Technologische Konzepte und Infrastruktur zur Stromversorgung moderner Rechenzentren

Whitepaper zur Entwicklung von KI-Hyperscalern, Netzengpässen, dezentralen Versorgungskonzepten und regionalen Marktstrategien

Redaktionsstand: 14. September 2026
Dokumenttyp: Fachbeitrag / Whitepaper
Zielgruppe: Betreiber und Entwickler von Rechenzentren, Netzbetreiber, Energieversorger, Investoren, Planer, Behörden und technologieorientierte Infrastrukturverantwortliche

> **Hinweis zur Evidenz:** Dieses Whitepaper trennt zwischen etablierten Technologien, industriell verfügbaren Lösungen, angekündigten Projekten und noch nicht kommerziell bewährten Konzepten. Bei regulatorischen Aussagen sind Geltungsbereich, Schwellenwerte und Übergangsfristen stets anhand der jeweils geltenden nationalen Fassung zu prüfen. Unternehmensangaben werden als Selbstdarstellung der jeweiligen Unternehmen kenntlich gemacht und nicht automatisch als unabhängiger Nachweis behandelt.

Kurzfassung

Die Stromversorgung moderner Rechenzentren entwickelt sich von einer klassischen Infrastrukturfrage zu einer strategischen Systemfrage der Elektrizitätswirtschaft. Der wesentliche Treiber ist nicht allein die Zahl zusätzlicher Server, sondern die Kombination aus künstlicher Intelligenz, beschleunigtem Hochleistungsrechnen und einer stark steigenden Leistungsdichte pro Rack. Während traditionelle Unternehmens- und Colocation-Rechenzentren häufig mit IT-Lasten von etwa 5 bis 10 kW pro Rack geplant wurden, liegen KI-Systeme je nach Beschleunigergeneration, Serverkonfiguration und Kühlkonzept bereits im Bereich von 40 bis 100 kW und darüber. Diese Werte sind Planungsbereiche, keine universellen technischen Grenzwerte. Entscheidend ist, dass die Lastentwicklung nicht linear verläuft: Einzelne Hallen oder Cluster können innerhalb weniger Jahre von konventioneller Serverdichte auf hochkonzentrierte GPU- und Beschleunigerlasten umgerüstet werden.

Die Internationale Energieagentur prognostizierte in ihrem Bericht *Energy and AI* einen Anstieg des weltweiten Stromverbrauchs von Rechenzentren von rund 415 TWh im Jahr 2024 auf etwa 945 TWh im Jahr 2030. Damit würde sich der Verbrauch mehr als verdoppeln und knapp 3 % des weltweiten Stromverbrauchs erreichen. Für die Stromsysteme ist nicht nur die globale Summe relevant, sondern die regionale Konzentration: Die Vereinigten Staaten, China und Europa vereinten 2024 den mit Abstand größten Anteil des Verbrauchs; in den USA und China wird ein besonders großer Teil des zusätzlichen Bedarfs erwartet. IEA: *Energy and AI*

Der Engpass verschiebt sich dadurch vom Rechenzentrumsgelände auf die vorgelagerte Energieinfrastruktur. Umspannwerke, Transformatoren, Hochspannungsleitungen, Schutz- und Schaltanlagen sowie Netzanschlüsse können nicht im gleichen Tempo erweitert werden wie Rechenzentrumskapazitäten, Chip-Lieferketten oder Gebäudestrukturen. In vielen Märkten ist daher nicht die technische Machbarkeit des Rechenzentrums der limitierende Faktor, sondern der Zeitpunkt, zu dem eine gesicherte, ausreichende und redundant erschlossene Netzleistung verfügbar wird.

Die daraus entstehende Lösungslandschaft besteht nicht aus einer einzelnen Ersatztechnologie. Realistisch ist eine gestufte Architektur:

- kurzfristig gesicherte Netzanschlüsse und klassisch redundante USV-/Notstromsysteme,

Copyright Gerald Friederici, 2026

- effizientere Stromverteilung und Flüssigkühlung für hohe Leistungsdichten,
- Batteriespeicher zur Überbrückung, Lastglättung und Erbringung von Netzdienstleistungen,
- Behind-the-Meter-Microgrids mit lokaler Erzeugung,
- Brennstoffzellen oder gasbasierte Erzeugung als Übergangs- oder Grundlastlösung,
- langfristige Strombezugsverträge mit erneuerbaren Erzeugern und bestehenden Kernkraftwerken,
- gegebenenfalls neue Kernkraftprojekte oder Small Modular Reactors, sofern Genehmigung, Brennstoff, Finanzierung, Lieferkette und Zeitplan tatsächlich belastbar sind.

Die wichtigste strategische Schlussfolgerung lautet: Ein Rechenzentrum wird künftig nicht mehr nur an einem Standort mit möglichst günstiger Energie gebaut. Es wird an einem Standort gebaut, an dem **firm capacity**, Netzpfade, Genehmigungsfähigkeit, Brennstoff- und Kühlwasserversorgung, Wärmeabnahme, Emissionsgrenzen und digitale Konnektivität gemeinsam tragfähig sind.

1. Strombedarf und voraussichtliche Entwicklung

1.1 Leistungsdichte und Skalierung: vom klassischen Rechenzentrum zum KI-Hyperscaler

Die Leistungsdichte eines Rechenzentrums beschreibt, wie viel elektrische Leistung auf einer bestimmten räumlichen oder funktionalen Einheit konzentriert wird. In der Praxis werden mehrere Ebenen unterschieden:

- IT-Leistung pro Rack,
- IT-Leistung pro Reihe oder Pod,
- IT-Leistung pro Serverraum beziehungsweise Data Hall,
- gesamte kritische IT-Last des Standorts,
- Gesamtanschlussleistung einschließlich Kühlung, Stromverteilung, Pumpen, Beleuchtung und sonstiger Infrastruktur.

Bei traditionellen Installationen dominierten CPU-basierte Systeme, Speicher und Netzwerkkomponenten mit vergleichsweise moderaten Lasten. Ein Rack mit 5 bis 10 kW war in vielen Umgebungen ein gängiger Planungsbereich. Das sagt allerdings wenig über die gesamte Anlage aus: Schon viele hundert solcher Racks können eine erhebliche Anschlussleistung erzeugen.

KI-Cluster verschieben das Verhältnis. Beschleunigerkarten, Hochgeschwindigkeitsnetzwerke, lokale Speicher und die zugehörige Kühltechnik werden in wenigen Racks konzentriert. Je nach Systemgeneration und Betriebsprofil können 40 bis 100 kW pro Rack oder mehr erreicht werden. Bei besonders dicht gepackten Trainingssystemen sind höhere Werte technisch möglich, allerdings nur unter geeigneten Stromverteilungs- und Kühlbedingungen. Ein derartiger Cluster ist nicht einfach ein konventionelles Rack mit mehr Servern, sondern ein anderes infrastrukturelles Designproblem.

Die höhere Dichte wirkt auf mindestens fünf Ebenen:

1. **Elektrische Verteilung:** Niederspannungsverteilungen, Busbars, PDUs, Kabelquerschnitte, Schutztechnik und Selektivität müssen auf höhere Ströme und steilere Laständerungen ausgelegt werden.
2. **Thermische Abfuhr:** Die Luftkühlung stößt in sehr dichten Zonen an physikalische und wirtschaftliche Grenzen. Direct-to-Chip-Liquid-Cooling, Rear-Door-Heat-Exchanger oder Immersion Cooling werden dadurch zu Planungsoptionen und in bestimmten Segmenten zu Voraussetzungen.
3. **Mechanische Infrastruktur:** Pumpen, Wärmetauscher, Kaltwassersätze, Trockenkühler und Rückkühlwerke müssen nicht nur die Dauerlast, sondern auch dynamische Laständerungen beherrschen.

Copyright Gerald Friederici, 2026

4. **Netzqualität:** Schnelle Leistungsänderungen können Spannungsänderungen, Oberschwingungen und einen erhöhten Bedarf an Blindleistungs- und Regelungsmanagement verursachen.
5. **Betriebsführung:** KI-Workloads sind zwar häufig dauerhaft aktiv, aber nicht zwingend konstant. Training, Checkpointing, Kommunikationsmuster und Cluster-Synchronisierung erzeugen Lastprofile, die von klassischer Grundlast abweichen können.

Die IEA beschreibt die Entwicklung der AI-Leistungsdichte als besonders schnell. In einer aktualisierten Analyse wurde darauf hingewiesen, dass die Leistungsaufnahme eines einzelnen fortgeschrittenen Server-Racks bis 2027 in eine Größenordnung gelangen kann, die dem Strombedarf vieler Haushalte entspricht. Solche Vergleiche sind anschaulich, ersetzen aber keine standortspezifische Lastrechnung. Entscheidend ist immer, ob die Zahl die durchschnittliche, die nominale oder die kurzzeitige Spitzenleistung meint. IEA: *Key Questions on Energy and AI*

1.2 Von der IT-Last zur Anschlussleistung

Für die Energieplanung ist zwischen IT-Last und Facility-Last zu unterscheiden. Die IT-Last umfasst Server, Speicher und Netzwerkgeräte. Die Gesamtlast des Rechenzentrums umfasst zusätzlich Kühlung, USV-Verluste, Transformatoren, Pumpen, Ventilatoren, Beleuchtung, Steuerung und weitere Hilfssysteme.

Ein gebräuchliches Maß ist die **Power Usage Effectiveness**:

$$PUE = \frac{\text{Gesamtenergie des Rechenzentrums}}{\text{Energie der IT-Ausrüstung}}$$

Ein PUE-Wert von 1,2 bedeutet vereinfacht, dass für 1,0 Einheit IT-Energie zusätzlich 0,2 Einheiten für die Infrastruktur anfallen. PUE ist jedoch kein universeller Effizienz- oder Nachhaltigkeitsindex. Er sagt nichts über den Strommix, die Auslastung der Server, den Wasserverbrauch, die Herstellungsenergie der Hardware oder die Nutzung der Abwärme aus. Ein sehr niedriger PUE-Wert bei schlecht ausgelasteten oder besonders energieintensiven Beschleunigern ist nicht automatisch die ökologisch oder wirtschaftlich beste Lösung.

