

# **KI braucht Infrastruktur: Energie als Engpass der digitalen Transformation**

Eine systemische Analyse von Strombedarf, Versorgungsqualität und Standortfaktoren im globalen KI-Wettbewerb

Dirk Gildemeister, Christof von Branconi

5. Juni 2026

# Inhaltverzeichnis

Executive Summary .....	3
1. Einleitung .....	4
2. Marktentwicklung, Schlüsselakteure und geopolitische Dynamik der KI .....	5
2.1 Globale Perspektive.....	5
2.2 Deutschland und Europa .....	5
2.3 Schlüsselakteure .....	6
2.4 Differenzierungen .....	7
Zwischenfazit.....	7
3. Energieversorgung als kritischer Engpass moderner Rechenzentren.....	7
3.1 Herausforderungen durch volatile Energien .....	8
3.2 Lösungsansätze und deren Grenzen .....	8
Zwischenfazit.....	10
4. Die Ökonomie von KI-Rechenzentren: Von LCOE zu TCO und Time-to-Power .....	11
4.1. Einordnung: Warum klassische Stromkostenperspektiven nicht ausreichen .....	11
4.2. Die zentralen Kostenblöcke von KI-Rechenzentren .....	11
4.3. Standortentscheidungen als multidimensionale Optimierung .....	13
4.4. Der ökonomische Wert gesicherter Leistung.....	14
4.5. Implikationen für Energie- und Standortpolitik.....	14
5. Vergleich globaler Strategien: USA vs. Europa/Deutschland.....	14
5.1 USA: Kernenergie als KI-Powerhouse .....	14
5.2 Europa/Deutschland: Engpässe durch Energiewende .....	17
5.3 Solarversorgung: Masdar City (VAE) vs. Deutschland .....	18
5.4 Rolle planbarer und gesicherter Leistung.....	18
Zwischenfazit.....	18
6. Diskussion und strategische Implikationen .....	19
6.1 Risiken für Deutschland .....	20
6.2 Grenzen der Studie.....	21
7. Prioritäre Maßnahmen.....	21
8. Schlussfolgerung (Zusammenfassung) .....	22
Literaturverzeichnis .....	22
Anhang A: Entwicklung des Strombedarfs und Standortvergleich .....	24
Anhang B: Stromgestehungskosten (LCOE) und Systemkosten .....	27
Anhang C: Simulation eines vollständig erneuerbaren Energiesystems .....	31
Anhang D: 24/7 Erneuerbare – Fallbeispiel Masdar .....	34
Anhang E: Einordnung der Energieanforderungen für KI-Infrastruktur.....	37

## Executive Summary

Künstliche Intelligenz (KI) treibt den Bedarf an Rechenleistung und damit an Energieinfrastruktur in bislang unbekanntem Ausmaß. Für die Standortattraktivität von KI-Rechenzentren ist dabei sowohl der Strompreis entscheidend, als auch die Fähigkeit, Leistung verlässlich, schnell und wirtschaftlich bereitzustellen. Maßgeblich sind insbesondere gesicherte Leistung, Time-to-Power, Ausfallsicherheit sowie infrastrukturelle Faktoren wie Kühlung und Flächenverfügbarkeit.

Mit steigenden Anteilen erneuerbarer Energien wachsen die Anforderungen an Netze, Speicher und Systemintegration. KI-Lasten sind zudem nicht homogen: Während Trainingsprozesse teilweise flexibel sind, erfordern Inferenz und produktiver Betrieb eine kontinuierliche, hochverfügbare Versorgung.

Für Betreiber verschiebt sich damit die ökonomische Perspektive von einer reinen Stromkostenbetrachtung (Levelized Cost of Electricity, LCOE) hin zu einer Total-Cost-of-Infrastructure- bzw. Time-to-Power-Logik. Standortentscheidungen folgen einer multidimensionalen Optimierung aus Anschlussgeschwindigkeit, Verfügbarkeit, Resilienz und infrastrukturellen Rahmenbedingungen.

