Reseller, 2026), belegen dies.

Kosten. Die weltweit gewichteten Stromgestehungskosten (Levelized Cost of Electricity, LCOE) neuer Wasserkraftanlagen lagen 2024 bei rund 0,057 US-Dollar pro Kilowattstunde (IRENA, 2025). Bestehende, abgeschriebene Anlagen produzieren deutlich günstiger.

Grenzen. Das Ausbaupotenzial ist in der Schweiz weitgehend ausgeschöpft, neue Grossprojekte stossen auf Widerstand aus Landschafts- und Gewässerschutz. Zudem ist die Produktion saisonal: Laufwasserkraftwerke liefern im Sommer deutlich mehr als im Winter. Mit dem

Klimawandel und dem Rückgang der Gletscher wird sich das Abflussregime langfristig verändern.

3.3 Photovoltaik

Funktionsprinzip. Solarzellen wandeln Sonnenlicht über den photoelektrischen Effekt direkt in Gleichstrom um, der über Wechselrichter ins Netz eingespeist wird.

Verfügbarkeit. Photovoltaik erreicht weltweit im Mittel einen Kapazitätsfaktor von 17 Prozent (IRENA, 2025). In der Schweiz liegt der Wert wegen geringerer Sonneneinstrahlung eher darunter. Die Produktion folgt dem Tagesgang der Sonne, fällt nachts vollständig aus und ist im Winter deutlich geringer als im Sommer.

Bedeutung für die Schweiz. Photovoltaik ist die am stärksten wachsende Quelle im Schweizer Strommix. 2024 lieferte sie bereits rund 5,9 TWh oder etwa 7 Prozent der Landeserzeugung (BFE, 2025b; eigene Berechnung des Anteils).

Eignung für Rechenzentren. Photovoltaik kann den Strombedarf eines Rechenzentrums tagsüber teilweise decken, nachts jedoch nicht. Für einen 24/7-Betrieb ist sie allein deshalb ungeeignet. Hinzu kommt der Flächenbedarf: Die Dachfläche eines Rechenzentrums reicht bei weitem nicht aus, um dessen Bedarf zu decken. Das geplante KI-Rechenzentrum von Flexbase in Laufenburg sieht eine Solarfassade von 11'000 Quadratmetern vor, ergänzt durch einen grossen Batteriespeicher (IT Reseller, 2026), was die Grössenordnung des Problems illustriert.

Kosten. Mit gewichteten Stromgestehungskosten von 0,043 US-Dollar pro Kilowattstunde gehört Photovoltaik zu den günstigsten Stromquellen überhaupt (IRENA, 2025).

Grenzen. Die Kombination aus niedrigen Kosten und geringer zeitlicher Verfügbarkeit macht Photovoltaik zu einer wertvollen Ergänzung, aber nicht zu einer alleinigen Lösung. Sie ist für Rechenzentren nur zusammen mit Speichern oder Netzbezug tragfähig.

3.4 Windenergie

Funktionsprinzip. Windenergieanlagen wandeln die Bewegungsenergie des Windes über Rotor und Generator in Strom um. Unterschieden werden Anlagen an Land (onshore) und auf See (offshore).

Verfügbarkeit. Windanlagen an Land erreichen weltweit im Mittel einen Kapazitätsfaktor von 34 Prozent, auf See von 42 Prozent (IRENA, 2025). Wind ist ebenfalls wetterabhängig, weht jedoch auch nachts und in Europa tendenziell stärker im Winter. Er ergänzt die Photovoltaik damit zeitlich gut.

Bedeutung für die Schweiz. Mit rund 0,2 TWh im Jahr 2024 spielt Windenergie in der Schweiz eine sehr geringe Rolle (BFE, 2025b). In Nordeuropa ist sie dagegen eine tragende Säule der Stromversorgung.

Eignung für Rechenzentren. Windstrom wird von grossen Betreibern vor allem über langfristige Abnahmeverträge mit Anlagen in windreichen Regionen bezogen (vgl. Abschnitt 4.1). Für

den 24/7-Betrieb gilt dasselbe wie bei der Photovoltaik: Wind ist ohne Speicher oder steuerbare Ergänzung nicht ausreichend.

Kosten. Onshore-Wind war 2024 mit 0,034 US-Dollar pro Kilowattstunde die günstigste erneuerbare Technologie, Offshore-Wind lag bei 0,079 US-Dollar (IRENA, 2025).

Grenzen. In der Schweiz verhindern lange Bewilligungsverfahren, Einsprachen und eine begrenzte Zahl geeigneter Standorte einen raschen Ausbau.

3.5 Geothermie

Funktionsprinzip. Geothermie nutzt die Wärme aus dem Erdinneren. Für die Stromerzeugung werden heisses Wasser oder Dampf aus grosser Tiefe gefördert und über Turbinen verstromt. In vulkanisch aktiven Gebieten liegen diese Wärmequellen nahe an der Oberfläche.

Verfügbarkeit. Mit einem weltweiten mittleren Kapazitätsfaktor von 88 Prozent ist Geothermie die bandlastfähigste erneuerbare Quelle (IRENA, 2025). Sie ist unabhängig von Wetter, Tages- und Jahreszeit.

Eignung für Rechenzentren. Das Erzeugungsprofil der Geothermie entspricht nahezu ideal dem Bedarfsprofil eines Rechenzentrums. Island zeigt dies exemplarisch: Der Strom stammt dort zu rund 73 Prozent aus Wasserkraft und zu 27 Prozent aus Geothermie (atNorth, 2023), weshalb sich das Land zu einem gefragten Standort für Rechenzentren entwickelt hat (vgl. Abschnitt 4.5).

Kosten. Die gewichteten Stromgestehungskosten lagen 2024 bei 0,060 US-Dollar pro Kilowattstunde (IRENA, 2025).

Grenzen. Die Nutzung ist stark standortabhängig. In der Schweiz spielt die Geothermie für die Stromerzeugung bislang keine nennenswerte Rolle; in der Landeserzeugung 2024 wird sie nicht als eigene Quelle ausgewiesen (BFE, 2025b). Tiefengeothermie ist zudem mit hohen Erkundungskosten und dem Risiko induzierter Erdbeben verbunden.

3.6 Vergleichsmatrix

Tabelle 5 fasst die Bewertung der vier Energiequellen in einer eigenen Vergleichsmatrix zusammen. Die Bewertung erfolgt auf einer Skala von «– –» (sehr ungünstig) bis «++» (sehr günstig) und stützt sich auf die in den vorangehenden Abschnitten belegten Kennwerte.

Tabelle 6: Vergleichsmatrix erneuerbarer Energiequellen für den Rechenzentrumsbetrieb (eigene Bewertung)

Kriterium	Wasserkraft	Photovoltaik	Windenergie	Geothermie
Kapazitätsfaktor (IRENA, 2025)	+ (48 %)	– – (17 %)	o (34–42 %)	++ (88 %)
Bandlastfähigkeit (24/7)	++	– –	–	++
Regelbarkeit bei Lastspitzen	++ (Speicher)	– –	– –	o
Stromgestehungskosten	o (0,057 USD)	++ (0,043 USD)	++ / o (0,034–0,079 USD)	o (0,060 USD)
Verfügbarkeit in der Schweiz	++ (60 % der Produktion)	+ (stark wachsend)	– – (0,2 TWh)	– – (kaum genutzt)
Ausbaupotenzial in der Schweiz	– (weitgehend ausgeschöpft)	++	–	o (unsicher)
Gesamteignung für Schweizer Rechenzentren	sehr gut	ergänzend	gering	langfristig

Die Matrix zeigt kein «bestes» Kriterium für alle Fälle, aber ein klares Muster: Die Quellen mit den niedrigsten Kosten, Photovoltaik und Onshore-Wind, sind am wenigsten bandlastfähig. Die bandlastfähigen Quellen, Wasserkraft und Geothermie, sind standortgebunden. Für Rechenzentren in der Schweiz ist Wasserkraft deshalb die tragende Säule, ergänzt durch Photovoltaik, deren Ausbaupotenzial am grössten ist.

3.7 Zwischenfazit

Keine einzelne erneuerbare Quelle erfüllt alle Anforderungen eines Rechenzentrums gleichzeitig. Bandlastfähige Quellen wie Wasserkraft und Geothermie passen am besten zum 24/7-Bedarf, sind aber an geeignete Standorte gebunden. Die günstigen, wetterabhängigen Quellen Photovoltaik und Wind benötigen Speicher, Netzbezug oder steuerbare Ergänzungen. Die zentrale Frage verschiebt sich damit von «Welche Quelle?» zu «Welche Kombination, an welchem Standort, mit welchem Versorgungsmodell?». Diese Frage behandelt Kapitel 4.

4 Versorgungsmodelle und Standortfaktoren

4.1 Power Purchase Agreements

Ein Power Purchase Agreement (PPA) ist ein langfristiger Stromliefervertrag zwischen einem Erzeuger, typischerweise dem Betreiber eines Wind- oder Solarparks, und einem Abnehmer. PPAs sind für Rechenzentrumsbetreiber das wichtigste Instrument, um grosse Mengen erneuerbaren Stroms zu einem planbaren Preis zu beschaffen. Grundsätzlich werden zwei Formen unterschieden (Kyos, o. J.):

- **Physisches PPA (Sleeved PPA).** Erzeuger und Abnehmer befinden sich im selben Netzgebiet. Ein Energieversorger liefert den Strom physisch, übernimmt Prognose und Ausgleich der schwankenden Produktion und verrechnet dafür eine Gebühr.
- **Virtuelles PPA (finanzielles PPA).** Erzeuger und Abnehmer können sich in unterschiedlichen Marktgebieten befinden. Der Abnehmer zahlt dem Erzeuger einen fixen Preis pro Megawattstunde und erhält im Gegenzug die Differenz zum variablen Marktpreis sowie die Herkunftsnachweise. Physisch bezieht er seinen Strom weiterhin aus dem lokalen Netz.

Tabelle 7: Vergleich von physischen und virtuellen PPAs (eigene Darstellung nach Kyos, o. J.)

Merkmal	Physisches PPA	Virtuelles PPA
Stromfluss	physische Lieferung über einen Versorger	keine physische Lieferung, finanzieller Ausgleich
Netzgebiet	Erzeuger und Abnehmer im selben Netz	beliebige Marktgebiete möglich
Preisrisiko für Abnehmer	gering, Versorger glättet Schwankungen	Differenz zwischen Fixpreis und Marktpreis
Zusätzliche Kosten	Gebühr für Ausgleich und Lieferung	gering
Glaubwürdigkeit des Grünstroms	hoch, Strom aus demselben Netz	abhängig von zeitlicher und räumlicher Nähe

Für die Nachhaltigkeit entscheidend ist das Kriterium der **Zusätzlichkeit**. Ein PPA mit einer neu errichteten Anlage trägt zusätzliche erneuerbare Kapazität ins System. Ein Vertrag mit einer bestehenden, längst amortisierten Anlage verschiebt dagegen lediglich vorhandenen Grünstrom von einem Abnehmer zum anderen. Das deutsche EnEfG berücksichtigt diesen Unterschied, indem es ab 2027 eine Deckung durch erneuerbaren Strom verlangt (EnEfG, 2023); die Frage, ob bilanzielle Nachweise ausreichen, wird in Abschnitt 4.6 vertieft.

4.2 Eigenerzeugung am Standort

Eine naheliegende Alternative ist die Erzeugung von Strom direkt am Rechenzentrum, meist mit Photovoltaik auf Dach und Fassade. Der Vorteil liegt in der unmittelbaren, nachweisbaren Nutzung des Stroms ohne Netzverluste.

Die Grenze ergibt sich aus dem Verhältnis von Fläche zu Leistungsdichte. Ein Rechenzentrum konzentriert auf kleiner Fläche eine sehr hohe elektrische Leistung; die verfügbare Gebäudefläche reicht deshalb nur für einen kleinen Teil des Bedarfs. Selbst das geplante KI-

Rechenzentrum von Flexbase in Laufenburg, das eine Solarfassade von 11'000 Quadratmetern vorsieht, plant zusätzlich mit Netzbezug und einem grossen Redox-Flow-Batteriespeicher (IT Reseller, 2026). Eigenerzeugung ist damit ein sinnvoller Baustein, ersetzt aber weder Netzbezug noch PPAs.

4.3 Energiespeicher

Wie in Abschnitt 2.3.4 dargelegt, verursachen KI-Lasten grosse und schnelle Leistungsschwankungen. Gleichzeitig produzieren Photovoltaik und Wind nicht zu jedem Zeitpunkt. Energiespeicher übernehmen deshalb eine doppelte Funktion: Sie glätten Lastspitzen und überbrücken Zeiten ohne erneuerbare Produktion.

4.3.1 Batteriespeicher

Batteriespeicher sind in Rechenzentren bereits als Teil der unterbrechungsfreien Stromversorgung vorhanden. Sie reagieren innerhalb von Millisekunden und eignen sich deshalb besonders, um kurzfristige Lastspitzen von KI-Anwendungen abzufangen. Für die Überbrückung längerer Zeiträume, etwa einer Nacht ohne Solarstrom, sind grosse stationäre Speicher nötig. Redox-Flow-Batterien, wie sie für das Projekt in Laufenburg vorgesehen sind (IT Reseller, 2026), bieten hier den Vorteil, dass Leistung und Speicherkapazität unabhängig voneinander skaliert werden können. Als Alternative zu Batterien setzt das Rechenzentrum Ostschweiz in Gais für die Notstromversorgung auf Schwungradspeicher (IT Reseller, 2026).

4.3.2 Pumpspeicher

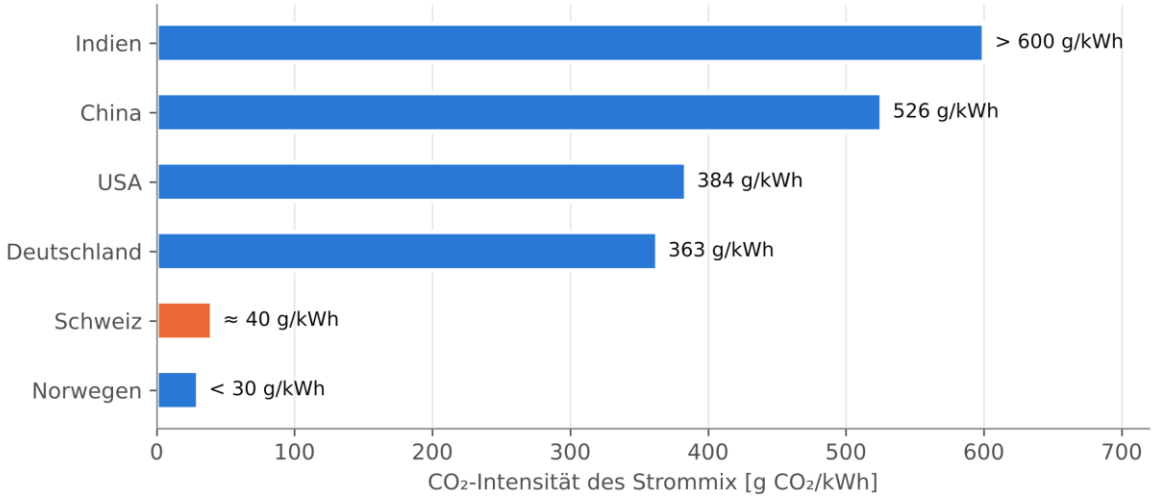
Pumpspeicherkraftwerke sind die bewährteste Form grosser Stromspeicher. Bei Stromüberschuss wird Wasser in ein oberes Becken gepumpt, bei Bedarf wird es turbiniert. Das Kraftwerk Nant de Drance im Wallis verfügt über eine Leistung von 900 Megawatt und erreicht pro Zyklus einen Wirkungsgrad von rund 80 Prozent; in seinem ersten Betriebsjahr wurden rund 1170 GWh gepumpt und 950 GWh erzeugt (Nant de Drance, 2023). Für Rechenzentren in der Schweiz bedeutet dies, dass das Netz über eine grosse, erneuerbare Ausgleichsreserve verfügt, auf die sie indirekt zugreifen.