Für die Auslegung muss die Anschlussleistung aus mehreren Zeit- und Betriebszuständen bestimmt werden:

- durchschnittliche IT-Last im Jahresmittel,
- normale Dauerlast,
- maximale geplante Last,
- kurzzeitige elektrische Spitzen,
- Lastsprünge und Rampen,
- Wiederanlauf- und Wiederherstellungszustände,
- Last der Kühlanlage bei Extremtemperaturen,
- Betriebszustände bei Ausfall eines Netzpfades oder einer Erzeugungseinheit.

Ein Hyperscale-Campus mit mehreren Hallen kann deshalb eine deutlich höhere Netzanschlussleistung benötigen, als die erste Serverausbaustufe vermuten lässt. Die Anschlusssicherung muss auf den Ausbaupfad und nicht nur auf die Erstbelegung ausgelegt werden. Gleichzeitig ist eine Überdimensionierung teuer, wenn Anschlussrechte, Transformatoren und Schaltanlagen Jahre vor der tatsächlichen Nutzung gebunden werden.

1.3 Prognosen zum Gesamtenergiebedarf

Die IEA schätzte den weltweiten Stromverbrauch von Rechenzentren 2024 auf rund 415 TWh und prognostiziert im Basisszenario ungefähr 945 TWh für 2030. Das entspricht mehr als einer Verdoppelung. Die IEA weist zugleich darauf hin, dass Rechenzentren 2030 knapp 3 % des weltweiten Stromverbrauchs ausmachen könnten. Die globale Prozentzahl wirkt zunächst moderat; für einzelne Strommärkte, Netzregionen oder Kommunen kann der Anteil jedoch sehr hoch sein. IEA: Executive Summary zu *Energy and AI*

Copyright Gerald Friederici, 2026

Die wichtigsten Unsicherheiten der Prognose sind:

- Wie schnell KI-Anwendungen von Trainings- zu Inferenzlasten übergehen,
- wie stark Modellgröße und Nutzungshäufigkeit wachsen,
- wie schnell Chips pro Rechenoperation energieeffizienter werden,
- wie stark Softwareoptimierung und Quantisierung die Nachfrage dämpfen,
- wie viele geplante Rechenzentren tatsächlich gebaut und ans Netz gebracht werden,
- ob Netzengpässe den Ausbau verzögern,
- ob Betreiber Workloads geografisch verlagern können,
- wie stark neue Anwendungen wie KI-Agenten und multimodale Systeme zusätzliche Nutzung erzeugen.

Die IEA geht davon aus, dass die USA und China zusammen einen sehr großen Anteil des weltweiten Wachstums bis 2030 tragen. Für die USA wurde gegenüber 2024 ein Zuwachs der Rechenzentrumsnachfrage um ungefähr 240 TWh ausgewiesen; die genaue regionale Verteilung hängt von Netzgebiet, Bundesstaat und Prognoseszenario ab. Europa wächst ebenfalls deutlich, startet aber von einem anderen Basispunkt und ist stärker durch Genehmigungs-, Flächen- und Netzrestriktionen geprägt.

Ein weiterer Befund ist für die Versorgungspolitik entscheidend: Ein erheblicher Teil der zusätzlichen Erzeugung muss nicht nur erneuerbar, sondern auch zeitlich passend, netztechnisch verfügbar und vertraglich belastbar sein. Ein Wind- oder Solarpark kann bilanziell viel Energie liefern, garantiert aber ohne Speicher, Überdimensionierung, Verbundnetz oder ergänzende Erzeugung nicht automatisch die Versorgung einer rund um die Uhr laufenden kritischen Last.

1.4 Lastprofile: kontinuierliche Grundlast und dynamische KI-Last

Rechenzentren werden traditionell als planbare Dauerlast betrachtet. Diese Sichtweise bleibt für viele Cloud- und Colocation-Lasten richtig, muss bei KI-Clustern aber ergänzt werden.

Es sind mindestens drei Profile zu unterscheiden:

Erstens: klassische kontinuierliche IT-Grundlast. Datenbanken, Virtualisierung, Unternehmensanwendungen, Speichersysteme und viele Cloud-Dienste laufen mit relativ geringer kurzfristiger Variabilität. Die Last ist planbar, aber nicht zwingend konstant.

Zweitens: KI-Trainingslast. Trainingsjobs können Cluster über längere Zeiträume mit hoher Leistung beanspruchen. Die Last kann durch Jobwechsel, Synchronisierung, Kommunikationsmuster und Wartungsfenster schwanken. Die Schwankungen erfolgen teilweise schneller als bei traditionellen Rechenzentrumsanwendungen.

Drittens: Inferenz- und Agentenlast. Diese ist stärker nutzungsabhängig. Einzelne Anfragen können kurzzeitig hohe Rechenleistung auslösen; die Gesamtlast hängt von Tageszeit, Region, Modell und Servicequalität ab.

Für die Energieversorgung folgt daraus eine Kombination aus hoher Verfügbarkeit und Flexibilität. Ein Rechenzentrum kann nicht einfach wie eine klassische Industrieanlage vom Netz getrennt werden, ohne die Servicequalität und gegebenenfalls die Integrität laufender Jobs zu gefährden. Es kann aber unter bestimmten Voraussetzungen Lasten zeitlich verschieben, Trainingsjobs regional verteilen, thermische Speicher nutzen oder nichtkritische Prozesse begrenzen.

Die IEA hat in ihrer jüngeren Analyse ausdrücklich auf schnelle und große Laständerungen bei KI-Rechenzentren hingewiesen. Das erhöht die Attraktivität von Batteriespeichern und gut geregelten Microgrids, ersetzt aber nicht die Dimensionierung der dauerhaften Versorgung. IEA: *Key Questions on Energy and AI*

Copyright Gerald Friederici, 2026

2. Engpasssituationen in den öffentlichen Übertragungs- und Verteilnetzen

2.1 Netzkapazität ist mehr als die Summe verfügbarer Megawatt

Ein Netzanschluss wird nicht allein dadurch möglich, dass in einem Land genügend Kraftwerksleistung existiert. Maßgeblich ist, ob am konkreten Netzverknüpfungspunkt ausreichende Übertragungs- und Verteilungskapazität vorhanden ist und ob die geplante Last in allen relevanten Netzsituationen sicher betrieben werden kann.

Typische Engpässe entstehen bei:

- Hoch- und Höchstspannungsleitungen,
- Umspannwerken und Transformatoren,
- Schaltfeldern und Sammelschienen,
- Schutz- und Leittechnik,
- Kurzschlussleistungs- und Fehlerstromgrenzen,
- Blindleistungsbereitstellung,
- thermischen Leitungsgrenzen,
- dynamischer Spannungs- und Frequenzstabilität,
- Genehmigung und Bau neuer Trassen,
- Verfügbarkeit großer Leistungstransformatoren.

Ein bestehendes Umspannwerk kann physisch in der Nähe des geplanten Rechenzentrums liegen und dennoch keine freie Anschlusskapazität bieten. Die bereits angeschlossenen Lasten können die thermischen oder dynamischen Grenzen auslasten. Zusätzlich muss geprüft werden, wie sich ein Ausfall eines Betriebsmittels nach dem jeweiligen Sicherheitskriterium auswirkt. In vielen Übertragungsnetzen ist die N-1-Sicherheit zentral: Das System soll den Ausfall eines wesentlichen Betriebsmittels ohne unzulässige Folgen verkraften. Für Rechenzentren kommt dann noch die interne Redundanz hinzu.

Besonders schwierig wird die Situation, wenn mehrere Rechenzentren in derselben Region gleichzeitig Anschlussanfragen stellen. Jeder Einzelanschluss kann technisch plausibel wirken; in Summe können die Anfragen jedoch die regionale Transformator-, Leitungs- oder Erzeugungskapazität übersteigen.

2.2 Netzanschluss-Warteschlangen als Standortfaktor

Die klassische Standortsuche beginnt häufig mit Grundstück, Glasfaser, Steuerrecht und Arbeitsmarkt. Bei KI-Hyperscalern rückt die bestätigte Netzleistung an die erste Stelle. Ein Standort ohne belastbaren Anschlusszeitplan ist kein vollständig entwickelter Standort, selbst wenn Land und Baugenehmigung verfügbar sind.

Netzanschluss-Warteschlangen entstehen, wenn mehr Projekte Anschlussrechte beantragen, als Netzbetreiber kurzfristig bearbeiten oder physisch ermöglichen können. Die Dauer hängt unter anderem ab von:

- Spannungsebene,
- benötigter Anschlussleistung,
- erforderlichen Netzverstärkungen,
- Studien zur Netzverträglichkeit,
- Genehmigungsdauer für Leitungen und Umspannwerke,
- Lieferzeit von Transformatoren und Schaltanlagen,
- Status konkurrierender Projekte,
- Finanzierungs- und Baufortschritt des Antragstellers,

Copyright Gerald Friederici, 2026

- Regelungen für Reihenfolge, Meilensteine und Rückgabe nicht realisierter Anschlussrechte.

Eine wichtige Folge ist die Entkopplung von Bau- und Stromzeitplan. Ein Gebäude kann in 18 bis 30 Monaten errichtet werden, während der dauerhafte Hochspannungsanschluss deutlich länger benötigt. Daraus entstehen Zwischenlösungen: gestufte Inbetriebnahme, vorübergehende Erzeugung hinter dem Zähler, Nutzung vorhandener Industrieanschlüsse, modulare Versorgung oder die Verlagerung von Lasten in andere Regionen.

Die Lösung darf allerdings nicht darin bestehen, Anschlussrechte rein spekulativ zu blockieren. Netzbetreiber benötigen klare Meilensteine, Nachweise und gegebenenfalls Regelungen zum Verfall nicht genutzter Reservierungen. Für Entwickler bedeutet dies, dass ein Netzanschlussvertrag, ein Netzverträglichkeitsgutachten und eine gesicherte Bau- und Lieferkette als zusammenhängendes Paket zu betrachten sind.