Im internationalen Vergleich zeigt sich, dass erfolgreiche KI-Standorte nicht durch einzelne Erzeugungstechnologien gekennzeichnet sind, sondern durch die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems. Die USA profitieren von schneller verfügbarer Anschlussleistung, hoher Systemflexibilität und einer stärkeren Integration von gesicherter Leistung. Europa und insbesondere Deutschland stehen hingegen vor Herausforderungen bei Netzanschlüssen, Genehmigungsdauern und der Systemintegration.

Daraus ergeben sich vier prioritäre Handlungsfelder:

- (1) Beschleunigung von Netzanschlüssen für strategische Rechenzentren,
- (2) Verkürzung von Time-to-Power durch schnellere Genehmigungs- und Planungsprozesse,
- (3) Ermöglichung 24/7-fähiger Strombeschaffung durch geeignete Markt- und Vertragsmodelle,
- (4) integrierte Standortentwicklung unter Einbeziehung von Netz, Flächen, Kühlung und Abwärmenutzung.

Für Deutschland liegt die zentrale Herausforderung weniger in der Verfügbarkeit von Energie insgesamt als in der Fähigkeit, diese als verlässliche, zeitgerecht verfügbare Infrastruktur bereitzustellen. Effizienzgewinne bei Hardware und Software können den Energiebedarf dämpfen, lösen die infrastrukturellen Anforderungen jedoch nicht auf.

**Kernbotschaft: Der Engpass im KI-Zeitalter ist nicht Rechenleistung, sondern die Energie, sie zuverlässig zu betreiben.**

# 1. Einleitung

Künstliche Intelligenz (KI) hat sich zu einer zentralen Triebkraft der globalen Wirtschaftsentwicklung entwickelt. Rechenzentren bilden dabei die physische Infrastruktur, auf der KI-Anwendungen, Cloud-Dienste und datenintensive digitale Prozesse überhaupt erst möglich werden. Mit dem rasanten Wachstum dieser Anwendungen verschiebt sich der Engpass der digitalen Transformation zunehmend von Software und Daten hin zur Energieversorgung und zur verfügbaren Infrastruktur.

Moderne KI-Rechenzentren erfordern eine stabile, planbare und nahezu unterbrechungsfreie Stromversorgung. Damit rücken Faktoren wie gesicherte Leistung, Netzinfrastruktur, Kühlung und Standortqualität in den Mittelpunkt wirtschaftlicher und industriepolitischer Entscheidungen. Gleichzeitig befindet sich das Energiesystem in einem tiefgreifenden Wandel. Der Ausbau erneuerbarer Energien ist ein zentraler Bestandteil der Dekarbonisierungsstrategie, führt jedoch aufgrund der Volatilität von Wind- und Solarenergie zu wachsenden Anforderungen an Systemintegration, Speicher, Netzstabilität und Reservekapazitäten. Für KI-Rechenzentren ist das besonders relevant, weil ihre Lastprofile nur begrenzt flexibilisierbar sind und dauerhaft hohe Verfügbarkeit verlangen.

Im internationalen Vergleich zeigen sich daher unterschiedliche Strategien. Während Unternehmen in den USA zunehmend auf langfristig verfügbare, planbare Energiequellen setzen, ist der Umbau des Energiesystems in Europa und insbesondere in Deutschland mit zusätzlichen strukturellen Anpassungen verbunden. Diese betreffen Kosten und auch Versorgungssicherheit, Genehmigungsgeschwindigkeit und die Fähigkeit, digitale Infrastruktur in ausreichendem Maß bereitzustellen.

Die zentrale Forschungsfrage dieser Studie lautet: Inwiefern beeinflusst der Übergang zu einem stärker auf volatilen erneuerbaren Energien basierenden Energiesystem die Standortattraktivität Europas und Deutschlands für KI-gestützte Recheninfrastrukturen?