4.3.3 Grüner Wasserstoff

Wasserstoff, der mit erneuerbarem Strom per Elektrolyse erzeugt wird, kann Energie über lange Zeiträume speichern und über Brennstoffzellen wieder verstromen. Für Rechenzentren ist er vor allem als Ersatz für Diesel-Notstromaggregate interessant. Microsoft testete 2022 ein Brennstoffzellensystem mit 3 Megawatt Leistung, was der Grösse eines herkömmlichen Diesel-Notstromaggregats entspricht. Das System bestand während mehrerer Wochen dieselben Prüfungen wie ein Dieselgenerator, darunter simulierte Netzausfälle. Ziel ist es, im Rahmen des Klimaziels des Unternehmens bis 2030 vollständig auf Diesel zu verzichten (The Register, 2022). Die Herausforderungen liegen in den hohen Kosten, dem geringen Gesamtwirkungsgrad der Umwandlungskette und der noch begrenzten Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff.

4.4 CO_2-Intensität von Strommixen im Ländervergleich

Die CO_2-Intensität des Strommixes gibt an, wie viele Gramm CO_2 bei der Erzeugung einer Kilowattstunde Strom im Durchschnitt freigesetzt werden. Sie ist die Grösse, die in der Formel des CUE als Emissionsfaktor erscheint (vgl. Abschnitt 2.5.5), und damit der entscheidende Hebel für die Klimawirkung eines Rechenzentrums. Abbildung 8 zeigt die Werte ausgewählter Länder.



Eigene Darstellung nach Allianz Trade (2026) und Umweltbundesamt (2025, Wert Deutschland 2024).

Abbildung 8: CO_2-Intensität des Strommixes ausgewählter Länder

Die Unterschiede sind beträchtlich. In Indien, Indonesien und Malaysia liegt die Intensität bei über 600 Gramm pro Kilowattstunde, in China bei 526 Gramm und in den USA bei 384 Gramm. Die Schweiz kommt auf rund 40 Gramm, Norwegen und Schweden auf unter 30 Gramm (Allianz Trade, 2026). Deutschland lag 2024 bei 363 Gramm pro Kilowattstunde (Umweltbundesamt, 2025).

Daraus folgt: Identische Rechenleistung mit identischer Effizienz verursacht in Indien rund fünfzehnmal mehr Emissionen als in der Schweiz (eigene Berechnung: 600 ÷ 40). Kein Effizienzgewinn bei Kühlung oder Hardware kann einen solchen Unterschied ausgleichen. Diese Feststellung ist der Kern der Arbeit und wird im Rechenbeispiel in Abschnitt 6.6 quantifiziert.

Die Bedeutung dieser Unterschiede wächst mit dem Gesamtverbrauch. Allianz Trade beziffert die weltweiten Emissionen von Rechenzentren für 2025 auf 286 Millionen Tonnen CO_2, rund 57 Prozent mehr als frühere Schätzungen. Bis 2030 könnten es ohne Gegenmassnahmen bis zu 643 Millionen Tonnen sein, in einem ambitionierten Szenario rund 329 Millionen Tonnen (Allianz Trade, 2026). Der Unterschied zwischen beiden Szenarien entspricht im Wesentlichen der Frage, an welchen Standorten und mit welchem Strom der Ausbau erfolgt.

4.5 Standortwahl im Vergleich

Die Standortwahl bestimmt drei Faktoren gleichzeitig: den Strommix, die Möglichkeiten zur natürlichen Kühlung und die Anbindung an Nutzer und Netze. Tabelle 7 vergleicht drei europäische Standorte mit sehr sauberem Strommix.

Tabelle 8: Standortvergleich Island, Norwegen und Schweiz (eigene Darstellung nach atNorth, 2023; Allianz Trade, 2026; BFE, 2025b)

Kriterium	Island	Norwegen	Schweiz
Strommix	100 % erneuerbar (73 % Wasser, 27 % Geothermie)	unter 30 g CO_2/kWh	rund 40 g CO_2/kWh, 60 % Wasserkraft
Klima für Free Cooling	sehr gut, knapp über 0 bis ca. 12 °C	sehr gut	gut, insbesondere in höheren Lagen
Typischer PUE	1,05 bis 1,2	–	1,09 bis 1,34 (Beispiele, vgl. Abschnitt 5.7)
Nähe zu Nutzern, Latenz	gering, Seekabel nötig	mittel	hoch, zentrale Lage in Europa
Weitere Standortfaktoren	günstiger Strom, begrenzte Netzkapazität	grosse Wasserkraftreserven	politische Stabilität, Datenschutz, hohe Kosten

Island verfügt über den saubersten Strommix und ein ideales Klima für natürliche Kühlung; die Branche erreicht dort PUE-Werte von 1,05 bis 1,2 (atNorth, 2023). Nachteilig sind die Distanz zu den Nutzern und die begrenzte Grösse des Stromnetzes. Die Schweiz kann bei Strommix und Klima nicht ganz mithalten, bietet aber die Nähe zu den Kunden, eine hohe politische Stabilität und strenge Datenschutzstandards. Für latenzkritische Anwendungen und Daten, die im Inland verarbeitet werden müssen, ist sie deshalb ein attraktiver Standort mit dennoch sehr niedriger CO_2-Intensität.

Ein grundlegender Trend ist dabei zu beachten: KI-Training ist nicht latenzkritisch und kann deshalb an entlegenen Standorten mit günstigem, sauberem Strom stattfinden, während Inferenz nahe bei den Nutzern erfolgen muss (Iron Mountain, 2026). Für die Schweiz eröffnet dies vor allem Chancen im Bereich der Inferenz und der datenschutzsensiblen Anwendungen.

4.6 Greenwashing durch Zertifikatehandel

Viele Unternehmen geben an, ihre Rechenzentren zu 100 Prozent mit erneuerbarer Energie zu betreiben. Diese Angabe ist in der Regel **bilanziell** zu verstehen: Über das Jahr wird so viel erneuerbarer Strom eingekauft oder mit Herkunftsnachweisen belegt, wie verbraucht wird. Zu welcher Stunde der Strom tatsächlich aus erneuerbaren Quellen stammte, bleibt offen.

Das Problem zeigt sich am Beispiel von Google. Das Unternehmen deckte seinen Jahresverbrauch bereits seit mehreren Jahren bilanziell zu 100 Prozent mit erneuerbarem Strom. Betrachtet man jedoch jede einzelne Stunde und nur Strom aus demselben Netz, waren es lediglich 61 Prozent. Google hat sich deshalb das deutlich anspruchsvollere Ziel gesetzt, bis 2030 rund um die Uhr, also in jeder Stunde, mit CO_2-freiem Strom zu arbeiten (Data Center Frontier, 2020).

Der Unterschied zwischen bilanzieller und stündlicher Betrachtung ist für die Glaubwürdigkeit entscheidend. Ein Rechenzentrum, das nachts Kohlestrom bezieht und tagsüber Solarzertifikate einkauft, ist bilanziell grün, verursacht aber reale Emissionen. Auch das deutsche EnEfG verlangt die Deckung durch erneuerbaren Strom ausdrücklich nur bilanziell (EnEfG, 2023). Für eine glaubwürdige Nachhaltigkeitsstrategie sind deshalb drei Prüffragen hilfreich:

- Stammt der Strom aus **neuen** Anlagen (Zusätzlichkeit)?
- Wird er im **selben Netz** erzeugt, in dem er verbraucht wird (räumliche Nähe)?
- Wird er zur **selben Zeit** erzeugt, zu der er verbraucht wird (zeitliche Übereinstimmung)?

In der Schweiz entschärft der ohnehin sehr saubere Strommix diese Problematik deutlich: Selbst ohne zusätzliche Zertifikate liegt die CO_2-Intensität des bezogenen Stroms auf einem Niveau, das andernorts nur mit grossem Aufwand erreicht wird.

4.7 Zwischenfazit

Das wirkungsvollste Instrument für ein klimaverträgliches Rechenzentrum ist die Kombination aus einem sauberen Netz am Standort und langfristigen Abnahmeverträgen mit neuen erneuerbaren Anlagen. Speicher werden durch die Lastschwankungen von KI zunehmend unverzichtbar, wobei Batterien die kurzfristigen und Pumpspeicher die längerfristigen Schwankungen ausgleichen. Die Unterschiede der CO_2-Intensität zwischen Ländern übersteigen jede mögliche Effizienzsteigerung um ein Vielfaches. Aussagen zu «100 Prozent erneuerbarem Strom» sind nur aussagekräftig, wenn Zusätzlichkeit, räumliche Nähe und zeitliche Übereinstimmung mitbetrachtet werden.

5 Kühlung und Effizienz

5.1 Bedeutung der Kühlung

Physikalisch betrachtet wird nahezu die gesamte elektrische Energie, die ein Server aufnimmt, in Wärme umgewandelt. Ein Rechenzentrum ist damit im Grunde eine sehr leistungsfähige elektrische Heizung, deren Wärme kontinuierlich abgeführt werden muss, damit die Hardware im zulässigen Temperaturbereich bleibt.

Der Energieaufwand dafür variiert stark. In effizienten Hyperscale-Rechenzentren entfallen rund 7 Prozent des Gesamtverbrauchs auf Kühlung und Klimatisierung, in weniger effizienten Enterprise-Rechenzentren über 30 Prozent (IEA, 2025). Da die Kühlung den grössten Teil des Infrastruktur-Overheads ausmacht, bestimmt sie massgeblich den PUE. Abbildung 9 zeigt, welche PUE-Werte mit unterschiedlichen Kühlkonzepten erreicht werden.

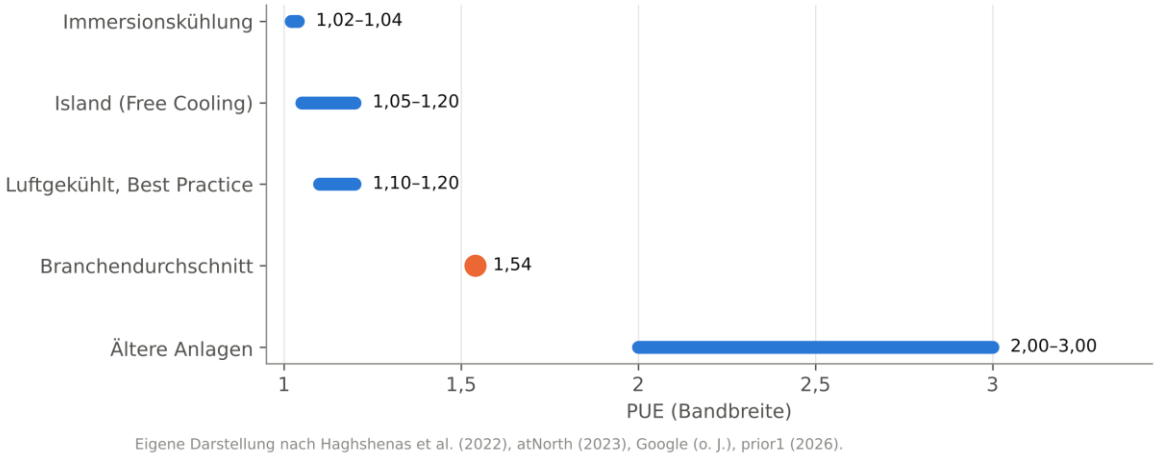


Abbildung 9: Typische PUE-Bandbreiten nach Kühlkonzept und Anlagentyp

Die folgenden Abschnitte stellen die wichtigsten Kühlkonzepte vor, gefolgt von der Nutzung der Abwärme, Praxisbeispielen aus der Schweiz und dem oft übersehenen Wasserverbrauch.

5.2 Luftkühlung

Die Luftkühlung ist das klassische Verfahren. Umluftkühlgeräte kühlen die Raumluft, die über einen Doppelboden zu den Server-Racks geführt, von den Servern angesaugt und erwärmt wieder abgegeben wird. Ein wesentlicher Effizienzgewinn lässt sich durch die **Einhausung von Kalt- und Warmgängen** erzielen: Werden kalte Zuluft und warme Abluft räumlich getrennt, vermischen sie sich nicht, und die Kühlanlagen arbeiten deutlich effizienter. Gut umgesetzte luftgekühlte Anlagen erreichen PUE-Werte von rund 1,1 bis 1,2 (Haghshenas et al., 2022).

Mit KI stösst die Luftkühlung jedoch an physikalische Grenzen. Moderne KI-Server-Racks benötigen 100 bis 140 Kilowatt Leistung, was Flüssigkühlung zwingend erforderlich macht; herkömmliche luftgekühlte Anlagen können solche Leistungsdichten nicht mehr abführen (GPUnex, 2026). Zum Vergleich: Klassische Racks liegen häufig im Bereich von 5 bis 15 Kilowatt.

5.3 Flüssigkühlung

Bei der **direkten Flüssigkühlung (Direct-to-Chip)** wird ein Kühlmittel, meist Wasser oder ein Wasser-Glykol-Gemisch, über Kühlkörper direkt an die heissesten Komponenten wie Prozessoren und Grafikprozessoren geführt. Flüssigkeiten transportieren Wärme um ein Vielfaches besser als Luft. Dadurch lassen sich höhere Leistungsdichten bewältigen, und das Kühlmittel kann mit höherer Temperatur abgeführt werden. Das erleichtert die Nutzung der Abwärme, weil warmes Wasser direkt in Heizsysteme eingespeist werden kann. Das geplante KI-Rechenzentrum von Flexbase in Laufenburg setzt auf diese On-Chip-Wasserkühlung (IT Reseller, 2026).

5.4 Immersionskühlung

Bei der Immersionskühlung werden die Server vollständig in eine nicht leitende Flüssigkeit getaucht. Bei der einphasigen Variante zirkuliert die Flüssigkeit und gibt die Wärme über einen Wärmetauscher ab; bei der zweiphasigen Variante verdampft sie an den heissen Komponenten und kondensiert an einem Kühler.

Die Effizienzgewinne sind beträchtlich. Eine Untersuchung von Haghshenas et al. (2022) berichtet von einer Reduktion des Energieverbrauchs um rund 50 Prozent gegenüber Luftkühlung. Immersionsgekühlte Anlagen erreichen PUE-Werte von 1,02 bis 1,04, während luftgekühlte Anlagen in der ausgewerteten Literatur zwischen 1,1 und 2,9 liegen. Als Praxisbeispiel nennt die Studie Alibaba, das mit einphasiger Immersionskühlung den Gesamtstromverbrauch um 36 Prozent senkte und einen PUE von 1,07 erreichte (Haghshenas et al., 2022).