2.3 Netzstabilität, Spannungsqualität und Blindleistung

Hohe Rechenzentrumsleistungen stellen nicht nur eine Mengenfrage dar. Auch die Qualität der elektrischen Versorgung ist kritisch. Empfindliche IT-Systeme reagieren auf Spannungseinbrüche, Transienten, Frequenzabweichungen und Oberschwingungen. Moderne Netzteile und leistungselektronische Systeme können zwar hohe Wirkungsgrade erreichen, bringen aber eigene Anforderungen an Oberwellen, Leistungsfaktor und Regelung mit.

Relevante Themen sind:

- **Spannungseinbrüche:** Selbst sehr kurze Ereignisse können zu Umschaltungen oder IT-Störungen führen, wenn die USV-Architektur nicht korrekt koordiniert ist.
- **Frequenzabweichungen:** Sie sind im Verbundnetz selten lang anhaltend, müssen aber von Erzeugern, USV und Netzschutz beherrscht werden.
- **Blindleistung:** Transformatoren, Leitungen, Motoren, Kälteanlagen und leistungselektronische Wandler beeinflussen den Blindleistungshaushalt.
- **Oberschwingungen:** Viele gleichartige Netzteile und Umrichter können harmonische Verzerrungen verursachen.
- **Fehlerlichtbogen und Kurzschlussleistung:** Höhere Anschlussleistungen erhöhen die Anforderungen an Schaltanlagen, Schutzkoordination und Lichtbogenschutz.
- **Wiederanlauf:** Ein Rechenzentrum muss verhindern, dass nach einer Störung alle Lasten gleichzeitig und unkontrolliert wieder zugeschaltet werden.

Die interne Energiearchitektur sollte deshalb hierarchisch geregelt werden. Eine übergeordnete Energie- und Microgrid-Steuerung muss Erzeugung, Speicher, USV, Kühlung und IT-Lasten gemeinsam koordinieren. Reine Gebäudetechnik oder eine isolierte USV-Regelung reicht bei sehr großen AI-Campussen nicht mehr aus.

3. Energetische Rahmenbedingungen für Standort- und Infrastrukturausbau

3.1 Standortwahl: von der Immobilie zum Energiepark

Die Standortwahl moderner Rechenzentren wird zunehmend zu einer Kombination aus Netzplanung, Energieerzeugung, Kühlung und digitaler Konnektivität. Ein Standort kann in fünf Dimensionen bewertet werden:

1. **Elektrische Verfügbarkeit:** gesicherte Leistung, Spannungsebene, Ausbaupfad und Anschlusszeitpunkt.
2. **Redundanz:** unabhängige Netzpfade, Umspannwerke, Erzeuger, Brennstoffversorgung und Kommunikationswege.
3. **Klimatische und wasserbezogene Bedingungen:** Außentemperatur, Feuchte, Wasserverfügbarkeit, Kühlwasserrestriktionen und Risiken durch Hitze oder Dürre.

Copyright Gerald Friederici, 2026

4. **Erzeugungs- und Speicherpotenzial:** Nähe zu Wasserkraft, Wind, Solar, Geothermie, Gasinfrastruktur, Brennstoffzellen oder Batteriespeichern.
5. **Genehmigungs- und Akzeptanzfähigkeit:** Emissionen, Lärm, Abwärme, Flächenverbrauch, Natur- und Wasserrecht, Notstromtests und lokale Belastung.

Die Nähe zu einem Wind- oder Solarpark ist allein kein ausreichendes Kriterium. Ein Rechenzentrum benötigt eine Versorgung, die auch bei Dunkelflaute, Windflaute, Netzstörung oder außergewöhnlicher Kälte funktioniert. Ein sinnvoller Energiepark kombiniert daher mehrere Erzeugungs- und Speicherkomponenten oder verfügt über einen starken Verbundnetzanschluss.

Wasserkraftstandorte haben den Vorteil einer häufig planbareren Erzeugung und können in geeigneten Regionen mit niedrigen Außentemperaturen verbunden sein. Ihr Ausbau ist jedoch durch Topografie, Umweltrecht und begrenzte verfügbare Standorte limitiert. Wind- und Solarparks sind schneller skalierbar, benötigen aber Ausgleichsmechanismen für zeitliche Schwankungen.

3.2 Multifeed-Anbindungen und echte Unabhängigkeit

Eine robuste Stromversorgung benötigt mehr als zwei Kabel, die in derselben Trasse zum gleichen Umspannwerk führen. Echte Redundanz setzt möglichst unabhängige Pfade und gemeinsame Ausfallursachen voraus.

Zu prüfen sind:

- Einspeisung aus unterschiedlichen Umspannwerken,
- getrennte Leitungswege und Bauwerke,
- unabhängige Schutz- und Leitsysteme,
- unterschiedliche Transformatorbänke,
- gemeinsame Engpässe im vorgelagerten Netz,
- gemeinsame Brennstoff- oder Telekommunikationsabhängigkeiten,
- geografische Risiken wie Hochwasser, Waldbrand oder extreme Wetterlagen.

Die Begriffe N, N+1, 2N und 2N+1 beschreiben unterschiedliche Redundanzniveaus. N+1 bedeutet, dass eine zusätzliche Einheit den Ausfall einer Komponente kompensieren kann. 2N bedeutet, dass zwei vollständig unabhängige Systeme jeweils die gesamte kritische Last versorgen können. Für alle Ausfallarten gilt das nur, wenn die Systeme tatsächlich unabhängig sind und nicht durch eine gemeinsame Sammelschiene, ein gemeinsames Schutzsignal, eine gemeinsame Kraftstoffleitung oder einen gemeinsamen Bedienfehler wieder gekoppelt werden.

Ein Multifeed-Konzept sollte daher mit Fehlerfallmatrizen und gemeinsamen Ausfallursachen validiert werden. Die formale Anzahl der Einspeisungen ist weniger aussagekräftig als die Unabhängigkeit der Versorgungsketten.

3.3 Kühltechnologie und PUE

Die Kühlung ist nach der IT-Last der wichtigste Stellhebel für den elektrischen Gesamtbedarf. Bei niedriger Rackdichte kann Luftkühlung mit Kaltwassersätzen, Freikühlung oder adiabatischer Unterstützung wirtschaftlich und effizient sein. Mit steigender Leistungsdichte werden Flüssigkeitskreisläufe attraktiver.

Direct-to-Chip-Liquid-Cooling führt die Wärme über Kühlplatten direkt an CPU oder GPU ab. Die Wärmeübertragung ist effizienter als die ausschließliche Kühlung der Raumluft, allerdings entstehen zusätzliche Anforderungen an Flüssigkeitsqualität, Leckageüberwachung, Schnellkupplungen, Wartung und die Trennung von IT- und Gebäudekreisläufen.

Copyright Gerald Friederici, 2026

Rear-Door-Heat-Exchanger ersetzen oder ergänzen die Rückwand eines Racks und führen die heiße Abluft über einen Wärmetauscher ab. Das kann eine Zwischenstufe für hybride Umgebungen sein, in denen nicht alle Racks vollständig flüssigkeitsgekühlt werden.

Immersion Cooling taucht Serverkomponenten in eine elektrisch nichtleitende Flüssigkeit ein. Die Technologie kann hohe Dichten und gleichmäßige Wärmeabfuhr ermöglichen, ist aber mit Fragen zu Flüssigkeitsmanagement, Wartung, Komponentenfreigaben, Recycling und Lieferkette verbunden.

Kühltechnik kann die PUE verbessern, aber der Effekt hängt stark von Klima, Auslastung, Temperaturführung, Redundanz und Betriebsstrategie ab. Ein niedriger PUE-Wert wird nicht durch eine einzelne Technologie garantiert. Ebenso ist nicht jeder geringe PUE-Wert für jede Anwendung optimal, wenn dafür Wasserverbrauch, hohe Vorlauftemperaturen oder eingeschränkte Wartungsfähigkeit in Kauf genommen werden.

Die US-amerikanische Department of Energy weist auf hocheffiziente Exascale-Einrichtungen mit PUE-Werten von etwa 1,03 hin. Solche Werte sind Referenzpunkte für sehr optimierte Anlagen und nicht ohne Weiteres auf jedes kommerzielle Rechenzentrum übertragbar. U.S. Department of Energy: *Clean Energy Resources to Meet Data Center Electricity Demand*

Die wichtigste Auslegungsfrage lautet daher nicht „Welche Kühltechnik hat den niedrigsten nominellen PUE?“, sondern:

> Welche Kombination aus Kühlmedium, Temperaturbereich, Wasserverbrauch, Wartungsfähigkeit, Redundanz und Regelbarkeit ermöglicht die gewünschte IT-Leistung über den gesamten Lebenszyklus?

4. Technische Maßnahmen zur Sicherstellung des kontinuierlichen Betriebs

4.1 Unterbrechungsfreie Stromversorgung

Die USV überbrückt Störungen zwischen Netzversorgung und Ersatzstrom und schützt die IT gegen Spannungseinbrüche, Frequenzabweichungen und Umschaltvorgänge. Sie ist kein Ersatz für eine langfristige Energiequelle. Ihre Aufgabe ist die kontrollierte Überbrückung und Aufrechterhaltung der Stromqualität, bis Netz, Generator, Brennstoffzelle oder Microgrid wieder stabil verfügbar sind.

Statische USV

Statische USV-Systeme bestehen typischerweise aus Gleichrichter, Wechselrichter, Bypass, Energiespeicher und Steuerung. In kritischen Rechenzentren wird häufig eine Doppelwandlerarchitektur eingesetzt, bei der die IT dauerhaft über den Wechselrichter versorgt wird.

Lithium-Ionen-Akkumulatoren bieten hohe Energiedichte, geringeren Platzbedarf und gute Zyklenfähigkeit. Sie benötigen ein abgestimmtes Batterieüberwachungssystem, thermisches Management und geeignete Brandschutzkonzepte. Die Zellchemie, die Einhausung und die Auslegung der Brandabschnitte sind entscheidend; „Lithium-Ionen“ bezeichnet keine einheitliche Risikoklasse.