Zur Beantwortung dieser Frage werden die energetischen Anforderungen von KI-Rechenzentren systematisch analysiert, internationale Strategien verglichen und Implikationen für eine resiliente Energie- und Standortpolitik abgeleitet. Die Untersuchung stützt sich auf aktuelle Markt- und Technologiedaten, Energieverbrauchsprofile von KI-Systemen sowie dokumentierte Fallbeispiele aus den USA und Europa. Quantitative Analysen zu Stromkosten und Systemanforderungen ergänzen die qualitative Bewertung energie- und industriepolitischer Entwicklungen. Die Zahlen dienen der Einordnung von Größenordnungen und sind als indikative Vergleichswerte zu verstehen.

## 2. Marktentwicklung, Schlüsselakteure und geopolitische Dynamik der KI

Künstliche Intelligenz hat sich zu einer systemischen Basistechnologie entwickelt, deren wirtschaftliches Potenzial eng mit physischer Infrastruktur wie Rechenzentren, Halbleitern und Energieversorgung verknüpft ist. Marktbeobachter erwarten ein Wachstum des globalen KI-Marktes von jährlich rund 26–30%, wobei insbesondere der Infrastrukturanteil – bestehend aus Chips, Rechenzentren und Netzkapazitäten – stark an Bedeutung gewinnt und langfristig ein Volumen in der Größenordnung von bis zu einer Billion US-Dollar erreichen kann.

Der Wettbewerb verschiebt sich von Anwendungen hin zu integrierten Infrastruktur-Ökosystemen.

### 2.1 Globale Perspektive

International dominieren vor allem die USA und China die Entwicklung, wobei beide unterschiedliche, aber hochgradig skalierte Modelle verfolgen.

In den USA basiert die Dynamik auf einer vertikalen Integration entlang der gesamten Wertschöpfungskette: Unternehmen wie NVIDIA im Bereich Hardware sowie Microsoft, Google und Amazon als Hyperscaler kontrollieren zentrale Elemente von Cloud-Infrastruktur und KI-Modellen. Diese enge Verzahnung ermöglicht eine schnelle Skalierung und hohe Innovationsgeschwindigkeit.

China verfolgt demgegenüber einen stärker staatlich geprägten Ansatz mit umfangreichen Investitionen in digitale Infrastruktur, die sich auf mehr als 50 Milliarden US-Dollar belaufen. Ziel ist der Aufbau einer eigenständigen technologischen Basis, die sowohl wirtschaftliche als auch geopolitische Unabhängigkeit unterstützt.

Europa zeigt ebenfalls ein dynamisches Wachstum, bleibt jedoch strukturell fragmentiert. Für das Jahr 2025 wird ein Marktvolumen von rund 65 bis 90 Milliarden US-Dollar erwartet, mit einem potenziellen Anstieg auf 300 bis 550 Milliarden US-Dollar bis 2032. Trotz dieser positiven Entwicklung besteht weiterhin eine erhebliche Abhängigkeit von außereuropäischen Cloud- und Infrastrukturanbietern.

### 2.2 Deutschland und Europa

Vor diesem Hintergrund haben Deutschland und die Europäische Union in den letzten Jahren strategische Initiativen zum Ausbau digitaler Infrastruktur gestartet.

In Deutschland wurde im März 2026 eine umfassende Rechenzentrumsstrategie verabschiedet. Ziel ist es, die digitale Souveränität zu stärken und die wachsende Nachfrage durch KI, Cloud-Anwendungen und High-Performance-Computing zu adressieren. Die Strategie umfasst 28 Maßnahmen in den Bereichen Energie, Standortentwicklung sowie Technologie und Governance.