Den Vorteilen stehen Herausforderungen gegenüber: höhere Investitionskosten, Gewicht und Platzbedarf der Becken, die Wartung untergetauchter Hardware und die Frage der Umweltverträglichkeit mancher Kühlflüssigkeiten. Die Immersionskühlung wird deshalb heute vor allem bei Anlagen mit sehr hoher Leistungsdichte eingesetzt.

5.5 Free Cooling und Seewassernutzung

Unter **Free Cooling** versteht man die Kühlung mit natürlich kühlen Medien wie Aussenluft oder Wasser, ohne dass energieintensive Kältemaschinen laufen müssen. Je kühler und konstanter das Klima am Standort, desto häufiger ist dies möglich. In Island etwa erlaubt das ganzjährig milde Klima mit Temperaturen von knapp über null bis etwa 12 Grad eine Kühlung weitgehend ohne Klimaanlagen (atNorth, 2023).

In der Schweiz zeigen mehrere Beispiele, wie sich lokale Gegebenheiten nutzen lassen:

- **Energie Wasser Luzern** betreibt ein Rechenzentrum in den Tunnelröhren eines ehemaligen Zivilschutzbunkers und kühlt es mit Wasser aus dem Vierwaldstättersee, wofür kaum Strom benötigt wird (IT Reseller, 2026).
- **Das Rechenzentrum Ostschweiz in Gais** liegt auf rund 920 Metern über Meer und kombiniert Aussenluft mit adiabatischer Verdunstungskühlung, für die gesammeltes Regenwasser verwendet wird (IT Reseller, 2026).
- **Infomaniak in Genf** kühlt sein Rechenzentrum D4 mit einem geschlossenen Luftkreislauf ohne Wasser und ohne eigene Klimaanlage (IT Reseller, 2026).

5.6 Abwärmenutzung

Da praktisch die gesamte elektrische Energie als Wärme anfällt, ist die Abwärme von Rechenzentren eine bedeutende, bislang meist ungenutzte Energiequelle. Ihre Nutzung verbessert nicht den PUE, wohl aber die Gesamtbilanz; sie wird mit dem Energy Reuse Factor (ERF) nach DIN EN 50600-4-6 erfasst (vgl. Abschnitt 2.5.5).

Die Herausforderung liegt im Temperaturniveau. Luftgekühlte Anlagen liefern Abwärme von oft nur 25 bis 35 Grad, die für Heizzwecke mit Wärmepumpen angehoben werden muss. Flüssigkühlung liefert höhere Temperaturen und vereinfacht die Nutzung. Zudem braucht es Abnehmer in der Nähe, etwa ein Fernwärmenetz.

Deutschland verpflichtet neue Rechenzentren inzwischen, einen steigenden Anteil ihrer Energie wiederzuverwenden: 10 Prozent bei Inbetriebnahme ab Juli 2026, 15 Prozent ab Juli 2027 und 20 Prozent ab Juli 2028 (EnEfG, 2023). In der Schweiz zeigen Praxisbeispiele, wie vielfältig die Nutzung sein kann: Die Abwärme fliesst in Luzern ins städtische Wärmenetz, in Genf wird sie zum Selbstkostenpreis an ein angrenzendes Wohnquartier abgegeben, und in Gais erwärmt sie in einer benachbarten Käserei jährlich rund 18 Millionen Liter Milch (IT Reseller, 2026).

5.7 Praxisbeispiele aus der Schweiz

Tabelle 8 fasst fünf Schweizer Rechenzentren zusammen, die als Beispiele für einen nachhaltigen Betrieb gelten.

Tabelle 9: Nachhaltige Rechenzentren in der Schweiz (eigene Darstellung nach IT Reseller, 2026)

Rechenzentrum	Kühlung	Abwärmenutzung	Strom	PUE
Stollen Luzern (EWL)	Seewasser Vierwaldstättersee	städtisches Wärmenetz	100 % erneuerbar, v. a. Wasserkraft	k. A.
Datarock, Nottwil (Hosttech)	unterirdisch in ehemaligem Militärbunker	Nachbargebäude und eigene Büros	100 % erneuerbar	1,34
D4, Genf (Infomaniak)	geschlossener Luftkreislauf ohne Wasser	Wohnquartier zum Selbstkostenpreis	100 % erneuerbar	1,09
RZO Gais	Aussenluft und adiabatisch mit Regenwasser	Käserei, rund 18 Mio. Liter Milch pro Jahr	100 % erneuerbar	1,15
Flexbase, Laufenburg (im Bau)	On-Chip-Wasserkühlung	Fernwärmenetz	100 % erneuerbar, Solarfassade, Speicher	unter 1,2 (geplant)

Die Beispiele zeigen drei Muster. Erstens nutzen alle Betreiber lokale Gegebenheiten wie Seewasser, Höhenlage oder unterirdische Räume. Zweitens ist die Abwärmenutzung in allen Fällen fester Bestandteil des Konzepts. Drittens erreichen mehrere Anlagen PUE-Werte deutlich unter dem globalen Durchschnitt von 1,54; das Rechenzentrum D4 liegt mit 1,09 sogar unter dem deutschen Grenzwert von 1,2 für Neubauten.

5.8 KI-gestützte Optimierung

Künstliche Intelligenz ist nicht nur Treiber des Energiebedarfs, sondern kann auch zu dessen Senkung beitragen. Ein frühes und vielzitiertes Beispiel stammt von Google: Mit einem von DeepMind entwickelten System aus neuronalen Netzen, das mit historischen Sensordaten zu Temperaturen, Leistung und Pumpendrehzahlen trainiert wurde, liess sich der Energiebedarf der Kühlung um bis zu 40 Prozent senken. Bezogen auf den gesamten Infrastruktur-Overhead entsprach dies einer Reduktion von rund 15 Prozent (DeepMind, 2016).

Das Prinzip ist auch für kleinere Betreiber relevant: Die Grundlage jeder Optimierung ist eine lückenlose Erfassung von Leistung und Temperatur, also genau jener Messgrössen, die der Demonstrator in Kapitel 6 erfasst.

5.9 Wasserverbrauch als unterschätzter Faktor

Neben dem Strom- rückt zunehmend der Wasserverbrauch von Rechenzentren in den Blick. Verdunstungskühlung verbessert den PUE, verbraucht aber erhebliche Mengen Wasser. Allianz Trade schätzt den weltweiten Wasserbedarf von Rechenzentren für 2025 auf rund 814 Milliarden Liter, bis 2030 könnten es bis zu 1,8 Billionen Liter sein. Für die Schweiz werden rund 0,7 Milliarden Liter angegeben (Allianz Trade, 2026).

In der Schweiz besteht dabei eine erhebliche Datenlücke. Bund und Öffentlichkeit verfügen kaum über konkrete Verbrauchszahlen einzelner Rechenzentren, und der indirekte Wasserverbrauch, etwa über die Stromerzeugung, wird nur selten erfasst (AlgorithmWatch CH, 2026). Für eine ganzheitliche Bewertung sollte deshalb neben dem PUE stets auch die Water Usage Effectiveness (WUE) betrachtet werden. Ein Kühlkonzept wie jenes von Infomaniak, das ohne Wasser auskommt und dennoch einen PUE von 1,09 erreicht, zeigt, dass sich beide Ziele vereinbaren lassen.

5.10 Zwischenfazit

Die Kühlung ist nach der IT selbst der grösste Energieverbraucher und damit der wichtigste Hebel für einen niedrigen PUE. Luftkühlung stösst bei KI-Leistungsdichten an Grenzen, Flüssig- und Immersionskühlung erreichen PUE-Werte nahe 1,0. Am wirkungsvollsten ist die Kombination aus natürlicher Kühlung mit lokalen Ressourcen und konsequenter Abwärmenutzung, wie mehrere Schweizer Beispiele zeigen. Der Wasserverbrauch muss als eigene Grösse mitbetrachtet werden, da Effizienz beim Strom nicht auf Kosten des Wassers erkauft werden sollte.

6 Praktischer Teil: Mini-Rechenzentrum

6.1 Zielsetzung des Demonstrators

Die vorangehenden Kapitel haben gezeigt, dass die Klimawirkung eines Rechenzentrums aus zwei Faktoren entsteht: der Effizienz der Infrastruktur, gemessen mit dem PUE, und der CO_2-Intensität des Stroms, die zusammen mit dem PUE den CUE ergibt. Der praktische Teil soll diese Zusammenhänge greifbar machen.

Dazu wird ein Mini-Rechenzentrum konzipiert und implementiert, das die wesentlichen Bausteine eines echten Rechenzentrums im Kleinmassstab abbildet: Server, die Rechenlast erzeugen, eine aktive Kühlung, eine getrennte Erfassung von IT- und Kühlleistung sowie eine Software, die daraus PUE und CUE nach DIN EN 50600 berechnet und darstellt.

Der Demonstrator verfolgt drei Ziele:

- **Kennzahlen nachvollziehbar machen.** Die Berechnung von PUE und CUE soll von der Messgrösse bis zur Kennzahl transparent sein.
- **Den Einfluss der Last zeigen.** Über definierte Lastszenarien soll sichtbar werden, wie sich der PUE mit der Auslastung verändert.
- **Den Einfluss des Standorts zeigen.** Durch die Hinterlegung der CO_2-Faktoren verschiedener Länder soll die Kernthese dieser Arbeit unmittelbar ablesbar werden.

Bewusst nicht Ziel ist es, ein reales Rechenzentrum massstabsgetreu nachzubilden. Die Grenzen des Modells werden in Abschnitt 6.7 offengelegt.

6.2 Anforderungen

Aus den Zielen wurden die Anforderungen in Tabelle 9 abgeleitet und nach Priorität gegliedert.

Tabelle 10: Anforderungen an den Demonstrator

Nr.	Anforderung	Priorität
A1	Die elektrische Leistung der IT und der Kühlung wird getrennt erfasst.	Muss
A2	Zuluft- und Ablufttemperatur des «Racks» werden erfasst.	Muss
A3	PUE und CUE werden automatisch aus den Messwerten berechnet.	Muss
A4	CO_2-Faktoren für mindestens fünf Länder sind hinterlegt.	Muss
A5	Die Messwerte werden als Zeitreihe gespeichert.	Soll
A6	Die Kennzahlen werden in einem Dashboard visualisiert.	Soll
A7	Definierte Lastszenarien (Leerlauf, Teillast, Volllast) sind reproduzierbar.	Soll
A8	Das System startet nach einem Stromausfall selbstständig.	Soll
A9	Gesamtkosten unter 300 Franken.	Soll
A10	Ausschliesslich Open-Source-Software, kein Cloud-Zwang.	Kann

6.3 Variantenvergleich und Komponentenauswahl

6.3.1 Varianten der Leistungsmessung

Die zentrale technische Entscheidung betrifft die Messung der elektrischen Leistung, da sie die Grundlage der PUE-Berechnung bildet. Drei Varianten wurden verglichen (Tabelle 10).

Tabelle 11: Varianten der Leistungsmessung

Kriterium	V1: Strommesschip am Pi (z. B. INA219)	V2: Messsteckdose mit API (Shelly)	V3: Schnittstelle von PDU oder USV
Messort	Gleichstromseite (5 V)	Netzseite (230 V)	Netzseite (230 V)
Erfasst Netzteil-verluste	nein	ja	ja
Eingriff in die Elektrik	Löten und Verkabeln nötig	keiner, nur einstecken	keiner
Programmierauf-wand	hoch	gering, HTTP-Schnittstelle	mittel, SNMP
Kosten	sehr gering	gering, ca. 25 CHF pro Stück	hoch, Gerät nötig
Nähe zur Praxis	gering	mittel	hoch

Entscheid: Variante 2. Die Messsteckdose erfasst die Leistung dort, wo sie auch in einem realen Rechenzentrum gemessen wird, nämlich auf der Netzseite, und schliesst damit die Verluste der Netzteile ein. Sie erfordert keinen Eingriff in die elektrische Installation, was die Sicherheit erhöht, und ihre lokale HTTP-Schnittstelle lässt sich ohne eigene Treiberprogrammierung abfragen. Variante 3 wäre praxisnäher, aber für ein Modell im Kleinmassstab unverhältnismässig teuer.

Um IT- und Kühlleistung getrennt zu erfassen (Anforderung A1), werden **zwei** Messsteckdosen eingesetzt: Shelly A versorgt und misst beide Server, Shelly B versorgt und misst den Lüfter. Die Gesamtleistung ergibt sich als Summe beider Werte.

6.3.2 Hardware

Als «Server» dienen zwei Einplatinencomputer Raspberry Pi 5. Sie sind kostengünstig, verbrauchen wenig Strom, laufen mit einem vollwertigen Linux-Betriebssystem und verfügen über die I2C-Schnittstelle, die für die Temperatursensoren benötigt wird. Einer der beiden Rechner übernimmt zusätzlich das Monitoring.

Für die Temperaturmessung werden zwei Sensoren vom Typ Bosch BME280 eingesetzt. Sie messen Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck und werden über den I2C-Bus angeschlossen. Da beide Sensoren am selben Bus betrieben werden, wird einer auf die alternative Adresse 0x77 umgestellt (Bosch Sensortec, o. J.). Ein Lüfter mit 5 Volt simuliert die Kühlanlage. Er ist wesentlich für den Demonstrator: Ohne aktive Kühlung wäre die Gesamtleistung identisch mit der IT-Leistung, und der PUE läge stets bei exakt 1,0. Tabelle 11 zeigt die vollständige Stückliste.

Tabelle 12: Stückliste und Kosten des Demonstrators (Richtpreise Schweizer Handel, Stand Oktober 2026)

Komponente	An-zahl	Zweck	Preis ca. (CHF)
Raspberry Pi 5, 4 GB, mit Netzteil 27 W	2	Server 1 (inkl. Monitoring) und Server 2	180
microSD-Karte 64 GB	2	Betriebssystem	30
Shelly Plug S Gen3	2	Leistungsmessung IT und Kühlung	50
Adapter T12 auf Schuko	2	Anschluss an Schweizer Steckdose	15
Sensor BME280	2	Zuluft- und Ablufttemperatur	20
Lüfter 5 V mit USB-Netzteil	1	simulierte Kühlung	15
Jumper-Kabel, Kleinmaterial, Regal	1	Aufbau «Rack»	25
Total			**rund 335**

Die Kosten überschreiten das Soll-Kriterium A9 von 300 Franken leicht. Ausschlaggebend ist der zweite Raspberry Pi; mit einem günstigeren Modell als zweitem Server, etwa einem Raspberry Pi 4, liesse sich das Kriterium einhalten.