Blei-Säure-Systeme sind etabliert, gut verfügbar und in vielen Rechenzentren langjährig erprobt. Sie benötigen mehr Platz und weisen höhere Gewichte sowie andere Anforderungen an Temperaturführung und Wartung auf. Für große Anlagen sind beide Technologien verfügbar; die Wahl hängt von Raum, Lebenszyklus, Sicherheitskonzept, Temperatur und Ersatzteilstrategie ab.

Die USV-Dimensionierung sollte nicht nur anhand der Minutenangabe erfolgen. Wichtig sind auch:

- Überbrückungszeit bei voller und teilweiser Last,

- Verhalten bei Lastsprüngen,
- Batterielebensdauer bei Umgebungstemperatur,
- Wartung während des Betriebs,
- Selektivität und Kurzschlussverhalten,
- Schwarzstart- und Wiederanlaufkonzept,
- Integration mit BESS und Generatorsteuerung.

Dynamische beziehungsweise Schwungrad-USV

Schwungrad-USV speichern Energie mechanisch und können innerhalb sehr kurzer Zeit Leistung bereitstellen. Sie eignen sich besonders für kurze Überbrückungszeiten, häufige Zyklen und Systeme, in denen der Generator schnell anlaufen kann. Sie benötigen weniger klassische Batteriekapazität, ersetzen aber in der Regel keine Langzeitversorgung.

Die Entscheidung zwischen Batterie- und Schwungrad-USV ist daher eine Architekturentscheidung. Eine Schwungrad-USV kann in einem Campus mit schnell startenden Gas- oder Dieselgeneratoren attraktiv sein. Eine Batterie-USV ist vielseitiger, wenn zusätzlich längere Überbrückung, Peak Shaving oder Netzdienstleistungen vorgesehen sind.

4.2 Konventionelle Notstromaggregate

Dieselgeneratoren sind nach wie vor der etablierte Standard für langandauernde Notstromversorgung. Die Technologie ist verfügbar, leistungsfähig und mit bewährten Wartungs- und Ersatzteilstrukturen verbunden. Sie steht jedoch unter zunehmendem Druck durch Emissionsgrenzwerte, lokale Luftreinhalteanforderungen, Lärm, Kraftstofflagerung und Dekarbonisierungsziele.

Die Auslegung N+1 oder 2N hängt vom Verfügbarkeitsziel, der Risikobewertung und den Anforderungen des Betreibers ab. Zu berücksichtigen sind nicht nur Generatoren, sondern auch:

- Tagestanks und zentrale Tankanlagen,
- Kraftstoffqualität und Alterung,
- Pumpen und Förderstrecken,
- Abgasnachbehandlung,
- Kühlung der Aggregate,
- Synchronisierung und Lastteilung,
- regelmäßige Testläufe unter realistischer Last,
- Wiederbefüllung während länger dauernder Netzausfälle.

Erdgasaggregate können Emissionen gegenüber Diesel reduzieren und sind für längere Laufzeiten interessant. Sie sind jedoch von der Gasinfrastruktur abhängig. Bei großflächigen Ereignissen können Gasdruck, Priorisierung anderer Verbraucher oder Netzschäden die Verfügbarkeit beeinflussen. Ein gasbasiertes BTM-System ist daher nicht automatisch netzunabhängig.

HVO-Generatoren können bei dafür freigegebenen Motoren eine Alternative oder Ergänzung zu fossilem Diesel sein. Die Klimawirkung hängt stark von Herkunft, Zertifizierung, Rohstoffpfad und Lieferkette ab. HVO löst nicht automatisch lokale Emissions- und Lärmprobleme und ändert nichts an der Notwendigkeit, Treibstofflagerung und Nachversorgung zu planen.

Copyright Gerald Friederici, 2026

4.3 Hybride Energiespeicher und Peak Shaving

Großbatteriespeicher werden in Rechenzentren zunehmend als multifunktionale Infrastruktur betrachtet. Sie können:

- Lastspitzen glätten,
- die bezogene Anschlussleistung begrenzen,
- kurzfristige Netzunterbrechungen überbrücken,
- Generatorstarts entlasten,
- erneuerbare Einspeisung zeitlich verschieben,
- bei geeigneter Markt- und Regelungsfreigabe Netzdienstleistungen erbringen.

Für die Auslegung muss zwischen **Leistung** und **Energie** unterschieden werden. Ein Speicher mit hoher MW-Leistung, aber geringer MWh-Kapazität eignet sich für schnelle Überbrückung und Rampenbegrenzung. Ein Speicher mit mehreren Stunden Kapazität kann Lastverschiebung und erneuerbare Integration unterstützen, ist aber deutlich kapitalintensiver und benötigt mehr Fläche, Brandschutz und thermisches Management.

Ein BESS sollte nicht pauschal als Ersatz für Generatoren bezeichnet werden. Die Eignung hängt vom Störungsfall ab:

- Für Millisekunden bis Sekunden ist Leistungselektronik entscheidend.
- Für Minuten bis Stunden ist die verfügbare Batteriekapazität maßgeblich.
- Für mehrtägige Ausfälle werden Brennstoff, Erzeuger oder externe Versorgung benötigt.

Die wirtschaftliche Attraktivität steigt, wenn derselbe Speicher mehrere Aufgaben erfüllt. Gleichzeitig darf die Verfügbarkeit der kritischen Reserve nicht durch Marktoptimierung gefährdet werden. Dafür braucht es einen klaren Mindestladezustand, reservierte Leistung, Inselbetriebslogik und ein unabhängiges Schutzkonzept.

5. Dezentrale Energieerzeugung: Brennstoffzellen und Behind-the-Meter-Microgrids

5.1 Konzept und Architektur eines BTM-Microgrids

Ein Behind-the-Meter-Microgrid umfasst lokale Erzeuger, Speicher, Lasten, Schaltanlagen und eine übergeordnete Steuerung hinter dem Netzverknüpfungspunkt. Das Rechenzentrum bleibt mit dem öffentlichen Netz verbunden, kann sich aber bei Störungen oder Engpässen kontrolliert abtrennen und im Inselbetrieb weiterarbeiten.

Eine typische Architektur kann enthalten:

- zwei oder mehr Netzanschlüsse,
- Mittel- oder Hochspannungsverteilung,
- Solar- und gegebenenfalls Windanlagen,
- gasbasierte Generatoren oder Brennstoffzellen,
- BESS,
- USV-Anlagen für die schnellste Überbrückung,
- Wärmerückgewinnung und gegebenenfalls Kraft-Wärme-Kopplung,
- Microgrid-Controller,
- Schutz-, Synchronisierungs- und Inselnetzerkennung,
- Energie- und Lastmanagementsysteme.

Copyright Gerald Friederici, 2026

Der Ausdruck „netzunabhängig“ ist sorgfältig zu verwenden. Ein BTM-Microgrid kann die Abhängigkeit vom öffentlichen Netz reduzieren, bleibt aber möglicherweise von Erdgas, Wasserstoff, Brennstofflieferungen, Ersatzteilen, Kühlwasser oder Telekommunikation abhängig. Vollständige Autarkie ist für große KI-Campusse in der Regel weder technisch noch wirtschaftlich das Normalmodell.

Der Microgrid-Controller muss mindestens vier Betriebsarten beherrschen:

1. Netzparallelbetrieb,
2. Netzstützung und Peak Shaving,
3. kontrollierte Inselbildung,
4. Wiederzuschaltung und Resynchronisierung.

Zusätzlich muss er wissen, welche Lasten kritisch, verschiebbar oder abschaltbar sind. Ein Rechenzentrum kann beispielsweise Schulungs-, Entwicklungs- oder Batch-Workloads anders behandeln als transaktionskritische Dienste. Die IT-Orchestrierung muss dafür mit der Energie- und Kühlungssteuerung gekoppelt werden, ohne die Sicherheitsgrenzen der Anwendungen zu verletzen.

5.2 Brennstoffzellen im Rechenzentrum

Brennstoffzellen erzeugen Strom elektrochemisch und können bei geeigneter Auslegung eine hohe Verfügbarkeit und geringe lokale Emissionen erreichen. Für Rechenzentren sind insbesondere SOFC und PEMFC relevant, allerdings mit unterschiedlichen technischen Eigenschaften.

SOFC: Festoxid-Brennstoffzellen

SOFC-Systeme arbeiten bei hohen Temperaturen. Dadurch können sie Erdgas oder andere kohlenstoffhaltige Energieträger über Reformierungsprozesse nutzen und erreichen bei kontinuierlichem Betrieb einen hohen elektrischen Wirkungsgrad. Die hohe Betriebstemperatur unterstützt außerdem die Nutzung von Prozesswärme.

Ihre Stärken liegen in:

- kontinuierlicher Grundlastversorgung,
- hoher Leistungsdichte gegenüber manchen konventionellen Lösungen,
- potenziell guter Kraft-Wärme-Kopplung,
- geringer lokaler Schadstoffemission bei sauberer Betriebsführung.

Herausforderungen sind:

- längere Aufheiz- und Abkühlzeiten,
- Materialalterung und thermische Zyklen,
- komplexe Brennstoffaufbereitung,
- Wartung und Stack-Lebensdauer,
- Erdgas- beziehungsweise Wasserstoffversorgung,
- höhere Investitionskosten gegenüber etablierten Notstromaggregaten.

SOFC ist deshalb eher eine Grundlast- oder Dauererzeugungstechnologie als ein alleiniger Ersatz für die schnellste Notstromstufe.

Copyright Gerald Friederici, 2026

PEM-Brennstoffzellen

PEM-Brennstoffzellen reagieren schneller und eignen sich besser für dynamische Lasten, Spitzenabdeckung oder Notstromanwendungen. Sie benötigen typischerweise hochreinen Wasserstoff und ein ausgefeiltes Wasser-, Luft- und Temperaturmanagement.

Ihre Stärken liegen in:

- schneller Reaktion,
- guter Eignung für variable Lasten,
- emissionsfreiem Betrieb am Standort bei reinem Wasserstoff,
- modularer Skalierbarkeit.

Herausforderungen sind:

- Verfügbarkeit und Preis von Wasserstoff,
- Speicherung großer Wasserstoffmengen,
- Transport und Betankungslogistik,
- Reinheitsanforderungen,
- Lebensdauer und Austausch von Membran- beziehungsweise Stackkomponenten,
- zusätzlicher Platz- und Sicherheitsbedarf.