Kernziele sind eine deutliche Ausweitung der Kapazitäten bis 2030. Die IT-Anschlussleistung von Rechenzentren soll gegenüber dem Stand von 2025 mindestens verdoppelt, während Kapazitäten für KI und High-Performance-Computing vervierfacht werden sollen. Deutschland positioniert sich damit mit über 2.000 Rechenzentren als einer der zentralen Standorte in Europa.

Die Maßnahmen adressieren insbesondere drei Handlungsfelder: Erstens die Energieversorgung, einschließlich beschleunigter Netzanschlüsse, Integration erneuerbarer Energien sowie Effizienzsteigerungen und Nutzung von Abwärme. Zweitens die Standortentwicklung durch schnellere Genehmigungsverfahren und die Aktivierung geeigneter Flächen. Drittens die technologische Souveränität, etwa durch den Ausbau von Hochleistungsrechnern, sichere Cloud-Infrastrukturen und die Förderung europäischer KI-Initiativen.

Auf europäischer Ebene verfolgt die EU mit ihrer Daten- und Digitalstrategie den Aufbau eines integrierten Binnenmarkts für Daten. Zielsetzungen umfassen unter anderem eine Cloud-Nutzung von 75% der Unternehmen bis 2030, den Aufbau von bis zu 10.000 Edge-Knoten sowie eine deutliche Erhöhung der Rechenzentrumskapazitäten. Initiativen wie EuroHPC Joint Undertaking zielen darüber hinaus auf den Aufbau leistungsfähiger KI-Infrastrukturen, einschließlich sogenannter AI-Gigafactories.

Deutschland weist dabei eine vergleichsweise starke Verknüpfung von KI mit industriellen Anwendungen auf. Das Marktvolumen liegt aktuell bei etwa 9 bis 12 Milliarden US-Dollar (2025), bei Wachstumsraten von rund 24–26%. Gleichzeitig nutzen bereits rund 41% der Unternehmen KI-Technologien. Der Energiebedarf von Rechenzentren beträgt derzeit etwa 21,3 TWh und dürfte mit dem weiteren Ausbau – insbesondere durch KI-Anwendungen – deutlich steigen.

Trotz dieser positiven Entwicklung bestehen strukturelle Risiken, insbesondere durch Abhängigkeiten von externer Infrastruktur sowie durch steigende Anforderungen an die Energieversorgung.

## 2.3 Schlüsselakteure

Die globale KI-Landschaft wird maßgeblich von wenigen zentralen Akteuren geprägt. In den USA dominieren Unternehmen wie Microsoft und Google, während in China Anbieter wie Alibaba Group eine zentrale Rolle spielen. In Europa entstehen mit Unternehmen wie Aleph Alpha und DeepL erste spezialisierte Anbieter, die insbesondere auf industrielle und sprachbasierte Anwendungen fokussiert sind.

Die zunehmende Konzentration auf wenige große Akteure unterstreicht eine zentrale Entwicklung: Der Wettbewerb verschiebt sich von einzelnen Anwendungen hin zu integrierten Ökosystemen, in denen Infrastruktur, Energieversorgung und Skalierungsfähigkeit entscheidend sind.

## 2.4 Differenzierungen

Die Strategien der USA, Europas und Chinas unterscheiden sich grundlegend in ihrer Ausgestaltung.

Die USA verfolgen einen stark marktorientierten Ansatz, der durch hohe private Investitionen und vergleichsweise geringe regulatorische Hürden geprägt ist. Dies ermöglicht eine schnelle Skalierung, insbesondere im Bereich großer KI-Rechenzentren und zugehöriger Energieinfrastrukturen.

Europa und Deutschland setzen demgegenüber stärker auf regulatorische Rahmenbedingungen, Nachhaltigkeitsziele und technologische Souveränität. Dieser Ansatz zielt auf eine Balance zwischen Wachstum, Versorgungssicherheit und Klimazielen, führt jedoch teilweise zu längeren Umsetzungszeiten und höheren Kosten.