6.3.3 Software

Für die Software fiel die Wahl auf einen in der Praxis verbreiteten Open-Source-Stack:

- **Node-RED** für die Datenerfassung und Berechnung. Die Abläufe werden grafisch als «Flows» aus Bausteinen zusammengesetzt, was die Logik übersichtlich und ohne umfangreiche Programmierung nachvollziehbar macht (Node-RED, o. J.).
- **InfluxDB** als Zeitreihendatenbank, die für Messwerte mit Zeitstempel optimiert ist. Eine klassische relationale Datenbank wie SQLite wäre möglich, aber für zeitbasierte Auswertungen weniger geeignet.
- **Grafana** für die Visualisierung im Browser. Es bindet InfluxDB direkt an und ermöglicht Dashboards ohne eigene Programmierung.
- **Python** für das Auslesen der Temperatursensoren sowie für das Rechenbeispiel zum Standortvergleich.

6.4 Systemarchitektur und Messkonzept

Abbildung 10 zeigt die Systemarchitektur des Demonstrators.

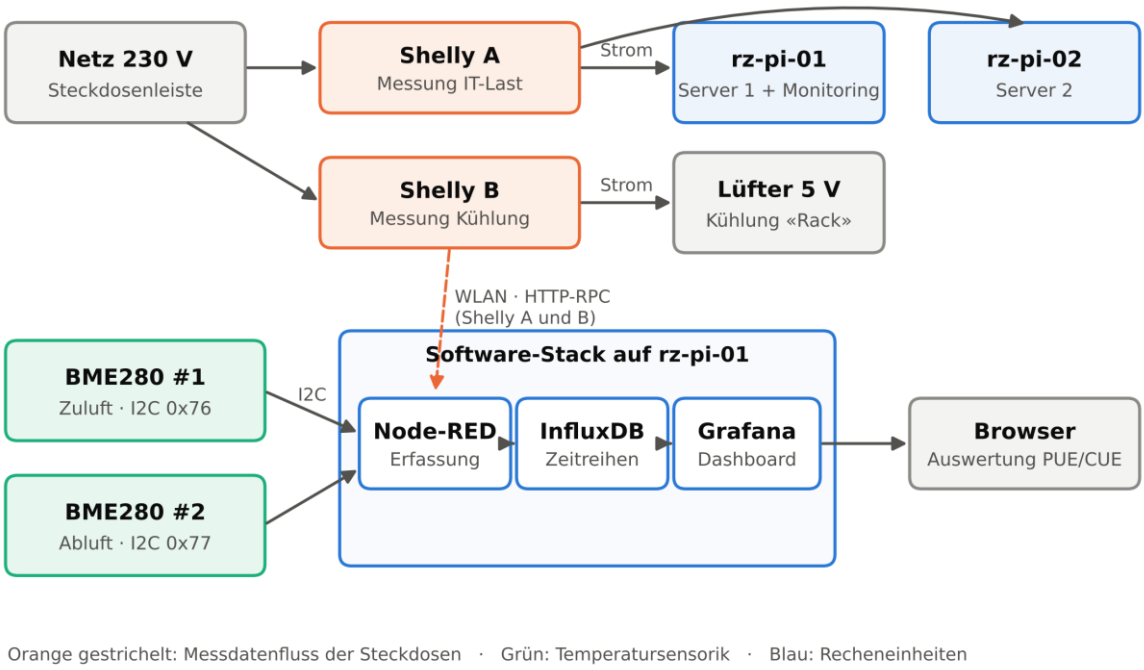


Abbildung 10: Systemarchitektur des Mini-Rechenzentrums

Das Messkonzept bildet die Struktur eines echten Rechenzentrums nach. Die Stromversorgung teilt sich auf zwei Messsteckdosen auf: Shelly A misst die IT-Last beider Server, Shelly B die Kühlleistung des Lüfters. Daraus ergeben sich die drei Grössen der PUE-Berechnung:

P_Gesamt = P_IT (Shelly A) + P_Kühlung (Shelly B) PUE = P_Gesamt ÷ P_IT

Die beiden Temperatursensoren sind so angeordnet, dass Sensor 1 die Luft vor dem Rack (Zuluft) und Sensor 2 die Luft hinter dem Rack (Abluft) misst. Die Temperaturdifferenz zeigt, wie viel Wärme die Server an die Luft abgeben. Steigt sie bei gleicher Lüfterleistung, ist dies ein Hinweis auf steigende Last oder ungenügende Kühlung.

Alle Komponenten sind über WLAN in einem eigenen Netzsegment verbunden. Feste IP-Adressen stellen sicher, dass die Abfragen auch nach einem Neustart funktionieren: rz-pi-01 unter 192.168.10.11, rz-pi-02 unter 192.168.10.12, Shelly A unter 192.168.10.21 und Shelly B unter 192.168.10.22.

6.5 Implementierung

Die folgenden Abschnitte dokumentieren die Implementierung Schritt für Schritt. Zu jedem Schritt ist der verwendete Quelltext vollständig abgebildet und erläutert. Der Node-RED-Flow ist zusätzlich als importierbare Exportdatei in Anhang B wiedergegeben.

6.5.1 Schritt 1: Grundinstallation

Auf rz-pi-01 wird das Betriebssystem Raspberry Pi OS Lite in der 64-Bit-Version installiert. Lite bedeutet, dass keine grafische Oberfläche installiert wird; das spart Ressourcen und Strom, da der Rechner ausschliesslich über das Netzwerk bedient wird. Anschliessend wird der Monitoring-Stack mit dem Skript in Abbildung 11 eingerichtet.

01_installation.sh

```
#!/bin/bash
# Installation des Monitoring-Stacks auf dem Raspberry Pi 5 (Knoten "rz-pi-01")
# Betriebssystem: Raspberry Pi OS Lite (64-bit, Bookworm)

# 1) System aktualisieren
sudo apt update && sudo apt full-upgrade -y

# 2) I2C-Schnittstelle fuer die BME280-Sensoren aktivieren
sudo raspi-config nonint do_i2c 0
sudo apt install -y i2c-tools python3-pip python3-venv stress-ng

# 3) Node-RED installieren (offizielles Installationsskript)
bash <(curl -sL https://github.com/node-red/linux-installers/releases/latest/download/update-nodejs-and-nodered-deb)
sudo systemctl enable --now nodered.service

# 4) InfluxDB 2 als Zeitreihendatenbank
curl -sL https://repos.influxdata.com/influxdata-archive_compat.key \
  | sudo gpg --dearmor -o /usr/share/keyrings/influxdata.gpg
echo "deb [signed-by=/usr/share/keyrings/influxdata.gpg] https://repos.influxdata.com/debian stable main" \
  | sudo tee /etc/apt/sources.list.d/influxdata.list
sudo apt update && sudo apt install -y influxdb2
sudo systemctl enable --now influxdb

# 5) Grafana fuer die Visualisierung
curl -sL https://apt.grafana.com/gpg.key | sudo gpg --dearmor -o /usr/share/keyrings/grafana.gpg
echo "deb [signed-by=/usr/share/keyrings/grafana.gpg] https://apt.grafana.com stable main" \
  | sudo tee /etc/apt/sources.list.d/grafana.list
sudo apt update && sudo apt install -y grafana
sudo systemctl enable --now grafana-server

# 6) Kontrolle: Sind beide Sensoren am I2C-Bus sichtbar? (erwartet: 0x76 und 0x77)
i2cdetect -y 1
```

Abbildung 11: Installationsskript für den Monitoring-Stack (01_installation.sh)

Das Skript gliedert sich in sechs Blöcke:

- **Block 1 (Zeile 6)** aktualisiert das System auf den neuesten Stand.
- **Block 2 (Zeilen 9 und 10)** aktiviert die I2C-Schnittstelle, über die die Temperatursensoren kommunizieren, und installiert Hilfsprogramme: die i2c-tools zur Kontrolle des Busses, Python-Werkzeuge und das Lasttool stress-ng.
- **Block 3 (Zeilen 13 und 14)** installiert Node-RED über das offizielle Installationsskript und richtet es als Systemdienst ein, der bei jedem Start automatisch läuft.
- **Blöcke 4 und 5 (Zeilen 17 bis 29)** binden die Paketquellen von InfluxDB und Grafana ein. Die Befehle mit gpg importieren dabei den Signaturschlüssel des Herstellers, damit das System nur geprüfte Pakete installiert. Anschliessend werden beide Programme installiert und als Dienst gestartet.
- **Block 6 (Zeile 32)** prüft mit i2cdetect, ob beide Sensoren am Bus erkannt werden. Erwartet werden die Adressen 0x76 und 0x77.

6.5.2 Schritt 2: Abfrage der Messsteckdosen

Die Shelly-Messsteckdosen der dritten Generation stellen eine lokale Schnittstelle bereit, die per HTTP abgefragt werden kann, ohne dass eine Cloud-Verbindung nötig ist (Shelly, o. J.). Abbildung 12 zeigt die Abfrage und die Struktur der Antwort.

02_shelly_abfrage.sh

```
#!/bin/bash
# Abfrage der beiden Messsteckdosen ueber die lokale Shelly-RPC-Schnittstelle (Gen2/Gen3)
# Shelly A misst die IT-Last (beide Raspberry Pi), Shelly B misst die Kuehlung (Luefter)

SHELLY_IT="192.168.10.21"
SHELLY_KUEHLUNG="192.168.10.22"

curl -s "http://${SHELLY_IT}/rpc/Switch.GetStatus?id=0"

# Beispiel der Antwort (gekuerzt):
# {
#   "id": 0,
#   "output": true,
#   "apower": 11.4,          <- aktuelle Wirkleistung in Watt
#   "voltage": 231.2,        <- Netzspannung in Volt
#   "current": 0.071,        <- Strom in Ampere
#   "aenergy": { "total": 812.35 }   <- kumulierte Energie in Wh
# }

curl -s "http://${SHELLY_KUEHLUNG}/rpc/Switch.GetStatus?id=0"
```

Abbildung 12: Abfrage der Messsteckdosen über die lokale Schnittstelle (02_shelly_abfrage.sh)

Der Befehl curl ruft die Methode Switch.GetStatus auf. Die Antwort im JSON-Format enthält unter anderem die aktuelle Wirkleistung in Watt (apower), die Netzspannung (voltage), den Strom (current) und die seit Inbetriebnahme kumulierte Energie in Wattstunden (aenergy.total). Für die PUE-Berechnung wird die aktuelle Leistung apower verwendet; die kumulierte Energie erlaubt zusätzlich die Berechnung des PUE über längere Zeiträume, wie es die Norm für den Jahreswert vorsieht.

Dieses Skript dient vor allem dem Test der Verbindung. Im Betrieb übernimmt Node-RED die regelmässige Abfrage (Schritt 5).

6.5.3 Schritt 3: Auslesen der Temperatursensoren

Das Python-Skript in Abbildung 13 liest beide Sensoren aus und gibt die Werte im JSON-Format aus.

03_bme280_sensoren.py

```
#!/usr/bin/env python3
"""Liest Zuluft- und Ablufttemperatur von zwei BME280-Sensoren und gibt sie als JSON aus.

Installation:  pip install RPi.bme280 smbus2
Sensor 1 (Zuluft)  : I2C-Adresse 0x76
Sensor 2 (Abluft)  : I2C-Adresse 0x77  (Adresspin SDO auf 3,3 V)
"""
import json
import time

import bme280
import smbus2

I2C_BUS = 1
SENSOREN = {"zuluft": 0x76, "abluft": 0x77}

bus = smbus2.SMBus(I2C_BUS)
kalibrierung = {name: bme280.load_calibration_params(bus, adr) for name, adr in SENSOREN.items()}


def messen() -> dict:
    """Eine Messung beider Sensoren durchfuehren."""
    werte = {"zeit": int(time.time())}
    for name, adr in SENSOREN.items():
        probe = bme280.sample(bus, adr, kalibrierung[name])
        werte[f"temp_{name}"] = round(probe.temperature, 2)
        werte[f"feuchte_{name}"] = round(probe.humidity, 1)
    # Temperaturdifferenz = Waerme, die die Server an die Luft abgeben
    werte["delta_t"] = round(werte["temp_abluft"] - werte["temp_zuluft"], 2)
    return werte


if __name__ == "__main__":
    print(json.dumps(messen()))
```

Abbildung 13: Auslesen der Temperatursensoren (03_bme280_sensoren.py)

Die Zeilen 14 und 15 legen fest, an welchem Bus und unter welchen Adressen die Sensoren erreichbar sind. Zeile 18 lädt einmalig die Kalibrierungsdaten jedes Sensors; der BME280 speichert werkseitig Korrekturwerte, ohne die die Messung ungenau wäre (Bosch Sensortec, o. J.). Die Funktion messen() in den Zeilen 21 bis 30 liest beide Sensoren nacheinander aus, rundet die Werte und berechnet in Zeile 29 die Temperaturdifferenz zwischen Abluft und Zuluft. Die Ausgabe als JSON in Zeile 34 erlaubt es, die Werte direkt an Node-RED weiterzugeben.

6.5.4 Schritt 4: Automatischer Start

Damit die Temperaturmessung auch nach einem Neustart oder Stromausfall selbstständig läuft (Anforderung A8), wird sie als Systemdienst eingerichtet (Abbildung 14).

06_sensor.service

```
# /etc/systemd/system/bme280-sensor.service
# Startet die Temperaturmessung automatisch beim Booten und alle 10 Sekunden neu

[Unit]
Description=BME280 Temperaturmessung Zuluft/Abluft
After=network-online.target nodered.service
Wants=network-online.target

[Service]
Type=simple
User=pi
ExecStart=/bin/bash -c 'while true; do /home/pi/venv/bin/python /home/pi/rz/03_bme280_sensoren.py \
  | curl -s -X POST -H "Content-Type: application/json" -d @- http://localhost:1880/sensor; sleep 10; done'
Restart=always
RestartSec=5

[Install]
WantedBy=multi-user.target
```

Abbildung 14: Systemdienst für die Temperaturmessung (06_sensor.service)

Der Abschnitt [Unit] legt fest, dass der Dienst erst startet, wenn das Netzwerk und Node-RED bereit sind. Im Abschnitt [Service] wird das Sensorskript alle zehn Sekunden ausgeführt und seine Ausgabe per HTTP an Node-RED gesendet. Die Einstellung Restart=always sorgt dafür, dass der Dienst bei einem Fehler nach fünf Sekunden automatisch neu startet. Aktiviert wird er mit dem Befehl sudo systemctl enable --now bme280-sensor.

6.5.5 Schritt 5: Datenfluss in Node-RED

Die zentrale Logik ist in Node-RED als Flow umgesetzt. Abbildung 15 zeigt dessen Aufbau in schematischer Form.