5.3 Erdgas, Wasserstoff und die Frage der tatsächlichen Klimawirkung

Ein Erdgas-Brennstoffzellensystem ist nicht emissionsfrei. Bei interner oder externer Reformierung entsteht weiterhin Kohlendioxid; die Emissionsintensität hängt von Gaszusammensetzung, Methanleckagen, Wirkungsgrad und Betriebsweise ab. Der Vorteil gegenüber konventioneller Verbrennung kann in höherem Wirkungsgrad und niedrigeren lokalen Schadstoffemissionen liegen, darf aber nicht mit Null-Emission gleichgesetzt werden.

Reiner Wasserstoff kann am Standort ohne direkte CO2-Emission genutzt werden. Die Klimawirkung hängt jedoch davon ab, wie der Wasserstoff erzeugt, transportiert und gespeichert wird. „Grüner Wasserstoff“ ist kein automatisch verfügbarer Energieträger; für einen großen Rechenzentrumscampus wären erhebliche Elektrolyse-, Speicher- oder Lieferkettenkapazitäten erforderlich.

Die realistische Rolle von Brennstoffzellen wird daher regional unterschiedlich sein:

- als kontinuierliche BTM-Grundlast in Regionen mit verlässlicher Gas- oder Wasserstoffinfrastruktur,
- als Ergänzung zu Batteriespeichern und erneuerbaren Erzeugern,
- als emissionsärmere Übergangstechnologie,
- als Notstrom- oder Spitzenlastlösung in speziellen Anwendungen.

Eine rein technische Betrachtung reicht nicht. Brennstoffkosten, Brennstoffverfügbarkeit bei regionalen Krisen, Genehmigungen, Wartung, Stack-Ersatz, Wärmeabnahme und Nachhaltigkeitsnachweis müssen gemeinsam bewertet werden.

6. Potenziale der Kernkraft zur Sicherstellung der Grundlastversorgung

6.1 Bestehende Kernkraftwerke und direkte Strombezugsmodelle

Die unmittelbar realistischere nukleare Option für Rechenzentren ist in vielen Märkten nicht der Neubau eines Reaktors, sondern der Bezug aus einem bereits bestehenden Kernkraftwerk. Ein langfristiger Strombezugsvertrag

kann die Erzeugung wirtschaftlich absichern, ohne dass der Rechenzentrumsbetreiber Eigentümer oder Betreiber der nuklearen Anlage wird.

Dabei ist zwischen drei Modellen zu unterscheiden:

PPA oder Contracted Supply: Der Rechenzentrumsbetreiber verpflichtet sich, Strom aus einem bestehenden Kraftwerk zu beziehen. Physikalisch bleibt die Lieferung in das Verbundnetz eingebunden, auch wenn der Vertrag die Versorgung bilanziell oder wirtschaftlich zuordnet.

Co-Location: Rechenzentrum und Erzeugungsanlage liegen am selben Standort oder in unmittelbarer Nähe. Es kann eine direkte elektrische Verbindung bestehen, die rechtlich und netztechnisch dennoch sorgfältig geregelt werden muss.

Behind-the-Meter- oder Inselarchitektur: Die kritische Last wird hinter einem gemeinsamen Netzverknüpfungspunkt versorgt und kann sich vom öffentlichen Netz trennen. Das stellt besonders hohe Anforderungen an Schutz, Betrieb, Haftung, Genehmigung und Sicherheitsorganisation.

Ein PPA macht das Rechenzentrum nicht automatisch physisch unabhängig vom Netz. Umgekehrt ist eine physische Co-Location nicht automatisch redundant: Fällt das Kraftwerk aus, muss eine zweite Versorgungsebene vorhanden sein.

6.2 Small Modular Reactors

Small Modular Reactors sind kompaktere, standardisierte Reaktorkonzepte, die in Modulen gefertigt und schrittweise installiert werden sollen. In der internationalen Begriffsverwendung werden Reaktoren bis etwa 300 MWe pro Einheit häufig als SMR bezeichnet; kleinere Systeme werden teilweise als Mikroreaktoren eingeordnet.

Die für Rechenzentren relevanten Versprechen lauten:

- kontinuierliche, planbare Leistung,
- hoher Kapazitätsfaktor bei entsprechendem Betriebsdesign,
- modulare Erweiterung,
- geringere Einzelblockgröße als bei klassischen Großreaktoren,
- potenzielle Standortnähe zu industriellen Lasten,
- geringere Abhängigkeit von wetterabhängiger Einspeisung.

Diese Vorteile sind jedoch Zielgrößen und keine automatisch eintretenden Eigenschaften. Die Wirtschaftlichkeit hängt von Serienfertigung, Genehmigungsprozess, Brennstoff, Finanzierung, Versicherbarkeit, Bauzeit und Lieferkette ab.

SMRs können bei hoher Verfügbarkeit eine Grundlastquelle sein. Sie sind aber keine kurzfristige Antwort auf einen Rechenzentrumsbedarf, der innerhalb von zwei oder drei Jahren ans Netz gehen soll. Selbst bei beschleunigten Verfahren müssen Standort, Sicherheitsnachweis, Lizenzierung, Bau, Netzanschluss, Brennstoff und Inbetriebnahme zusammenpassen.

6.3 Beispiele für reale beziehungsweise angekündigte nukleare Rechenzentrumsprojekte

Microsoft und das Kernkraftwerk Three Mile Island / Crane Clean Energy Center

Microsoft und Constellation kündigten 2024 eine Vereinbarung an, die auf die Wiederinbetriebnahme von Unit 1 des früheren Kernkraftwerks Three Mile Island in Pennsylvania zielt. Die öffentlich genannte Leistung liegt bei rund 837 MW; der Strom soll langfristig Rechenzentren von Microsoft versorgen. Das Projekt ist ein prominentes Beispiel

für einen direkten Bezug zu einem bestehenden Großkraftwerk und nicht für einen bereits kommerziell betriebenen SMR.

Wichtig ist die Einordnung: Eine Ankündigung, ein PPA oder eine geplante Wiederinbetriebnahme ist nicht dasselbe wie verfügbare, geprüfte und dauerhaft gelieferte Rechenzentrumsleistung. Zeitplan, Genehmigung, technische Wiederherstellung und wirtschaftliche Umsetzung müssen separat bewertet werden. Constellation: Ankündigung zur Wiederinbetriebnahme von Unit 1

Amazon Web Services und der Cumulus Campus in Pennsylvania

Amazon Web Services schloss eine Vereinbarung im Umfeld des von Talen Energy entwickelten Cumulus-Campus in Pennsylvania. Öffentlich kommuniziert wurde ein Ausbaupotenzial von bis zu etwa 960 MW für den nuklear versorgten Rechenzentrumscampus; die tatsächlich zu unterschiedlichen Zeitpunkten verfügbare Anfangskapazität und der Endausbau sind getrennt zu betrachten.

Das Beispiel zeigt die Attraktivität der Co-Location an einer bestehenden Großkraftwerksinfrastruktur. Es zeigt aber auch die regulatorische und netztechnische Komplexität: Eine direkte oder nahe elektrische Verbindung zu einem Kraftwerk berührt Netzregeln, Anschlussbedingungen, Marktrollen, Zuverlässigkeitsanforderungen und die Frage, wie Reserveversorgung bei Kraftwerksausfall organisiert wird. Amazon: Informationen zum nuklear versorgten Data-Center-Campus

SMR-Vereinbarungen von Google, Amazon und anderen Unternehmen

Google kündigte mit Kairos Power eine langfristige Zusammenarbeit für fortgeschrittene Reaktortechnologie an; in der öffentlichen Kommunikation wurde ein Zielumfang von bis zu 500 MW genannt. Solche Vereinbarungen sind für die Marktentwicklung wichtig, stellen aber keine heute verfügbare Standardversorgung dar. Nach öffentlich zugänglichen Branchenangaben sind die für Hyperscaler relevanten SMR-Projekte überwiegend Entwicklungs-, Genehmigungs- oder Bauvorhaben. Ihre Zeitpläne und Kosten sind daher mit deutlich größerer Unsicherheit behaftet als bestehende Wind-, Solar-, Gas-, Wasser- oder Kernkraftwerke.

6.4 Technische und operative Herausforderungen

Bau- und Genehmigungszeit: Rechenzentren werden häufig in modularen Phasen errichtet. Kernkraftwerke benötigen dagegen umfangreiche Sicherheitsnachweise, Genehmigungen und qualifizierte Lieferketten. Das erzeugt ein strukturelles Zeitrisiko.

Kühlwasser: Auch Kernkraftwerke benötigen eine robuste Wärmeabfuhr. Je nach Reaktordesign, Kühlkonzept und Standort können Wasserbedarf, thermische Einleitung, Trocken- oder Hybridkühlung wesentliche Standortfaktoren sein.

Sicherheitsarchitektur: Rechenzentrum und Kernanlage dürfen nicht wie zwei beliebige Industriebauten behandelt werden. Physische Trennung, Schutzbereiche, Cybersecurity, Notfallplanung und Verantwortungsgrenzen müssen klar geregelt sein.

Betriebsprofil: Kernkraft ist stark für kontinuierliche Grundlast, aber nicht automatisch für schnelle, große Laständerungen optimiert. Batteriespeicher, Netzbezug oder zusätzliche flexible Erzeuger können erforderlich sein, um KI-Rampen und Wartungszustände zu beherrschen.

Abfall und Brennstoff: Brennstoffversorgung, Abfallmanagement und regulatorische Verantwortlichkeiten bleiben zentrale Fragen. Neue Reaktorkonzepte können diese Themen verändern, aber nicht abschaffen.

Versicherbarkeit und Finanzierung: Für neuartige Reaktoren fehlen teilweise langjährige Betriebserfahrungen. Das erschwert die Kalkulation von Risiko, Versicherung, Rückstellungen und Finanzierung.