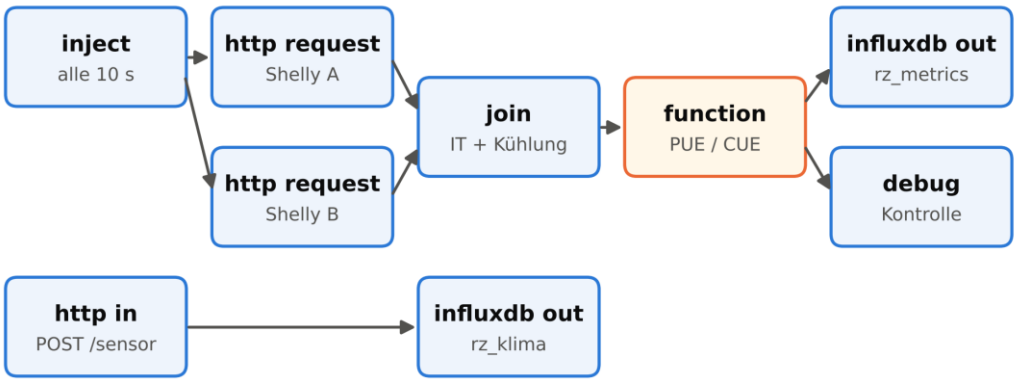


Abbildung 15: Aufbau des Node-RED-Flows (schematische Darstellung)

Der Flow besteht aus zwei Strängen:

- **Strang 1, Leistung und Kennzahlen.** Ein inject-Knoten löst alle zehn Sekunden eine Messung aus. Zwei http-request-Knoten fragen parallel Shelly A und Shelly B ab. Ein join-Knoten wartet, bis beide Antworten vorliegen, und fasst sie zu einer Nachricht mit den Feldern p_it und p_kuehlung zusammen. Der function-Knoten berechnet daraus PUE und CUE (Schritt 6). Das Ergebnis wird in die Datenbank geschrieben und zur Kontrolle im debug-Fenster angezeigt.
- **Strang 2, Klima.** Ein http-in-Knoten empfängt die Temperaturwerte, die der Systemdienst aus Schritt 4 sendet, und schreibt sie in eine eigene Messreihe der Datenbank.

Der vollständige Flow ist in Anhang B als Exportdatei abgebildet und lässt sich in Node-RED über die Importfunktion direkt übernehmen.

6.5.6 Schritt 6: Berechnung von PUE und CUE

Abbildung 16 zeigt den Code des function-Knotens, der die Kennzahlen berechnet.

04_node_red_berechnung.js

```
// Node-RED Function-Node "PUE und CUE berechnen"
// Eingang: msg.payload = { p_it: <Watt>, p_kuehlung: <Watt> }
// Ausgang: Kennzahlen nach DIN EN 50600-4-2 (PUE) und DIN EN 50600-4-8 (CUE)

// CO2-Intensitaet des Strommix in g CO2 pro kWh (Quellen siehe Kapitel 4.4)
const CO2_FAKTOR = {
    schweiz: 40,
    norwegen: 30,
    deutschland: 363,
    usa: 384,
    china: 526,
    indien: 600
};

const pIt = Number(msg.payload.p_it);
const pKuehlung = Number(msg.payload.p_kuehlung);

// Schutz vor Division durch null, falls die IT-Steckdose keine Werte liefert
if (!pIt || pIt <= 0) {
    node.warn("Keine gueltige IT-Leistung - Berechnung uebersprungen");
    return null;
}

const pGesamt = pIt + pKuehlung;
const pue = pGesamt / pIt;

// CUE = CO2-Emissionen / IT-Energie  ->  vereinfacht: Faktor x PUE (in kg CO2 pro kWh IT)
const cue = {};
for (const [land, faktor] of Object.entries(CO2_FAKTOR)) {
    cue[land] = Number(((faktor / 1000) * pue).toFixed(4));
}

msg.payload = {
    p_it: pIt,
    p_kuehlung: pKuehlung,
    p_gesamt: Number(pGesamt.toFixed(2)),
    pue: Number(pue.toFixed(3)),
    cue: cue
};
return msg;
```

Abbildung 16: Berechnung von PUE und CUE im Node-RED-Function-Knoten (04_node_red_berechnung.js)

In den Zeilen 6 bis 13 sind die CO_2-Faktoren der Länder aus Abschnitt 4.4 hinterlegt (Anforderung A4). Die Zeilen 15 und 16 übernehmen die gemessenen Leistungen. Die Prüfung in den Zeilen 19 bis 22 verhindert eine Division durch null, falls die IT-Steckdose vorübergehend keine Werte liefert; in diesem Fall wird eine Warnung ausgegeben und die Berechnung übersprungen. Zeile 25 berechnet den PUE nach der Formel aus Abschnitt 2.5.1.

Die Zeilen 28 bis 31 berechnen den CUE für jedes hinterlegte Land. Grundlage ist die Beziehung CUE = CEF × PUE (vgl. Abschnitt 2.5.5): Der CO_2-Faktor wird von Gramm in Kilogramm

umgerechnet und mit dem aktuellen PUE multipliziert. Das Ergebnis gibt an, wie viele Kilogramm CO_2 pro Kilowattstunde IT-Energie entstehen würden, wenn das Mini-Rechenzentrum mit dem Strommix des jeweiligen Landes betrieben würde. Damit wird die Kernthese der Arbeit direkt im Dashboard sichtbar: Der PUE ist für alle Länder gleich, der CUE unterscheidet sich um mehr als den Faktor 15.

6.5.7 Schritt 7: Lastszenarien

Um den Einfluss der Auslastung zu untersuchen, werden mit dem Werkzeug stress-ng drei reproduzierbare Lastzustände erzeugt (Abbildung 17).

05_lastszenarien.sh

```
#!/bin/bash
# Lastszenarien fuer das Mini-Rechenzentrum mit stress-ng
# Wird auf beiden "Servern" (rz-pi-01 und rz-pi-02) gleichzeitig ausgefuehrt.

DAUER="60m"   # Dauer pro Szenario

echo "Szenario 1: Leerlauf - keine kuenstliche Last"
sleep 3600

echo "Szenario 2: Teillast - 2 von 4 CPU-Kernen zu 50 Prozent ausgelastet"
stress-ng --cpu 2 --cpu-load 50 --timeout "$DAUER" --metrics-brief

echo "Szenario 3: Volllast - alle 4 CPU-Kerne zu 100 Prozent ausgelastet"
stress-ng --cpu 4 --cpu-load 100 --timeout "$DAUER" --metrics-brief

echo "Alle Szenarien abgeschlossen: $(date)"
```

Abbildung 17: Skript für die Lastszenarien (05_lastszenarien.sh)

Das Skript läuft auf beiden Servern gleichzeitig und durchläuft drei Szenarien von je einer Stunde: Leerlauf ohne künstliche Last, Teillast mit zwei von vier Prozessorkernen bei 50 Prozent und Volllast mit allen vier Kernen bei 100 Prozent. Die Option --metrics-brief gibt am Ende jedes Szenarios eine Zusammenfassung der geleisteten Rechenoperationen aus, sodass die Last nachvollziehbar dokumentiert ist.

6.5.8 Schritt 8: Visualisierung

In Grafana wird InfluxDB als Datenquelle eingebunden. Das Dashboard ist für folgende Anzeigen konzipiert:

- Zeitverlauf der IT-Leistung und der Kühlleistung in Watt,
- aktueller PUE als Anzeigeinstrument mit Farbskala, wobei Werte bis 1,2 grün, bis 1,5 gelb und darüber rot dargestellt werden, angelehnt an die Grenzwerte des EnEfG (vgl. Tabelle 4),
- CUE im Ländervergleich als Balkendiagramm,
- Zuluft-, Ablufttemperatur und Temperaturdifferenz im Zeitverlauf.

6.6 Berechnungsgrundlagen und Rechenbeispiele

6.6.1 Erwartete Kennzahlen des Demonstrators

Auf Basis von Literaturwerten lässt sich abschätzen, welche Kennzahlen der Demonstrator liefern wird. Ein Raspberry Pi 5 mit 4 GB Arbeitsspeicher benötigt im Leerlauf rund 3,0 Watt und unter Volllast aller vier Kerne rund 8,8 Watt (raspberry.tips, 2026). Für die Teillast wird der Mittelwert von 5,9 Watt angenommen. Für den Lüfter wird eine konstante Leistung von 1 Watt angenommen (5 Volt bei 0,2 Ampere). Tabelle 12 zeigt die daraus berechneten Werte.

Tabelle 13: Erwartete Kennzahlen des Demonstrators (eigene Berechnung auf Basis von Literaturwerten, keine Messwerte)

Szena-rio	IT-Leistung (2 Server)	Küh-lung	PUE	CUE Schweiz (kg/kWh)	CUE Indien (kg/kWh)
Leerlauf	6,0 W	1,0 W	1,17	0,047	0,700
Teillast	11,8 W	1,0 W	1,08	0,043	0,651
Volllast	17,6 W	1,0 W	1,06	0,042	0,634

Die Tabelle zeigt zwei Effekte, die auch für reale Rechenzentren gelten:

Erstens verbessert sich der PUE mit steigender Last. Da die Kühlleistung konstant bleibt, die IT-Leistung aber steigt, sinkt der relative Anteil der Infrastruktur. Das ist der in Abschnitt 2.5.4 beschriebene Schwachpunkt der Kennzahl: Ein schwach ausgelastetes Rechenzentrum erscheint ineffizienter, obwohl es absolut weniger Strom verbraucht. In der Praxis würde eine geregelte Kühlung ihre Leistung der Last anpassen; der Effekt wäre dann schwächer, aber vorhanden.

Zweitens dominiert der Standort. Der Unterschied des CUE zwischen Leerlauf und Volllast beträgt in der Schweiz rund 10 Prozent. Der Unterschied zwischen der Schweiz und Indien beträgt bei jeder Last rund das Fünfzehnfache.

Diese Werte sind ausdrücklich als Erwartungswerte zu verstehen. Ihre messtechnische Bestätigung mit dem aufgebauten System ist der vorgesehene nächste Schritt (vgl. Abschnitt 6.7 und 9.4).

6.6.2 Rechenbeispiel Standortvergleich

Da die Leistungen eines Modells mit zwei Einplatinencomputern im Wattbereich liegen, wird die Wirkung des Standorts zusätzlich an einem realistisch dimensionierten Szenario gezeigt: einem Serverraum eines KMU mit einer durchschnittlichen IT-Last von 10 Kilowatt im Dauerbetrieb und dem branchenüblichen PUE von 1,54. Die Berechnung erfolgt mit dem Python-Skript in Abbildung 18.

07_standortvergleich.py

```python
#!/usr/bin/env python3
"""Rechenbeispiel Standortvergleich: identische IT-Last, unterschiedlicher Strommix.

Berechnet den Jahresenergiebedarf und die CO2-Emissionen eines Serverraums
fuer verschiedene Laender. Alle Eingangswerte sind Annahmen bzw. Literaturwerte,
keine Messwerte (siehe Kapitel 6.6).
"""

IT_LEISTUNG_KW = 10.0      # durchschnittliche IT-Last eines KMU-Serverraums (Annahme)
STUNDEN_PRO_JAHR = 8760    # Dauerbetrieb 24/7
PUE = 1.54                 # Branchendurchschnitt (Uptime Institute)

CO2_G_PRO_KWH = {          # Strommix-Intensitaet, Quellen siehe Kapitel 4.4
    "Norwegen": 30,
    "Schweiz": 40,
    "Deutschland": 363,
    "USA": 384,
    "China": 526,
    "Indien": 600,
}


def jahresenergie_kwh(it_kw: float, pue: float) -> float:
    """Gesamtenergie = IT-Energie x PUE."""
    return it_kw * STUNDEN_PRO_JAHR * pue


def emissionen_tonnen(energie_kwh: float, g_pro_kwh: float) -> float:
    """CO2 in Tonnen = kWh x g/kWh / 1'000'000."""
    return energie_kwh * g_pro_kwh / 1_000_000


if __name__ == "__main__":
    energie = jahresenergie_kwh(IT_LEISTUNG_KW, PUE)
    print(f"Jahresenergiebedarf: {energie:,.0f} kWh (PUE {PUE})")
    print(f"{'Land':<12}{'g/kWh':>8}{'t CO2/Jahr':>14}")
    for land, faktor in CO2_G_PRO_KWH.items():
        print(f"{land:<12}{faktor:>8}{emissionen_tonnen(energie, faktor):>14.1f}")
```

Abbildung 18: Skript für das Rechenbeispiel Standortvergleich (07_standortvergleich.py)

Die Funktion jahresenergie_kwh() berechnet den Gesamtenergiebedarf als IT-Leistung mal Betriebsstunden mal PUE, die Funktion emissionen_tonnen() rechnet ihn mit dem jeweiligen CO_2-Faktor in Tonnen CO_2 um. Der Jahresenergiebedarf beträgt 10 kW × 8760 h × 1,54 = 134'904 kWh. Abbildung 19 zeigt die resultierenden Emissionen.

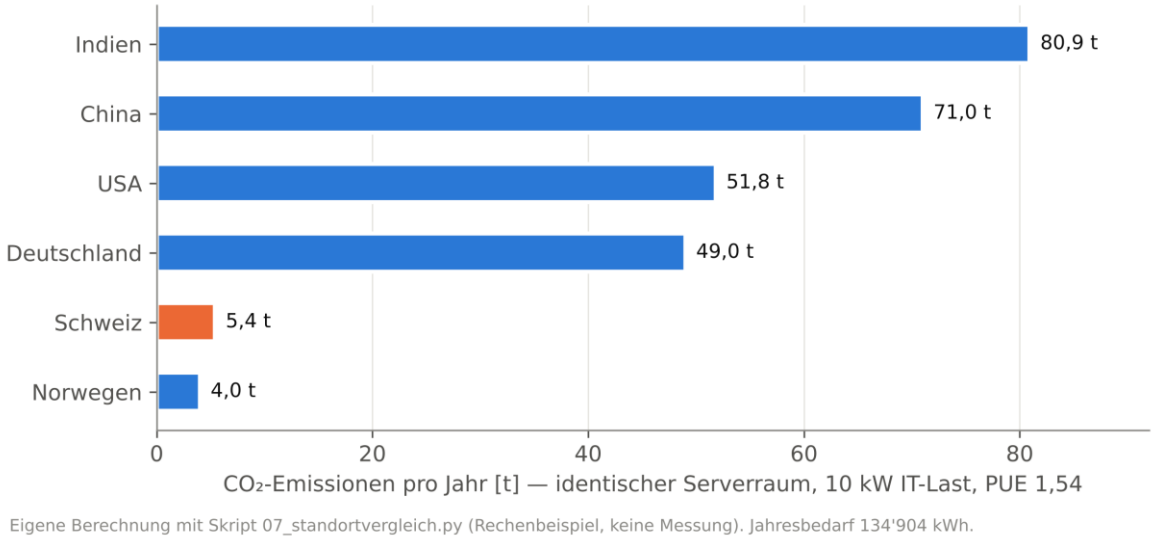


Abbildung 19: Jährliche CO_2-Emissionen eines identischen Serverraums an verschiedenen Standorten (Rechenbeispiel)

Derselbe Serverraum verursacht in der Schweiz rund 5,4 Tonnen CO_2 pro Jahr, in Deutschland rund 49 Tonnen und in Indien rund 81 Tonnen.

Besonders aufschlussreich ist ein weiterer Vergleich. Angenommen, ein Betreiber in Deutschland optimiert seinen Serverraum auf den gesetzlichen Grenzwert für Neubauten von PUE 1,2. Der Jahresbedarf sinkt dann auf 105'120 kWh und die Emissionen auf rund 38,2 Tonnen (eigene Berechnung). Das ist eine erhebliche Verbesserung um rund 22 Prozent. Der unveränderte Serverraum in der Schweiz mit dem deutlich schlechteren PUE von 1,54 verursacht dennoch rund siebenmal weniger CO_2. Effizienz ist wichtig, aber der Strommix wirkt um eine Grössenordnung stärker.