Copyright Gerald Friederici, 2026

7. Regionale Markt- und Infrastrukturanalysen

7.1 Vereinigte Staaten

Marktstruktur und Engpasslage

Die USA sind der wichtigste Einzelmarkt für Rechenzentrumskapazität und voraussichtlich der größte absolute Treiber des zusätzlichen Strombedarfs bis 2030. Die IEA erwartet, dass Rechenzentren dort nahezu die Hälfte des Stromnachfragewachstums bis 2030 ausmachen könnten. Gleichzeitig konzentriert sich ein erheblicher Teil der US-Kapazität auf wenige regionale Cluster.

Northern Virginia, häufig als „Data Center Alley“ bezeichnet, ist das prominenteste Beispiel. Die Region verfügt über außergewöhnliche Glasfaser- und Cloud-Konnektivität, eine dichte Betreiberlandschaft und eine etablierte Zulieferkette. Gerade diese Konzentration erzeugt jedoch Konflikte um Netzkapazität, Leitungsbau, Umspannwerke, Flächen, Wasser, Lärm und lokale Akzeptanz.

Die US-Situation ist föderal und netzgebietsspezifisch. PJM, ERCOT, MISO, SPP, CAISO und andere Markt- und Netzräume haben unterschiedliche Anschlussverfahren, Erzeugungsmixe, Preisstrukturen und Engpässe. Aussagen über „die US-Netzlage“ müssen deshalb immer regionalisiert werden.

Typische Lösungsansätze

Die USA kombinieren mehrere Pfade:

- Ausbau von Übertragungs- und Verteilnetzen,
- langfristige PPAs mit Wind- und Solarparks,
- Bezug aus bestehenden Kernkraftwerken,
- Reaktivierung oder Weiterbetrieb bestehender Erzeugungsstandorte,
- Onsite-Gaserzeugung als Übergang oder Ergänzung,
- Batteriespeicher und Microgrids,
- Investitionen in neue Kernkraft und SMR-Pilotprojekte,
- Lastmanagement und regionale Workload-Verteilung.

Onsite-Gaslösungen können den Zeitraum bis zum Netzanschluss verkürzen, sind aber kein kostenloser Bypass. Sie benötigen Brennstoff, Emissionsgenehmigungen, Abgasnachbehandlung, Lärmschutz, Wartung und eine belastbare Versorgung auch bei regionalen Krisen. Die IEA weist darauf hin, dass eine zuverlässige Vor-Ort-Gasversorgung für kritische und variable Rechenzentrumslasten eine Überdimensionierung der lokalen Erzeugung gegenüber der reinen Last erfordern kann. IEA: *Key Questions on Energy and AI*

Nuklearbeispiele

Die Vereinbarung zwischen Microsoft und Constellation zur geplanten Wiederinbetriebnahme von Unit 1 bei Three Mile Island ist ein Beispiel für einen großen Direct-to-Nuclear-Strombezug. Der Cumulus-Campus in Pennsylvania steht für das Co-Location-Modell mit einer bestehenden Kernkraftanlage. Beide Fälle zeigen, dass der US-Markt Kernkraft nicht nur als langfristige politische Option, sondern als konkrete Infrastrukturkomponente für Hyperscale-Standorte betrachtet. Beide Beispiele sind allerdings hinsichtlich Inbetriebnahme, Genehmigung und tatsächlicher dauerhaft verfügbarer Leistung differenziert zu bewerten.

SMR-Unternehmen wie NuScale, Oklo und Kairos Power erhalten hohe Aufmerksamkeit und teils bedeutende Unternehmens- und Investorenunterstützung. Daraus folgt jedoch nicht, dass SMRs bereits eine breit verfügbare, standardisierte Stromquelle für US-Rechenzentren darstellen. Für die Standortplanung sollten sie bis zum

Copyright Gerald Friederici, 2026

Nachweis von Lizenz, Baubeginn, Finanzierung, Brennstoff und Lieferkette als Zukunftsoption und nicht als gesicherte kurzfristige Kapazität behandelt werden.

7.2 Europa und die EU-Mitgliedstaaten

FLAP-D und die Verlagerung des Wachstums

Frankfurt, London, Amsterdam, Paris und Dublin bilden gemeinsam den häufig als FLAP-D bezeichneten Kernmarkt der europäischen Rechenzentrumsinfrastruktur. Die Standorte sind wegen Internetknoten, Finanzwirtschaft, Cloud-Nähe und Unternehmensnachfrage attraktiv. Gleichzeitig treffen dort hohe Rechenzentrumsdichte, begrenzte Flächen, konkurrierende Stromnachfrage und restriktive Genehmigungsbedingungen zusammen.

Eine Analyse von Ember beschreibt die zunehmende Bedeutung von Netzengpässen in diesen Märkten. Für die betrachteten Stadt- beziehungsweise Netzregionen werden sehr hohe Anteile der lokalen Stromnachfrage durch Rechenzentren ausgewiesen; die Größenordnung variiert nach Abgrenzung, Jahr und Methodik. In der Analyse liegen die Anteile für Amsterdam, London und Frankfurt in der Größenordnung von etwa einem Drittel bis über 40 %, für Dublin deutlich höher. Diese Werte dürfen nicht als Anteil am nationalen Stromverbrauch interpretiert werden. Ember: *Grids for data centres: ambitious grid planning can win Europe's AI race*

In Dublin führten Netzbelastung und politische Diskussionen zu restriktiven Bedingungen für neue Großverbraucher. Amsterdam hat seit Jahren eine besonders sichtbare Debatte um Flächen, Energie und Nachhaltigkeit. Frankfurt ist durch seine Finanz- und Netzkonzentration attraktiv, aber bei neuen großen Anschlussleistungen zunehmend auf regionale Ausweichstandorte angewiesen.

Rechtliche und regulatorische Rahmenbedingungen

Die EU-Energieeffizienzrichtlinie (EU) 2023/1791 sieht für große Rechenzentren unter anderem Berichtspflichten und die Erfassung von Nachhaltigkeitsindikatoren vor. In der Richtlinie wird ein Schwellenwert von mehr als 500 kW installierter IT-Leistung beziehungsweise entsprechender Gesamtleistung im Kontext der Berichterstattung verwendet; die nationale Umsetzung und genaue Anwendung sind zu prüfen. Richtlinie (EU) 2023/1791

Deutschland hat mit dem Energieeffizienzgesetz Anforderungen an Rechenzentren geschaffen, die unter anderem Energieeffizienz, Berichterstattung, erneuerbaren Strom und die Nutzung von Abwärme betreffen. Die konkreten Pflichten hängen von Größe, Inbetriebnahmezeitpunkt, technischer Konstellation und Übergangsregelungen ab. Die verbreitete Verkürzung auf „ein einzelnes gesetzliches PUE-Limit" ist daher fachlich zu grob. Bei einer konkreten Planung ist die aktuelle Fassung des Gesetzes einschließlich einschlägiger Verordnungen und Verwaltungspraxis heranzuziehen. Energieeffizienzgesetz, Bundesrecht

Für europäische Projekte ist daher eine integrierte Compliance-Prüfung notwendig:

- Strom- und Netzanschlussrecht,
- Energieeffizienz und Messkonzept,
- erneuerbare Strombeschaffung,
- Abwärmenutzung,
- Wasserrecht und Kühlmittel,
- Emissions- und Notstromgenehmigungen,
- Bau- und Raumordnungsrecht,
- Datenschutz und digitale Souveränität,
- lokale Anforderungen an Lärm, Flächen und Infrastrukturbeiträge.

Copyright Gerald Friederici, 2026

Ausweichstrategie: Nordeuropa und sekundäre Märkte

Nordeuropäische Standorte profitieren häufig von kühlerem Klima, verfügbarer Wasserkraft, Windenergie, größerer Flächenverfügbarkeit und einer höheren Akzeptanz für großflächige Industrieinfrastruktur. Freikühlung kann den Kältebedarf reduzieren; sie beseitigt aber nicht alle Anforderungen an Feuchteführung, Redundanz, Filterung und Extremwetter.

Prominente Beispiele sind große Rechenzentrumsstandorte in Schweden und Finnland, darunter Meta in Luleå und Google in Hamina. Sie stehen für die Kombination aus kühlem Klima, erneuerbarem beziehungsweise kohlenstoffarmem Strom und alternativen Kühlkonzepten. Die konkreten technischen Daten und Ausbauzustände einzelner Campus sollten anhand der jeweils aktuellen Betreiberinformationen geprüft werden; Unternehmensdarstellungen sind nicht automatisch unabhängige Effizienz- oder Verfügbarkeitsnachweise.

Zunehmend relevant ist auch die Nutzung von Abwärme. Dafür muss jedoch eine ausreichende und zeitlich passende Wärmenachfrage vorhanden sein. Ein Rechenzentrum kann nicht allein durch das Vorhandensein eines Fernwärmenetzes eine wirtschaftliche Abwärmelösung garantieren. Temperaturhub, Wärmepumpen, saisonale Speicherung, Netzkapazität und Vertragsmodell entscheiden über die tatsächliche Nutzbarkeit.

7.3 Großbritannien

Sonderstellung und Konzentration im Südosten

Großbritannien ist außerhalb der EU, bleibt aber eng mit europäischen Digital- und Kapitalmärkten verbunden. London und der Korridor Richtung Slough haben eine hohe Konzentration an Konnektivität, Finanzdienstleistungen, Cloud-Nachfrage und Colocation. Der Südosten steht dadurch unter erheblichem Druck bei Netzkapazität, Flächen und Genehmigungen.

Die britische Netzanschlussreform verfolgt das Ziel, nicht realisierungsreife Projekte aus Warteschlangen zu entfernen und netzrelevante Vorhaben besser zu priorisieren. Für Entwickler bedeutet das, dass ein früher Netzanschlussantrag allein nicht ausreicht. Projektreife, Lieferfähigkeit, Planung und belastbare Nachfrage werden wichtiger.

Technologische Optionen

Der britische Lösungsraum umfasst:

- stärkere Nutzung vorhandener Netzanschlüsse,
- Batteriespeicher für Flexibilität und Peak Shaving,
- gasbasierte BTM-Erzeugung als Übergang,
- PPAs mit Offshore-Wind,
- mögliche direkte oder hybride Anbindungen an erneuerbare Erzeugungscluster,
- neue Kernkraft und SMR-Programme, darunter Rolls-Royce SMR als britische Entwicklungsinitiative.

Ein Offshore-Wind-Direct-Link kann bilanziell und physisch Vorteile bieten, ist aber kein einfacher Ersatz für ein starkes Verbundnetz. Offshore-Wind schwankt, Seekabel und Konverterstationen haben eigene Ausfall- und Wartungsrisiken, und das Rechenzentrum benötigt auch bei Windflaute eine belastbare Versorgung.

Rolls-Royce SMR ist ein wichtiges britisches Industrieprojekt, aber zum Redaktionsstand dieses Whitepapers nicht mit einer breit ausgerollten kommerziellen Rechenzentrumsflotte gleichzusetzen. Die Entscheidung für ein britisches Rechenzentrum sollte kurzfristig auf real verfügbare Netz- oder Erzeugungskapazität gestützt werden; SMR-Potenziale sind als mittel- bis langfristige Option zu bewerten.

Copyright Gerald Friederici, 2026

7.4 China

Staatlich geplante Verlagerung: Eastern Data, Western Computing

China verfolgt mit der Strategie „Eastern Data, Western Computing“ einen staatlich koordinierten Ansatz, bei dem datenintensive Rechenprozesse stärker in westliche und nördliche Regionen mit größeren Flächen- und Energiepotenzialen verlagert werden sollen. Die östlichen Metropolregionen bleiben wichtig für latenzkritische und geschäftsnahe Anwendungen; große Trainings- und Batch-Lasten können dagegen in weiter entfernte Computing-Hubs verlagert werden.

Das Modell unterscheidet sich von vielen westlichen Märkten durch die stärkere Koordination von:

- Rechenzentrumsplanung,
- regionaler Energieerzeugung,
- Hochspannungsübertragung,
- Industrie- und Flächenpolitik,
- Cloud- und Supercomputing-Infrastruktur.

In den westlichen Regionen werden große Solar- und Windkapazitäten sowie neue Übertragungsleitungen ausgebaut. Ultra-Hochspannungs-Gleichstromübertragung, häufig als UHVDC bezeichnet, ist ein wichtiges Instrument, um große Erzeugungszentren mit Verbrauchsschwerpunkten zu verbinden. Für Rechenzentren ist dieser Ausbau relevant, weil er den geografischen Abstand zwischen Computing-Last und Erzeugung technisch überbrücken kann.

Grundlast und Energieträgermix

Die Verlagerung in Regionen mit viel erneuerbarer Energie bedeutet nicht, dass die Versorgung ausschließlich erneuerbar erfolgt. Kohle- und Kernkraftwerke bleiben in vielen chinesischen Provinzen Bestandteil der planbaren Stromversorgung. Der konkrete Energiemix, die CO2-Intensität und die Netzqualität unterscheiden sich nach Provinz und Netzgebiet.

Ein chinesischer Computing-Hub kann daher zugleich:

- von großen Solar- und Windparks profitieren,
- durch UHVDC mit entfernten Erzeugern verbunden sein,
- auf lokale thermische oder nukleare Erzeugung zurückgreifen,
- in ein staatlich geplantes Industrie- und Netzregime eingebunden sein.

Die Vorteile liegen in Skalierung und Koordination. Risiken bestehen in hoher regionaler Konzentration, möglicher Überkapazität, Wasserverfügbarkeit in trockenen Regionen, Abhängigkeit von großen Übertragungsprojekten und politisch oder administrativ festgelegten Standortprioritäten.

Konsequenzen für internationale Betreiber

Internationale Betreiber müssen in China zusätzlich zu Netz- und Energiethemen Fragen zu Datenregulierung, Cybersicherheit, lokaler Genehmigung, Eigentumsstrukturen und Ausfuhrkontrollen berücksichtigen. Die technische Entscheidung für einen westlichen Standort kann energetisch attraktiv sein, aber die Latenz zu Nutzern an der Ostküste, die regulatorische Einordnung der Workloads und die Verfügbarkeit internationaler Hardware können die Wirtschaftlichkeit begrenzen.

Copyright Gerald Friederici, 2026

7.5 Südkorea

Konzentration im Großraum Seoul

Südkorea verfügt über eine hohe digitale Nachfrage und eine starke Konzentration von Unternehmen, Netzen und Nutzern im Großraum Seoul. Diese Konzentration erhöht den Wert niedriger Latenz, verschärft aber Flächen-, Netz- und Genehmigungsrestriktionen. Die Ansiedlung großer neuer Rechenzentren außerhalb der Hauptstadtregion wird daher politisch und planerisch zunehmend unterstützt.

Die Aussage, Betreiber würden pauschal durch eine einzige nationale Regelung aus Seoul herausgedrängt, wäre zu undifferenziert. In der Praxis wirken mehrere Instrumente zusammen: Netzanschlussbedingungen, Raumordnung, lokale Genehmigung, Energiepolitik, Netzengpässe und politische Steuerung. Für jedes Projekt sind die konkreten kommunalen und netzseitigen Anforderungen zu prüfen.

Kernkraft und Brennstoffzellen

Südkorea verfügt über eine bedeutende Kernkraftindustrie und langjährige industrielle Erfahrung mit stationären Brennstoffzellen. Das schafft günstige Voraussetzungen für Diskussionen über firm power, Wasserstoff und dezentrale Versorgung. Daraus folgt jedoch nicht automatisch eine breite, standardisierte kommerzielle Nutzung von SOFC- oder PEM-Systemen speziell in hyperskaligen Rechenzentren.

Die Brennstoffzellenindustrie ist in Südkorea im stationären Energiesektor sichtbar. Für Rechenzentren müssen aber zusätzliche Nachweise erbracht werden:

- Verhalten bei schnellen Laständerungen,
- Verfügbarkeit und Austauschintervalle,
- Wasserstoff- oder Gaslogistik,
- Inselbetriebsfähigkeit,
- Zusammenspiel mit USV und BESS,
- Wirtschaftlichkeit gegenüber Netz und Generatoren,
- langfristige Wartungs- und Ersatzteilverträge.

Südkorea ist deshalb ein interessanter Markt für Pilotierung und industrielle Skalierung, aber Aussagen über eine bereits flächendeckende Brennstoffzellenversorgung von Rechenzentren sollten mit belastbaren Projekt- und Betriebsdaten belegt werden.

8. Vergleich der Versorgungstechnologien

Die folgende Übersicht ist keine Rangliste. Sie zeigt, welche Rolle die jeweiligen Technologien in einer Gesamtarchitektur typischerweise übernehmen können.

Copyright Gerald Friederici, 2026

Technologie	Typische Rolle	Stärken	Wesentliche Grenzen
Öffentlicher Netzanschluss	Primärversorgung	Skalierbar, in Märkten mit starkem Netz kosteneffizient	Anschlusswarteschlangen, regionale Engpässe, Abhängigkeit vom Netz
Multifeed-Netzanschluss	Primärversorgung mit Redundanz	Hohe Verfügbarkeit bei unabhängigen Pfaden	Teuer, nicht automatisch unabhängig bei gemeinsamer Ursache
Lithium-Ionen-USV	Kurzzeitüberbrückung, Power Quality, teilweise Peak Shaving	Hohe Leistungsdichte, schnelle Reaktion, gute Zyklenfähigkeit	Brandschutz, Alterung, begrenzte Dauer der Vollversorgung
Blei-Säure-USV	Bewährte Kurzzeitüberbrückung	Etablierte Technik, breite Betriebserfahrung	Platz, Gewicht, Wartung, Temperaturabhängigkeit
Schwungrad-USV	Sehr schnelle Überbrückung	Hohe Zyklenfestigkeit, geringe Batterieabhängigkeit	Kurze Energiespeicherung, benötigt schnelle Folgeerzeugung
Dieselgenerator	Langzeit-Notstrom	Reife Technik, hohe Energiedichte des Kraftstoffs	Emissionen, Lärm, Kraftstofflagerung, Genehmigung
Erdgasgenerator	BTM-Erzeugung, Übergang, teilweise Grundlast	Kontinuierliche Brennstoffzufuhr möglich, geringere lokale Emissionen als Diesel	Gasnetzabhängigkeit, Emissionen, Genehmigung
HVO-Generator	Flüssiger Notstrom mit potenziell reduzierter Klimawirkung	Nutzung bestehender Motorentechnik bei Freigabe	Brennstoffverfügbarkeit, Nachhaltigkeitsnachweis, weiterhin Verbrennung
BESS	Peak Shaving, Überbrückung, Netzdienste	Multifunktional, schnell regelbar	Energieinhalt, Degradation, Brandschutz, Reservekonflikte
PV und Wind	Energie- und CO2-Reduktion	Schnell skalierbar, niedrige Grenzkosten	Wetterabhängigkeit, Fläche, Netz- und Speicherbedarf
SOFC	Kontinuierliche BTM-Grundlast	Hoher Wirkungsgrad möglich, gute Wärmeintegration	Langsamer, hohe Temperatur, Brennstoffreformierung, CAPEX
PEM-Brennstoffzelle	Dynamische Last, Notstrom, Spitzen	Schnelle Reaktion, lokal emissionsfrei mit H2	Wasserstoffkosten, Speicher und Logistik
Bestehende Kernkraft	Firm Power über PPA oder Co-Location	Hohe Verfügbarkeit, niedrige direkte CO2-Emissionen	Restlaufzeit, Vertrags- und Netzstruktur, Genehmigung
SMR/Mikroreaktor	Langfristige firm power	Modularität, potenziell standortnah	Noch begrenzte kommerzielle Betriebserfahrung, Lizenzierung, Bauzeit

Copyright Gerald Friederici, 2026

9. Architekturprinzipien für die Praxis

9.1 Versorgung nicht in Einzeltechnologien, sondern in Schichten planen

Ein robustes Rechenzentrum sollte Energieversorgung als Schichtenmodell planen:

Schicht 1: öffentliche oder private Primärversorgung. Sie liefert die Dauerenergie und den überwiegenden Jahresbedarf.