6.7 Modellgrenzen

Ein Modell im Kleinmassstab hat Grenzen, die bei der Interpretation zu berücksichtigen sind:

- **Messkategorie.** Die Messung an der Steckdose entspricht einer einfachen Messkategorie nach DIN EN 50600-4-2 (vgl. Abschnitt 2.5.3). Die Leistung wird nicht an einzelnen Komponenten, sondern für die gesamte Gerätegruppe erfasst.
- **Messgenauigkeit.** Smarte Messsteckdosen sind keine geeichten Messgeräte. Ihr Messfehler wird in der Anwendergemeinschaft auf rund ±5 Prozent geschätzt. Bei Leistungen im Bereich weniger Watt kann der relative Fehler zudem höher sein. Für Vergleiche zwischen Szenarien mit demselben Messgerät ist dies weniger relevant als für absolute Werte.
- **Zuordnung der Netzteilverluste.** Die Verluste der Netzteile werden der IT-Leistung zugerechnet. In einem realen Rechenzentrum würden Verluste von USV und Stromverteilung dagegen als Infrastruktur gezählt.
- **Vereinfachte Kühlung.** Ein ungeregelter Lüfter bildet weder Kältemaschinen noch Pumpen oder eine lastabhängige Regelung ab. Der Kühlanteil ist deshalb im Modell deutlich geringer als in realen Anlagen.
- **Erwartungswerte.** Die Kennzahlen in Tabelle 12 beruhen auf Literaturwerten, nicht auf Messungen am aufgebauten System. Sie zeigen das erwartete Verhalten, ersetzen aber nicht die messtechnische Validierung.
- **Fixe CO_2-Faktoren.** Die hinterlegten Faktoren sind Jahresdurchschnitte. Die tatsächliche CO_2-Intensität schwankt stündlich (vgl. Abschnitt 4.6); eine Erweiterung um Echtzeitdaten wäre möglich.

Diese Grenzen schränken die Aussagekraft für absolute Werte ein, nicht aber für die untersuchten Zusammenhänge. Der Demonstrator zeigt korrekt, wie PUE und CUE entstehen, wie die Last den PUE beeinflusst und wie stark der Standort den CUE bestimmt.

6.8 Zwischenfazit

Der Demonstrator setzt die Kennzahlen PUE und CUE nach DIN EN 50600 mit einfachen, kostengünstigen Mitteln um. Durch die getrennte Erfassung von IT- und Kühlleistung bildet er das Grundprinzip der PUE-Messung realer Rechenzentren nach. Die Implementierung kommt mit wenigen, überschaubaren Skripten aus, da die Hauptlogik grafisch in Node-RED abgebildet ist. Das Rechenbeispiel bestätigt die Kernthese quantitativ: Ein Serverraum in der Schweiz verursacht selbst mit durchschnittlicher Effizienz rund siebenmal weniger CO_2 als ein auf den deutschen Neubau-Grenzwert optimierter Serverraum in Deutschland.

7 Zukunftsperspektiven und gesellschaftliche Akzeptanz

7.1 Zukünftige Energiequellen

Der wachsende Bedarf an konstanter, CO_2-armer Leistung hat eine intensive Suche nach neuen Versorgungsoptionen ausgelöst. Die grossen Betreiber investieren dabei nicht nur in erneuerbare Energien, sondern zunehmend auch in Technologien, die streng genommen nicht erneuerbar, aber CO_2-arm sind. Diese Unterscheidung ist für die folgende Diskussion wesentlich.

7.1.1 Small Modular Reactors

Kleine modulare Reaktoren (Small Modular Reactors, SMR) werden als mögliche Lösung für den Grundlastbedarf von Rechenzentren diskutiert. Sie sollen als Serienprodukt statt als Einzelanfertigung gebaut werden und dadurch sicherer, günstiger und flexibler einsetzbar sein als konventionelle Kernkraftwerke (Handelsblatt, 2024). Die Grössenordnung passt zum Bedarf: Grosse Rechenzentren könnten künftig so viel Strom benötigen, dass ein einzelnes einen oder mehrere SMR vollständig für sich beanspruchen würde (Deutsche Wirtschafts Nachrichten, 2025).

Die grossen Betreiber handeln bereits. Google hat Vereinbarungen mit Entwicklern kleiner Reaktoren getroffen (Handelsblatt, 2024), und Microsoft sicherte sich mit der Wiederinbetriebnahme des Kernkraftwerks Three Mile Island Unit 1 rund 837 Megawatt CO_2-freien Strom für seine Rechenzentren (GPUnex, 2026).

Kritische Stimmen weisen darauf hin, dass mit einem kommerziellen Betrieb von SMR frühestens ab 2030 zu rechnen sei, dieser von massiver staatlicher Förderung abhänge und die Frage der Endlagerung weiterhin ungelöst sei (Agentur für Erneuerbare Energien, o. J.). Diese Quelle vertritt erklärtermassen eine Position zugunsten erneuerbarer Energien; ihre Einwände decken sich jedoch mit den Bedingungen, die auch die IEA für einen Erfolg der Technologie nennt, nämlich fortgesetzte Innovation, ausreichende staatliche Unterstützung und neue Geschäftsmodelle (IEA, zitiert nach Agentur für Erneuerbare Energien, o. J.).

Für die Fragestellung dieser Arbeit ist festzuhalten: SMR sind CO_2-arm, aber **keine erneuerbare Energiequelle**. Sie könnten zur Dekarbonisierung beitragen, lösen aber die Fragen der Rohstoffe, der Abfälle und der Akzeptanz nicht. In der Schweiz ist der Bau neuer Kernkraftwerke derzeit zudem gesetzlich nicht zulässig; eine Änderung wird politisch diskutiert.

7.1.2 Kernfusion

Die Kernfusion wird häufig als langfristige Lösung genannt. Ihr technologischer Durchbruch ist jedoch weiterhin ungewiss; sie benötigt seltene Rohstoffe wie Tritium, Helium, Beryllium und Lithium, und zu welchen Kosten sie Strom liefern könnte, ist offen (Agentur für Erneuerbare Energien, o. J.). Zum Ausgleich schwankender Wind- und Sonnenenergie werden zudem schnell regelbare Anlagen mit geringen Investitionskosten benötigt, eine Eigenschaft, die

Fusionskraftwerke ebenso wenig mitbringen dürften wie herkömmliche Kernkraftwerke. Für den Planungshorizont dieser Arbeit bis 2030 spielt die Kernfusion keine Rolle.

7.1.3 Geothermie der nächsten Generation

Geothermie wird für die Versorgung von Rechenzentren gezielt weiterentwickelt, da sie, wie in Abschnitt 3.5 gezeigt, die bandlastfähigste erneuerbare Quelle ist. Neue Bohr- und Erschliessungsverfahren sollen sie auch an Standorten nutzbar machen, die bisher nicht in Frage kamen. Gelingt dies, würde die heute stark standortgebundene Technologie zu einer breit verfügbaren Ergänzung von Wasserkraft und Photovoltaik.

7.1.4 Speicher als Schlüsseltechnologie

Unabhängig davon, welche Erzeugungstechnologien sich durchsetzen, werden Speicher an Bedeutung gewinnen. KI-Lasten schwanken stark (vgl. Abschnitt 2.3.4), und je höher der Anteil von Photovoltaik und Wind, desto grösser der Ausgleichsbedarf. Batteriespeicher für kurzfristige Spitzen, Pumpspeicher für den Tages- und Wochenausgleich und langfristig Wasserstoff als saisonaler Speicher bilden eine Speicherkette, die eine weitgehend erneuerbare Versorgung erst möglich macht.

7.2 Leben neben einem Rechenzentrum

7.2.1 Belastungen

Rechenzentren sind für ihre Nachbarschaft nicht immer unproblematisch. Anwohnerinnen und Anwohner nennen wiederkehrend dieselben Punkte (Rohtext, 2026; Invezz, 2026):

- **Lärm** durch Kühlanlagen, die dauerhaft laufen, sowie durch Notstromaggregate bei Tests.
- **Wasserverbrauch** bei Kühlkonzepten mit Verdunstung, vor allem in Regionen mit Wasserknappheit.
- **Strompreise.** Müssen Netze für Rechenzentren ausgebaut werden, stellt sich die Frage, ob diese Kosten über allgemeine Netzgebühren auf Haushalte und kleinere Unternehmen umgelegt werden.
- **Flächenverbrauch und Landschaftsbild** durch grosse, fensterlose Hallen.
- **Wenig Arbeitsplätze.** Rechenzentren sind kapitalintensiv, aber nicht personalintensiv; im Verhältnis zur Grösse der Anlagen entstehen wenige dauerhafte Stellen.
- **Immobilienwerte**, die nach Befürchtung von Anwohnern sinken könnten.

7.2.2 Chancen

Dem stehen Vorteile gegenüber:

- **Steuereinnahmen** für die Standortgemeinde bei vergleichsweise geringer Belastung der kommunalen Infrastruktur wie Schulen.
- **Abwärme** für Wohnquartiere, Gewerbe und Landwirtschaft, wie die Schweizer Beispiele in Abschnitt 5.6 zeigen.
- **Digitale Infrastruktur** und bessere Netzanbindung für die Region.

- **Datensouveränität.** Lokale Rechenzentren ermöglichen die Verarbeitung von Daten im eigenen Land; in Deutschland legen 72 Prozent der Befragten Wert darauf (it-daily, 2026).

7.2.3 Der Verteilungskonflikt

Der Kern der Auseinandersetzung lässt sich als Verteilungskonflikt beschreiben (Tabelle 13).

Tabelle 14: Verteilung von Nutzen und Lasten eines Rechenzentrums (eigene Darstellung)

Dimension	Wer profitiert	Wer trägt die Last
Digitale Dienste	Nutzerinnen und Nutzer weltweit	–
Wirtschaftlicher Ertrag	Betreiber und Kunden	–
Steuereinnahmen	Gemeinde	–
Lärm, Landschaftsbild, Verkehr	–	Anwohnerinnen und Anwohner
Netzausbaukosten	–	alle Stromkunden der Region
Wasserverbrauch	–	Region, insbesondere bei Knappheit

Die Belastungen sind lokal und konkret, der Nutzen ist global und abstrakt. Diese Asymmetrie erklärt, warum der Widerstand gegen Rechenzentren wachsen kann, obwohl ihre Dienste von nahezu allen genutzt werden.

7.3 Was die Bevölkerung denkt

7.3.1 Vereinigte Staaten

Die öffentliche Meinung in den USA hat sich innerhalb kurzer Zeit grundlegend gewandelt. Eine Umfrage des Annenberg Public Policy Center der University of Pennsylvania unter 1320 Erwachsenen ergab, dass 61 Prozent den Bau neuer Rechenzentren in ihrer Region ablehnen, gegenüber 49 Prozent vier Monate zuvor. Die Ablehnung verläuft quer durch die politischen Lager: 69 Prozent der Demokraten, 54 Prozent der Republikaner und 53 Prozent der Unabhängigen (Invezz, 2026). Forschende der Brookings Institution beschreiben dies als Wandel von einer vorsichtig optimistischen Sicht zur offenen Ablehnung (Invezz, 2026).

Eine weitere Erhebung unter 2045 registrierten Wählerinnen und Wählern kommt auf 75 Prozent Ablehnung. Ein Jahr zuvor lagen Zustimmung und Ablehnung mit 43 zu 42 Prozent noch fast gleichauf (Datacenter-Insider, 2026).

7.3.2 Deutschland

In Deutschland fällt das Bild deutlich anders aus. Eine Umfrage von Bitkom Research unter 1006 Personen ab 16 Jahren ergab, dass 66 Prozent einem neuen Rechenzentrum am eigenen Wohnort grundsätzlich positiv gegenüberstehen; rund ein Viertel sähe einen Neubau eher oder sehr negativ. 82 Prozent zählen Rechenzentren zur Basisinfrastruktur wie Strom, Wasser oder Strassen, und 73 Prozent finden, Deutschland benötige mehr davon (it-daily, 2026). Abbildung 20 stellt die Umfragen gegenüber.

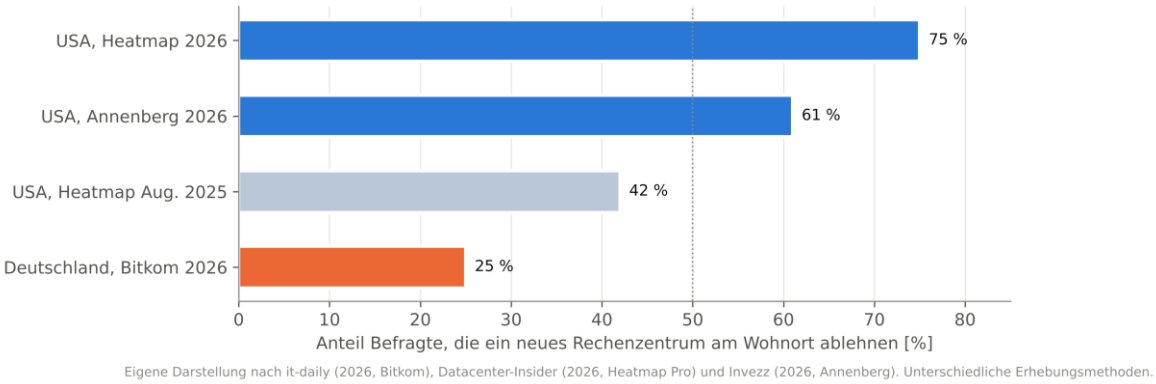


Abbildung 20: Ablehnung neuer Rechenzentren am Wohnort in den USA und in Deutschland

Beim Vergleich ist Vorsicht geboten, da die Umfragen unterschiedliche Methoden und Fragestellungen verwenden. Der Unterschied ist jedoch so gross, dass er nicht allein methodisch erklärbar ist.

7.3.3 Erklärungsansätze

Für den Gegensatz zwischen den USA und Deutschland kommen mehrere Faktoren in Frage:

- **Massstab.** Viele Anlagen in den USA sind um ein Vielfaches grösser als typische europäische Rechenzentren und konzentrieren sich in wenigen Regionen (vgl. Abschnitt 2.2.2).
- **Regulierung.** In Europa bestehen Vorgaben zu Effizienz, Abwärme und erneuerbarem Strom (vgl. Abschnitt 2.6); in den USA fehlen solche Auflagen weitgehend.
- **Verteilung der Netzkosten.** Wo Netzausbaukosten auf Endkunden umgelegt werden, wird das Rechenzentrum für Anwohner direkt im Portemonnaie spürbar.
- **Information.** In Deutschland wünschen sich 92 Prozent der Befragten eine bessere Erklärung, wofür neue Rechenzentren benötigt werden (it-daily, 2026). Fehlende Information wird als eine Ursache lokalen Widerstands genannt.

Der letzte Punkt ist praktisch der bedeutsamste, weil er von den Betreibern direkt beeinflusst werden kann: Akzeptanz hängt offenbar stark davon ab, ob Nutzen und Massnahmen nachvollziehbar kommuniziert werden.