Schicht 2: BTM-Erzeugung. Sie reduziert Abhängigkeit vom Netz, unterstützt Peak Shaving und kann im Inselbetrieb übernehmen.

Schicht 3: Batteriespeicher und USV. Sie reagieren in Millisekunden bis Minuten, glätten Lastsprünge und überbrücken die Startzeit anderer Erzeuger.

Schicht 4: langfristige Brennstoffreserve. Sie stellt Versorgung über Stunden oder Tage sicher, sofern das Netz nicht verfügbar ist.

Schicht 5: IT- und Workload-Flexibilität. Sie verhindert, dass jede Last zu jedem Zeitpunkt mit maximaler Leistung versorgt werden muss.

Diese Schichten müssen zusammen getestet werden. Ein Generator, der auf dem Papier N+1 ausweist, ist keine ausreichende Redundanz, wenn der Startbefehl von einem gemeinsamen Steuerungssystem abhängt, die Brennstoffpumpe nicht redundant ist oder die Kühlung der Generatoren bei Extremtemperatur ausfällt.

9.2 Anschlussstrategie in drei Zeithorizonten

Kurzfristig:

- Anschlussfähigkeit und Netzverträglichkeitsstudie sichern,
- modulare Ausbauphasen planen,
- USV und Ersatzstrom auf realistische Lastprofile auslegen,
- BESS für Rampen und Spitzen integrieren,
- Brennstoff- und Emissionsgenehmigungen früh einleiten.

Mittelfristig:

- zusätzliche Netzpfade und Umspannwerke erschließen,
- langfristige PPAs mit Erzeugern abschließen,
- Microgrid-Controller und Lastmanagement produktiv einsetzen,
- Abwärme und gegebenenfalls Wärmenetze integrieren,
- wasserarme Kühlung und höhere Temperaturbereiche prüfen.

Langfristig:

- direkte Einbindung bestehender Kern- oder Wasserkraftstandorte bewerten,
- Brennstoffzellen mit gesicherter Brennstoffversorgung einsetzen,
- SMR-Projekte nur nach belastbarer Lizenz-, Bau- und Lieferkettenprüfung einbeziehen,
- regionale Workload-Verteilung als Teil der Energiearchitektur behandeln.

Copyright Gerald Friederici, 2026

9.3 Bewertungsmodell für Standorte

Ein einfacher Standortvergleich sollte nicht mit Strompreis oder PUE beginnen, sondern mit der Frage, ob die geplante Leistung zum gewünschten Datum tatsächlich verfügbar ist. Sinnvolle Bewertungskategorien sind:

Kategorie	Leitfrage
Zeit	Wann steht die erste und wann die volle Leistung zur Verfügung?
Netz	Wie viele unabhängige Pfade und welche Spannungsebene sind verfügbar?
Skalierung	Kann die Leistung in 50-, 100- oder 200-MW-Stufen erweitert werden?
Flexibilität	Welche Lasten können zeitlich oder geografisch verschoben werden?
Erzeugung	Welche firm power ist bei Wetter- und Netzstörungen vorhanden?
Kühlung	Wie werden Wärme, Wasser und Extremtemperaturen beherrscht?
Genehmigung	Welche Fristen gelten für Bau, Emissionen, Wasser und Erzeugung?
Nachhaltigkeit	Wie werden Strommix, Abwärme, Wasser und Brennstoffe nachgewiesen?
Risiko	Welche gemeinsamen Ausfallursachen verbleiben trotz Redundanz?
Wirtschaft	Wie entwickeln sich CAPEX, OPEX, Brennstoff- und Anschlusskosten?

10. Schlussfolgerungen

Die Energieversorgung moderner Rechenzentren wird zum bestimmenden Faktor der digitalen Infrastruktur. Die Expansion der KI vergrößert nicht nur den Jahresverbrauch, sondern verändert die elektrische Topologie: höhere Rackdichten, schnellere Laständerungen, größere Hallenleistungen, aufwendigere Kühlung und ein wachsender Bedarf an gesicherter, regional verfügbarer Leistung.

Die wichtigsten Schlussfolgerungen lauten:

1. **Netzanschluss ist ein kritischer Liefergegenstand.** Ein Grundstück und eine Baugenehmigung reichen nicht aus. Entscheidend ist die nachweisbare, terminierte und erweiterbare Anschlussleistung.
2. **Leistungsdichte bestimmt die gesamte Infrastruktur.** Elektrik, Kühlung, Gebäude, Brandschutz, Wartung und Kosten verändern sich mit dem Übergang von 5–10-kW-Racks zu KI-Racks mit 40–100 kW und mehr.
3. **PUE ist wichtig, aber nicht ausreichend.** Wasser, Strommix, Auslastung, Abwärme und Resilienz gehören in dieselbe Bewertung.
4. **BESS und Microgrids werden zu Kernkomponenten.** Sie helfen bei Spitzen, Lastsprüngen und Netzstörungen, ersetzen aber nicht automatisch die langfristige Energieversorgung.
5. **Brennstoffzellen sind anwendungsabhängig.** SOFC eignet sich eher für kontinuierliche Grundlast, PEM für schnelle und dynamische Anwendungen. Beide benötigen eine realistische Brennstoff- und Wartungsstrategie.
6. **Bestehende Kernkraftwerke sind kurzfristig plausibler als neue SMRs.** Direct-PPA- und Co-Location-Modelle können große Leistungen erschließen, bleiben aber von Genehmigung, Netzstruktur, Kraftwerksverfügbarkeit und Reservekonzept abhängig.
7. **SMRs sind eine langfristige Option, keine pauschale Abkürzung.** Ihre technische Attraktivität darf nicht mit kommerzieller Verfügbarkeit verwechselt werden.

Copyright Gerald Friederici, 2026

8. **Regionale Strategien unterscheiden sich grundlegend.** Die USA setzen stark auf eine Mischung aus Netzausbau, Gas, Kernkraft, PPAs und Pilotprojekten. Europa reagiert stärker mit Effizienz-, Abwärme-, Transparenz- und Standortverlagerungsregeln. China plant Energie, UHVDC und Computing stärker als staatliches Gesamtsystem. Südkorea versucht, die Konzentration im Großraum Seoul durch regionale Ansiedlung und verschiedene Versorgungstechnologien zu entzerren.
9. **Die beste Lösung ist fast immer hybrid.** Ein robustes AI-Rechenzentrum kombiniert Netz, Multifeed, USV, Speicher, lokale Erzeugung, Kühloptimierung und gegebenenfalls langfristige firm-power-Verträge.
10. **Die Versorgung muss als Lebenszyklus geplant werden.** Die Frage ist nicht nur, wie ein Campus ans Netz kommt, sondern wie er über 15 bis 25 Jahre erweitert, gewartet, dekarbonisiert und an neue Chip- und Kühltechnologien angepasst werden kann.

Quellen und weiterführende Dokumente

Die folgenden Quellen bilden die zentrale Grundlage der quantitativen und regulatorischen Einordnung dieses Whitepapers:

1. **International Energy Agency (IEA):** *Energy and AI* – globale und regionale Prognosen zum Stromverbrauch von Rechenzentren, Verhältnis zu Stromnachfrage und Erzeugungsoptionen.
   https://www.iea.org/reports/energy-and-ai
2. **International Energy Agency (IEA):** *Key Questions on Energy and AI* – aktualisierte Einordnung von Nachfrage, Leistungsdichte, Onsite-Erzeugung und Netzengpässen.
   https://www.iea.org/reports/key-questions-on-energy-and-ai
3. **International Energy Agency (IEA):** *Global data centre electricity consumption, by equipment, Base Case, 2020–2030*.
   https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-data-centre-electricity-consumption-by-equipment-base-case-2020-2030
4. **U.S. Department of Energy:** *Clean Energy Resources to Meet Data Center Electricity Demand*.
   https://www.energy.gov/oe/clean-energy-resources-meet-data-center-electricity-demand
5. **Ember:** *Grids for data centres: ambitious grid planning can win Europe's AI race*.
   https://ember-energy.org/app/uploads/2025/06/Report-Grids-for-data-centres-in-Europe-PDF.pdf
6. **Europäische Union:** Richtlinie (EU) 2023/1791 zur Energieeffizienz.
   https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/1791/oj?locale=de
7. **Bundesrepublik Deutschland:** Energieeffizienzgesetz.
   https://www.gesetze-im-internet.de/enefg_2023/
8. **Constellation Energy:** Ankündigung zur geplanten Wiederinbetriebnahme von Three Mile Island Unit 1 und Vereinbarung mit Microsoft.
   https://www.constellationenergy.com/news/2024/constellation-and-microsoft-announce-historic-agreement-to-restart-three-mile-island-unit-1.html
9. **Amazon:** Informationen zum nuklear versorgten Data-Center-Campus in Pennsylvania.
   https://www.aboutamazon.com/news/aws/aws-nuclear-powered-data-center-campus

Copyright Gerald Friederici, 2026

Methodische Schlussbemerkung

Einige in der Ausgangsgliederung genannten Beispiele und Technologiebehauptungen wurden bewusst qualifiziert. Insbesondere gilt:

- Die genannten Rack-Leistungsbereiche sind typische Planungsgrößen, keine universellen Standards.
- „Direktanschluss“ und „PPA“ sind technisch und rechtlich unterschiedliche Modelle.
- SMR-Projekte sind überwiegend angekündigt, in Entwicklung oder in Genehmigung und nicht mit einer heute breit verfügbaren Versorgungstechnologie gleichzusetzen.
- Die Rolle südkoreanischer Brennstoffzellen im Rechenzentrumssektor ist interessant, aber die Behauptung einer bereits flächendeckenden hyperskaligen Kommerzialisierung sollte nur mit standortbezogenen Betriebsdaten verwendet werden.
- Regionale Angaben zu Netzanteilen und Anschlusszeiten hängen stark von der räumlichen Abgrenzung, dem Berichtsjahr und der Definition von Rechenzentrumsleistung ab.
- Unternehmensangaben zu angekündigten Anlagen wurden nicht als unabhängige Leistungs- oder Verfügbarkeitsnachweise interpretiert.

Copyright Gerald Friederici, 2026