7.3.4 Akzeptanz als wirtschaftlicher Faktor

Der Widerstand hat messbare Folgen. Im ersten Halbjahr 2026 wurden in den USA rund 120 Rechenzentrumsprojekte im Wert von fast 170 Milliarden Euro blockiert oder verzögert. Im laufenden Wahlzyklus gelangten 17 Abstimmungen mit Bezug zu Rechenzentren auf den Stimmzettel, unter anderem zu Flächenwidmung, Energie- und Wasserverbrauch und Lärmgrenzen (Trending Topics, 2026).

Lokale Zustimmung wird damit zu einer betriebswirtschaftlichen Grösse: Sie entscheidet über Projektlaufzeiten, Risikoprämien und die Frage, ob ein Standort überhaupt finanzierbar bleibt. Technische Entscheidungen wie Kühlkonzepte mit geringem Wasserbedarf oder Schallschutz werden damit auch zu Akzeptanzfragen (Rohtext, 2026). Hier schliesst sich der Kreis zu dieser Arbeit: Erneuerbare Energie, effiziente Kühlung und Abwärmenutzung sind nicht nur ökologisch sinnvoll, sondern zunehmend Voraussetzung dafür, überhaupt bauen zu dürfen.

7.4 Die Schweizer Perspektive

Für die Schweiz liegen keine vergleichbaren repräsentativen Umfragen zur Akzeptanz von Rechenzentren vor; dies ist eine Forschungslücke. Einige Anhaltspunkte lassen sich dennoch festhalten:

- Die politische Debatte konzentriert sich bislang auf konkrete Bedingungen wie die Abwärmenutzung und weniger auf eine grundsätzliche Ablehnung (SRF, 2026).
- Die Schweizer Praxisbeispiele in Abschnitt 5.7 verbinden ihren Betrieb mit einem sichtbaren lokalen Nutzen, etwa Wärme für Wohnquartiere oder eine Käserei.
- Der saubere Strommix und die moderate Wachstumsprognose dürften die Konfliktlinien weniger scharf machen als in den USA.

Nach meiner Einschätzung wird die Akzeptanz in der Schweiz vor allem dann zum Thema, wenn sehr grosse Projekte wie das geplante KI-Rechenzentrum in Laufenburg in Konkurrenz zu anderen Stromverbrauchern treten, insbesondere im Winterhalbjahr, wenn die inländische Produktion knapp ist. Betreiber, die frühzeitig auf Abwärmenutzung, Transparenz bei Strom- und Wasserverbrauch und einen sichtbaren Nutzen für die Region setzen, dürften dabei im Vorteil sein.

8 Herausforderungen und kritische Würdigung

8.1 Intermittenz erneuerbarer Energien

Die grundlegende Herausforderung liegt im Widerspruch zwischen dem konstanten Bedarf von Rechenzentren und der schwankenden Produktion der günstigsten erneuerbaren Quellen. Photovoltaik erreicht im weltweiten Mittel einen Kapazitätsfaktor von 17 Prozent, Onshore-Wind von 34 Prozent (IRENA, 2025). Eine vollständig erneuerbare Versorgung rund um die Uhr erfordert deshalb entweder bandlastfähige Quellen wie Wasserkraft und Geothermie oder erhebliche Speicherkapazitäten. Wie schwierig dies selbst für die finanzkräftigsten Betreiber ist, zeigt Google: Bilanziell deckte das Unternehmen seinen Verbrauch vollständig mit erneuerbarem Strom, stündlich betrachtet jedoch nur zu 61 Prozent (Data Center Frontier, 2020).

8.2 Netzkapazität

Selbst wo ausreichend erneuerbarer Strom erzeugt wird, muss er zum Rechenzentrum gelangen. Grosse Anlagen benötigen Netzanschlüsse im Bereich von Dutzenden bis Hunderten Megawatt, deren Bau Jahre dauert. Die IEA weist darauf hin, dass sich die Engpässe in den Energielieferketten zuletzt verschärft haben (IEA, 2026). In der Schweiz kommt hinzu, dass die inländische Produktion im Winter knapp ist; ein starkes Wachstum von Rechenzentren würde den Importbedarf in dieser Jahreszeit erhöhen.

8.3 Graue Energie der Hardware

Diese Arbeit konzentriert sich auf den Betrieb. Ein vollständiges Bild muss jedoch auch die graue Energie berücksichtigen, also die Energie und die Emissionen aus Herstellung, Transport und Entsorgung der Hardware. Allianz Trade schätzt, dass rund ein Viertel der Emissionen der digitalen Infrastruktur auf Hardware und Infrastruktur entfällt (Allianz Trade, 2026). Je sauberer der Strom im Betrieb, desto grösser wird dieser Anteil relativ. Für ein Rechenzentrum in der Schweiz mit rund 40 Gramm CO_2 pro Kilowattstunde können die Emissionen aus der Hardwareproduktion die Betriebsemissionen deshalb übersteigen. Die Kennzahl CUE erfasst diese Emissionen nicht (vgl. Abschnitt 2.5.5). Eine längere Nutzungsdauer der Hardware kann in diesem Fall mehr bewirken als ein weiterer Effizienzgewinn im Betrieb.

8.4 Datenqualität und Transparenz

Viele Aussagen dieser Arbeit beruhen auf Schätzungen und Hochrechnungen. Die IEA-Zahlen stützen sich auf Unternehmensangaben und Kapazitätsdaten, und in der Schweiz besteht keine Berichtspflicht für Rechenzentren. Besonders gross ist die Datenlücke beim Wasserverbrauch (AlgorithmWatch CH, 2026). Auch die verwendeten CO_2-Faktoren sind Jahresdurchschnitte, deren Berechnungsgrundlagen sich zwischen Quellen unterscheiden können. Die quantitativen Ergebnisse sind deshalb als Grössenordnungen zu verstehen. Die zentrale Aussage zum Einfluss des Strommixes bleibt davon unberührt, da die Unterschiede zwischen den Ländern um ein Vielfaches grösser sind als die Unsicherheiten der einzelnen Werte.

8.5 Zielkonflikt zwischen KI-Wachstum und Klimazielen

Schliesslich besteht ein grundsätzlicher Zielkonflikt. Mehrere grosse Technologieunternehmen haben ambitionierte Klimaziele für 2030 formuliert und verzeichnen gleichzeitig steigende Emissionen durch den Ausbau ihrer Rechenzentren (Carbon Brief, 2025). Der Rebound-Effekt (vgl. Abschnitt 2.3.5) zeigt, dass technische Effizienz allein den Verbrauch nicht begrenzt. Gleichzeitig kann KI selbst zur Emissionsminderung beitragen, etwa durch die Optimierung von Kühlanlagen, wie das Beispiel von DeepMind zeigt (DeepMind, 2016), oder durch Anwendungen in anderen Sektoren. Ob die Bilanz am Ende positiv ausfällt, hängt wesentlich davon ab, mit welchem Strom und an welchen Standorten der Ausbau erfolgt.

8.6 Kritische Würdigung der eigenen Arbeit

Auch die vorliegende Arbeit hat Grenzen, die offenzulegen sind:

- Sie stützt sich überwiegend auf Sekundärquellen. Einige der verwendeten Umfragen und Fallbeispiele wurden über Fachmedien zitiert, nicht über die Originalstudien.
- Mehrere Quellen stammen von Unternehmen oder Interessenverbänden und sind entsprechend einzuordnen.
- Der praktische Teil zeigt die untersuchten Zusammenhänge im Modell; die Kennzahlen des Demonstrators beruhen auf Erwartungswerten aus der Literatur und sind noch messtechnisch zu bestätigen.
- Kosten wurden auf Ebene der Stromgestehungskosten verglichen; eine vollständige Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für einen konkreten Betreiber fehlt.

Diese Einschränkungen betreffen die Präzision einzelner Werte, nicht aber die Hauptaussagen, die sich über verschiedene, voneinander unabhängige Quellen hinweg konsistent zeigen.

9 Fazit und Empfehlungen

9.1 Beantwortung der Fragestellungen

F1: Wie stark steigt der Energiebedarf von Rechenzentren durch KI, und welche Rolle spielt die Schweiz? Der weltweite Stromverbrauch von Rechenzentren wird sich nach Prognosen der IEA von 415 TWh im Jahr 2024 auf rund 945 TWh im Jahr 2030 mehr als verdoppeln. KI ist der wichtigste Treiber: 2025 wuchs der Verbrauch KI-fokussierter Rechenzentren um 50 Prozent. KI verändert zudem das Lastprofil hin zu grossen, schnellen Schwankungen. Die Schweiz verbrauchte 2024 rund 2,1 TWh für Rechenzentren und erwartet bis 2030 ein moderateres Wachstum auf 2,5 bis 3,2 TWh. Einzelne Grossprojekte könnten diese Prognose jedoch deutlich verändern.

F2: Welche erneuerbaren Energiequellen eignen sich am besten? Für den 24-Stunden-Betrieb eignen sich bandlastfähige Quellen am besten: Wasserkraft, die in der Schweiz rund 60 Prozent der Stromproduktion liefert und regelbar ist, sowie Geothermie mit einem Kapazitätsfaktor von 88 Prozent, deren Nutzung allerdings stark standortgebunden ist. Photovoltaik und Wind sind die günstigsten Quellen, aber nur in Kombination mit Speichern oder Netzbezug tragfähig. Für Schweizer Rechenzentren ist Wasserkraft die tragende Säule, ergänzt durch Photovoltaik.

F3: Mit welchen Versorgungsmodellen lässt sich eine nachhaltige Versorgung sicherstellen? Am wirkungsvollsten ist die Kombination aus einem sauberen Netz am Standort und langfristigen Abnahmeverträgen mit neuen erneuerbaren Anlagen. Eigenerzeugung ist ein sinnvoller Baustein, deckt aber nur einen kleinen Teil des Bedarfs. Speicher werden durch die Lastschwankungen von KI unverzichtbar. Aussagen zu «100 Prozent erneuerbarem Strom» sind nur glaubwürdig, wenn Zusätzlichkeit, räumliche Nähe und zeitliche Übereinstimmung erfüllt sind.

F4: Welche technischen Massnahmen tragen am meisten zur Reduktion des Energieverbrauchs bei? Der grösste Hebel neben der IT selbst ist die Kühlung, die zwischen 7 und über 30 Prozent des Verbrauchs ausmacht. Free Cooling mit Aussenluft oder Seewasser, Flüssig- und Immersionskühlung erreichen PUE-Werte nahe 1,0. Abwärmenutzung verbessert die Gesamtbilanz zusätzlich. Schweizer Beispiele wie das Rechenzentrum D4 in Genf mit einem PUE von 1,09 belegen die Umsetzbarkeit.

F5: Wie lässt sich die Klimawirkung messbar machen, und welchen Einfluss hat der Standort? Der PUE misst die Effizienz der Infrastruktur, nicht aber die Klimawirkung. Dafür ist der CUE nötig, der sich als Produkt aus CO_2-Faktor des Stroms und PUE ergibt. Der Demonstrator setzt beide Kennzahlen nach DIN EN 50600 um. Das Rechenbeispiel zeigt: Ein identischer Serverraum verursacht in Indien rund fünfzehnmal mehr CO_2 als in der Schweiz, und selbst ein auf den deutschen Neubau-Grenzwert optimierter Serverraum in Deutschland verursacht rund siebenmal mehr CO_2 als ein durchschnittlich effizienter Serverraum in der Schweiz.

F6: Wie steht die Bevölkerung zu Rechenzentren? In den USA lehnen je nach Umfrage 61 bis 75 Prozent ein neues Rechenzentrum in ihrer Nähe ab; im ersten Halbjahr 2026 wurden

rund 120 Projekte blockiert oder verzögert. In Deutschland stehen dagegen 66 Prozent einem Neubau am Wohnort positiv gegenüber. Als Erklärung kommen Massstab, Regulierung, Verteilung der Netzkosten und Information in Frage. Akzeptanz wird damit zu einer Voraussetzung für den Ausbau.

Die übergeordnete These der Arbeit hat sich bestätigt: **Nicht die Rechenleistung allein entscheidet über die Klimawirkung eines Rechenzentrums, sondern der Strommix am Standort und die Effizienz der Infrastruktur, wobei der Strommix um eine Grössenordnung stärker wirkt.**

9.2 Handlungsempfehlungen

Aus den Ergebnissen lassen sich folgende Empfehlungen für Betreiber und IT-Verantwortliche ableiten:

- **CUE neben dem PUE ausweisen.** Der PUE allein ist für die Klimawirkung nicht aussagekräftig. Betreiber sollten den CUE und die WUE nach DIN EN 50600 erheben und veröffentlichen.
- **Messen, bevor optimiert wird.** Eine getrennte Erfassung von IT- und Infrastrukturleistung ist die Grundlage jeder Optimierung. Wie der Demonstrator zeigt, ist dies auch mit geringen Mitteln möglich.
- **Erneuerbaren Strom mit Zusätzlichkeit beschaffen.** Abnahmeverträge mit neuen Anlagen im selben Netz sind Zertifikaten aus bestehenden Anlagen vorzuziehen; langfristig ist eine stündliche Deckung anzustreben.
- **Kühlung auf Free Cooling und Abwärme ausrichten.** Bei Neubau oder Sanierung sollten natürliche Kühlung und Abwärmenutzung von Beginn an eingeplant werden, auch wenn die Schweiz dies noch nicht vorschreibt.
- **Unternehmensinterne Serverräume prüfen.** Die 56 Prozent des Schweizer Rechenzentrumsverbrauchs, die auf unternehmensinterne Anlagen entfallen, bergen das grösste ungenutzte Potenzial. Konsolidierung oder Auslagerung in effiziente Colocation-Rechenzentren kann sich ökologisch wie wirtschaftlich lohnen.
- **Den Schweizer Standortvorteil nutzen.** Für Unternehmen mit Wahlfreiheit spricht der saubere Strommix klar für einen Betrieb in der Schweiz oder in Ländern mit vergleichbarem Strommix.
- **Transparent kommunizieren.** Strom- und Wasserverbrauch, Abwärmenutzung und lokaler Nutzen sollten offen kommuniziert werden, um Akzeptanz zu schaffen.
- **Hardware länger nutzen.** Bei sehr sauberem Strom gewinnt die graue Energie an Gewicht; eine längere Nutzungsdauer der Hardware wird damit zu einer relevanten Klimamassnahme.

9.3 Ausblick

Mehrere Erweiterungen bieten sich an. Der nächste Schritt ist die messtechnische Validierung des Demonstrators: Messreihen über alle Lastszenarien und über mindestens 24 Stunden würden die Erwartungswerte aus Tabelle 12 überprüfen und den Einfluss der Raumtemperatur sichtbar machen. Eine zweite Erweiterung ist die Anbindung von Echtzeitdaten zur CO_2-Intensität des Stroms, etwa über die Plattformen von Swissgrid oder ENTSO-E, um den CUE stündlich statt mit Jahresdurchschnitten zu berechnen. Drittens liesse sich eine lastabhängige Regelung des Lüfters ergänzen, um den Effekt einer bedarfsgerechten Kühlung auf den PUE zu zeigen.

Für die Branche ist zu erwarten, dass Transparenzpflichten nach europäischem Vorbild auch in der Schweiz an Bedeutung gewinnen und dass Abwärmenutzung und Speicher zum Standard werden. Ob die erwartete Verdopplung des weltweiten Verbrauchs klimaverträglich gelingt, wird weniger von einzelnen technologischen Durchbrüchen abhängen als von der Frage, wo und mit welchem Strom die neuen Rechenzentren gebaut werden.

9.4 Persönliche Reflexion

Als ich mit dieser Arbeit begann, hatte ich eine klare Vorstellung: eine Literaturarbeit über erneuerbare Energien für Rechenzentren. Das Thema interessierte mich, weil ich in meinem Berufsalltag täglich mit Server-Hardware zu tun habe, mir aber nie bewusst Gedanken darüber gemacht hatte, was der Betrieb dieser Systeme energetisch bedeutet.

Der wichtigste Wendepunkt kam früh. Als ich die Diplomarbeiten früherer Absolventen der TEKO durchsah, wurde mir klar, dass hier keine reine Literaturrecherche erwartet wird, sondern ein praktischer, technischer Anteil. Ich musste meine Planung grundlegend überarbeiten. Rückblickend hätte ich diese Arbeiten lesen sollen, bevor ich die Struktur festlegte; das hätte mir einen Umweg erspart.

Inhaltlich hat mich vor allem überrascht, wie gross die Unterschiede zwischen den Ländern sind. Dass Rechenzentren weltweit rund siebenmal so viel Strom verbrauchen wie die ganze Schweiz, hatte ich nicht erwartet. Noch mehr beschäftigt hat mich das Rechenbeispiel: Ein Serverraum in Deutschland, der auf den gesetzlichen Bestwert optimiert ist, verursacht immer noch ein Vielfaches mehr CO_2 als ein durchschnittlicher Serverraum in der Schweiz. Bisher hatte ich Effizienz und Nachhaltigkeit praktisch gleichgesetzt. Diese Arbeit hat mir gezeigt, dass der PUE allein wenig über die Klimawirkung aussagt.

Beim praktischen Teil musste ich mit meinen Grenzen umgehen. Meine Programmiererfahrung ist begrenzt. Deshalb habe ich bewusst Werkzeuge gewählt, bei denen der Grossteil der Logik grafisch konfiguriert wird, und die Skripte so kurz gehalten, dass ich jede Zeile erklären kann. Aus Zeitgründen habe ich den Demonstrator konzipiert und implementiert, aber nicht messtechnisch validiert. Das ist die grösste Schwäche meiner Arbeit, und ich würde sie heute anders angehen: Hardware ganz am Anfang bestellen und den Aufbau parallel zum Schreiben umsetzen, statt ihn ans Ende zu stellen.

Für meinen Berufsalltag nehme ich vor allem eine neue Sichtweise mit. In meiner Arbeit mit Server-Hardware, etwa bei der Datenlöschung und der Wiederverwendung von Geräten, sehe

ich heute deutlicher, dass auch eine längere Nutzungsdauer von Hardware ein Beitrag zum Klimaschutz ist, besonders bei sauberem Strom wie in der Schweiz.

Quellenverzeichnis

Agentur für Erneuerbare Energien. (o. J.). *Mythos #8: Sind Kernfusion und Mini-Reaktoren die Zukunft?* https://www.unendlich-viel-energie.de/projekte/erneuerbar-statt-atomar/mythos-8-sind-kernfusion-und-mini-reaktoren-die-zukunft

AlgorithmWatch CH. (2026). *Ein Fluss durchströmt die Cloud: Der versteckte Wasserverbrauch von Schweizer Rechenzentren.* https://algorithmwatch.ch/de/versteckter-wasserverbrauch-rechenzentren/

Allianz Trade. (2026, 30. Juni). *Rechenzentren klimaschädlicher als gedacht – Schweiz dank grünem Strommix positive Ausnahme* [Medienmitteilung zur Studie «Code, carbon, kilowatts»]. https://www.presseportal-schweiz.ch/pressemeldungen/rechenzentren-klimaschaedlicher-als-gedacht-schweiz-dank-gruenem-strommix-positive

aquatherm. (2026). *PUE von Rechenzentren: Kennzahl für die Energieeffizienz.* https://blog.aquatherm.de/pue-vom-rechenzentrum-kennzahl-f%C3%BCr-die-energieeffizienz

atNorth. (2023, 29. November). *How environmentally friendly are Iceland's data centers?* https://www.atnorth.com/insights/how-environmentally-friendly-are-icelands-data-centers

BFE – Bundesamt für Energie. (2025a). *Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2024.* Bern: BFE. https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/12228

BFE – Bundesamt für Energie. (2025b, 7. Februar). *Schweizer Elektrizitätsbilanz 2024: Stromverbrauch gestiegen.* energeiaplus. https://energeiaplus.com/2025/02/07/schweizer-elektrizitaetsbilanz-2024-stromverbrauch-gestiegen/

BFE – Bundesamt für Energie. (2026, 7. Mai). *Rechenzentren in der Schweiz: Stromverbrauch und Effizienzpotenziale* [Medienmitteilung zur Studie im Auftrag von EnergieSchweiz]. https://www.admin.ch/de/newnsb/GV-_d7OgllqjfQDGZqbkN

Bosch Sensortec. (o. J.). *BME280 – Combined humidity and pressure sensor* [Datenblatt]. https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/humidity-sensors-bme280/

Brookings. (2026, 10. Juni). *Global energy demands within the AI regulatory landscape.* Brookings Institution. https://www.brookings.edu/articles/global-energy-demands-within-the-ai-regulatory-landscape/

Carbon Brief. (2025, 15. September). *AI: Five charts that put data-centre energy use – and emissions – into context.* https://www.carbonbrief.org/ai-five-charts-that-put-data-centre-energy-use-and-emissions-into-context

ComConsult. (2026). *Ganzheitliche Energieeffizienz im Rechenzentrum – Aussagekraft und Grenzen der Kennzahl PUE.* https://www.comconsult.com/ganzheitliche-energieeffizienz-im-rechenzentrum-aussagekraft-und-grenzen-der-kennzahl-pue/

Data Center Frontier. (2020, 14. September). *Google: Our data centers will be carbon-free, round-the-clock by 2030.* https://www.datacenterfrontier.com/energy/article/11428734/google-our-data-centers-will-be-carbon-free-round-the-clock-by-2030

Datacenter-Insider. (2026). *Drei Viertel der US-Wähler lehnen Rechenzentren in ihrer Nähe ab.* https://www.datacenter-insider.de/drei-viertel-der-us-waehler-lehnen-rechenzentren-in-ihrer-naehe-ab-a-12cce4efef99e57df46f73cc0ae11982/

DeepMind. (2016, 20. Juli). *DeepMind AI reduces Google data centre cooling bill by 40%.* https://deepmind.google/blog/deepmind-ai-reduces-google-data-centre-cooling-bill-by-40/

Deutsche Wirtschafts Nachrichten. (2025). *Small Modular Reactors (SMR): Was Mini-Atomkraftwerke wirklich leisten.* https://deutsche-wirtschafts-nachrichten.de/714286/small-modular-reactors-(smr)-was-mini-atomkraftwerke-wirklich-leisten

DLA Piper. (2024, Juli). *Information obligations for data centre operators.* https://www.dlapiper.com/de-de/insights/publications/2024/07/information-obligations-for-data-centre-operators

Electricity Demand and Grid Impacts of AI Data Centers: Challenges and Prospects. (2025). arXiv:2509.07218 [Autorinnen und Autoren beim Original ergänzen]. https://arxiv.org/html/2509.07218v3

EnEfG. (2023). *Gesetz zur Steigerung der Energieeffizienz in Deutschland (Energieeffizienzgesetz – EnEfG)*, § 11 Klimaneutrale Rechenzentren. https://www.gesetze-im-internet.de/enefg/__11.html

Energy use of AI inference, efficiency pathways, and test-time scaling. (2026). *Joule* [Autorinnen und Autoren beim Original ergänzen]. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435126001145

Europäische Kommission. (2024). *Delegierte Verordnung (EU) 2024/1364 der Kommission vom 14. März 2024 über die erste Phase der Einrichtung eines gemeinsamen Bewertungssystems der Union für Rechenzentren.* Amtsblatt der Europäischen Union. http://data.europa.eu/eli/reg_del/2024/1364/oj

Google. (o. J.). *Effizienz der Stromnutzung – Google-Rechenzentren.* https://datacenters.google/intl/de_ALL/efficiency/

GPUnex. (2026). *AI-Rechenzentrum-Energiekrise: Strom, Kühlung und Skalierungsgrenzen.* https://www.gpunex.com/de/blog/ai-data-center-energy-crisis/

Haghshenas, K., Setz, B., Bloch, Y., & Aiello, M. (2022). *Enough hot air: The role of immersion cooling.* arXiv:2205.04257. https://arxiv.org/abs/2205.04257

Handelsblatt. (2024). *SMR: Google setzt auf Atomstrom aus neuartigen Mini-Reaktoren.* https://www.handelsblatt.com/technik/forschung-innovation/energie-google-will-atomstrom-fuer-rechenzentren-einkaufen-01/100079210.html

IEA – International Energy Agency. (2025). *Energy and AI.* Paris: IEA. https://www.iea.org/reports/energy-and-ai

IEA – International Energy Agency. (2026). *Key questions on energy and AI.* Paris: IEA. https://www.iea.org/reports/key-questions-on-energy-and-ai

Invezz. (2026, 21. September). *Der Rechenzentrum-Widerstand wird zum parteiübergreifenden Thema der US-Midterms 2026* [Bericht zur Umfrage des Annenberg Public Policy Center]. https://invezz.com/de/news/2026/09/21/der-rechenzentrum-widerstand-wird-zum-parteiubergreifenden-thema-der-us-midterms-2026/

IRENA – International Renewable Energy Agency. (2025). *Renewable power generation costs in 2024.* Abu Dhabi: IRENA. https://www.irena.org/Publications/2025/Jun/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2024

Iron Mountain. (2026, 27. April). *AI training vs. AI inference data centers: What's the difference and why does it matter?* https://resources.ironmountain.com/blogs-and-articles/d/data-centers-ai-training-vs-ai-inference-data-centers-whats-the-difference-and-why-does-it-matter

IT Reseller. (2026, Juni). *Nachhaltigkeit im Rechenzentrumsland Schweiz.* Swiss IT Media. https://www.itreseller.ch/Artikel/105569/Nachhaltigkeit_im_Rechenzentrumsland_Schweiz.html

it-daily. (2026, 2. September). *Mehrheit der Deutschen offen für neues Rechenzentrum am eigenen Wohnort* [Bericht zur Bitkom-Umfrage]. https://www.it-daily.net/shortnews/rechenzentrum-wohnort

Kyos. (o. J.). *What is the difference between a virtual and physical PPA?* https://kyos.com/?p=9570

Nant de Drance. (2023, 3. Juli). *Ein Jahr Nant de Drance* [Medienmitteilung]. https://www.nant-de-drance.ch/fileadmin/Presse_Communiques/MM_20230703_1an_DE_final.pdf

Node-RED. (o. J.). *Running on Raspberry Pi.* https://nodered.org/docs/getting-started/raspberrypi

Öko-Institut. (o. J.). *Entwicklung einer Energieeffizienzkennzeichnung für Rechenzentren.* https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Oeko-Institut_Energieeffizienzkennzeichnung-fuer-Rechenzentren.pdf

Our World in Data. (2026). *How much energy do data centers and artificial intelligence use?* https://ourworldindata.org/how-much-energy-do-data-centers-and-artificial-intelligence-use

prior1. (2026). *Power Usage Effectiveness (PUE).* https://prior1.com/rz-wissen/power-usage-effectiveness-pue/

raspberry.tips. (2026, 17. September). *Raspberry Pi power consumption (Update 2026): All models compared.* https://raspberry.tips/en/faq/raspberry-pi-power-consumption-update-2026-all-models-compared

rechenzentren.org. (2026). *DIN EN 50600: Normenreihe für Planung, Bau und Betrieb von Rechenzentren.* https://www.rechenzentren.org/normen/din-en-50600-die-norm-fuer-die-planung-und-den-bau-von-rechenzentren/

Rohtext. (2026). *KI-Rechenzentren stossen auf lokalen Widerstand.* https://rohtext.de/ki/ki-rechenzentren-stossen-auf-lokalen-widerstand

Shelly. (o. J.). *Switch – Shelly Gen2+ API documentation.* https://shelly-api-docs.shelly.cloud/gen2/ComponentsAndServices/Switch

Socomec. (2026). *PUE-Wert: Messung der PUE (Power Usage Effectiveness).* https://www.socomec.de/de/loesungen/maerkte/rechenzentren/messung-der-pue-power-usage-effectiveness

Sorrell, S. (2009). Jevons' paradox revisited: The evidence for backfire from improved energy efficiency. *Energy Policy, 37*(4), 1456–1469. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.12.003

SRF – Schweizer Radio und Fernsehen. (2026, 15. Juni). *Stromfressende Rechenzentren werden in der Schweiz zum Politikum.* https://www.srf.ch/news/schweiz/digitalisierung-braucht-strom-stromfressende-rechenzentren-werden-in-der-schweiz-zum-politikum

Stulz. (o. J.). *Making efficiency comparable: KPIs for EN 50600-compliant data centers.* https://www.stulz.com/newsroom/detail/making-efficiency-comparable-kpis-for-en-50600-compliant-data-centers/

The Green Grid. (2010). *Carbon Usage Effectiveness (CUE): A Green Grid data center sustainability metric* (White Paper #32). https://www.thegreengrid.org

The Register. (2022, 1. August). [Bericht über den Test eines 3-MW-Wasserstoff-Brennstoffzellensystems von Microsoft]. https://www.theregister.com/2022/08/01/microsoft_3mw_fuel_cell_test/

Trending Topics. (2026, September). *US-Widerstand bremst 120 Rechenzentren um fast 170 Milliarden Euro aus.* https://www.trendingtopics.eu/us-widerstand-rechenzentren-q2-2026/

Umweltbundesamt. (2025, 9. April). *CO_2-Emissionen pro Kilowattstunde Strom 2024 gesunken.* https://www.umweltbundesamt.de/themen/co2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom-2024

Anhang

Anhang A: Abkürzungen und Glossar der Kennzahlen

Die verwendeten Abkürzungen sind im Abkürzungsverzeichnis im Vorspann der Arbeit aufgeführt. Die Kennzahlen der Normenreihe DIN EN 50600-4 sind in Tabelle 3 erläutert.

Anhang B: Beruflicher Lebenslauf

Tabelle 15: Beruflicher Werdegang

Zeitraum	Tätigkeit
seit 2023	System Engineer, CND Computer + Network Division AG, Effretikon
seit 2022	Weiterbildung zum dipl. Informatiker HF, TEKO Schweizerische Fachschule
2022–2023	Sales Manager, Denli Gunstock Blanks
2017–2023	Montage-Elektriker, Etavis AG / Elektrolife AG
2017–2020	Ausbildung Montage-Elektriker EFZ, Berufsschule Bülach

Sprachen: Deutsch, Englisch, Türkisch (fliessend).

Anhang C: Protokolle der Zwischengespräche

Tabelle 16: Protokollvorlage Zwischengespräch

Feld	Inhalt
Datum, Ort	21.10.2026
Teilnehmende	Uta Enke
Besprochene Themen	Organisatorische massnahmen
Nächster Termin	Keine