China kombiniert staatliche Steuerung mit strategischen Industrieprogrammen und verfolgt einen langfristig angelegten Ausbau digitaler Infrastruktur, einschließlich innovativer Konzepte wie orbitaler Rechenzentren.

Global ist eine deutliche Skalierung der Kapazitäten zu beobachten. Prognosen gehen von einer Verdopplung der Rechenzentrumskapazitäten bis 2030 aus. Gleichzeitig rückt die Energieversorgung zunehmend in den Mittelpunkt der Standortentscheidung.

Die US-Strategie ist aggressiver und privat getrieben, was zu schnellerem Wachstum führt, während EU/Deutschland auf Balance von Wachstum und Regulierung setzt. Global wächst der Sektor durch AI mit 14% CAGR, getrieben von Hyperscalern.

### Zwischenfazit

Die Analyse zeigt, dass sich der Wettbewerb im KI-Sektor zunehmend entlang infrastruktureller Faktoren entscheidet. Neben Rechenleistung und Datenverfügbarkeit gewinnt insbesondere die Energieversorgung an Bedeutung.

Energie entwickelt sich damit zu einem zentralen Standortfaktor, der maßgeblich beeinflusst, wo zukünftige KI-Infrastrukturen aufgebaut und betrieben werden können.

## 3. Energieversorgung als kritischer Engpass moderner Rechenzentren

Der Betrieb moderner KI-Rechenzentren erfordert eine durchgehend stabile, planbare und hochverfügbare Stromversorgung. Bereits geringfügige Unterbrechungen oder Schwankungen können erhebliche wirtschaftliche Schäden verursachen, da sowohl das Training als auch der Betrieb großer KI-Modelle auf kontinuierliche Rechenleistung angewiesen sind.

KI-Infrastruktur umfasst unterschiedliche Lasttypen mit teils stark variierenden Anforderungen. Während Trainingsprozesse in gewissem Umfang zeitlich gebündelt werden können, erfordern Inferenzanwendungen häufig geringe Latenzen und eine hohe Verfügbarkeit; klassische Cloud-Workloads weisen darüber hinaus zusätzliche Flexibilisierungspotenziale auf.

Der Energiebedarf dieser Systeme ist hoch und weist je nach Workload nur begrenzte Flexibilität auf

Für Deutschland wird der Stromverbrauch von Rechenzentren aktuell auf rund 21,3 TWh im Jahr 2025 geschätzt. Mit dem weiteren Ausbau digitaler Infrastruktur und dem steigenden Anteil KI-basierter Anwendungen ist davon auszugehen, dass dieser Bedarf deutlich zunimmt. Prognosen gehen davon aus, dass der Anteil von KI-Workloads bis 2030 auf etwa 40% steigen könnte, bei einer installierten Rechenzentrumskapazität von bis zu 5.000 MW.

### **3.1 Herausforderungen durch volatile Energien**

Parallel zu diesem steigenden Energiebedarf befindet sich das Energiesystem in einem strukturellen Wandel. In Deutschland stammt inzwischen ein erheblicher Anteil der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien, insbesondere Wind- und Solarenergie. Diese zeichnen sich jedoch durch eine hohe Volatilität aus, da ihre Einspeisung von Wetterbedingungen abhängt.

In bestimmten Wetterlagen – insbesondere während sogenannter Dunkelflauten – kann die verfügbare Leistung aus erneuerbaren Energien deutlich zurückgehen. In solchen Phasen entstehen erhebliche Differenzen zwischen Stromerzeugung und Nachfrage, die durch zusätzliche Maßnahmen ausgeglichen werden müssen.

Für KI-Rechenzentren ergibt sich daraus eine besondere Herausforderung: Im Gegensatz zu vielen industriellen Anwendungen lassen sich ihre Lastprofile nur begrenzt flexibilisieren. Die notwendige kontinuierliche Verfügbarkeit von Rechenleistung führt dazu, dass Strombedarf und Stromangebot zeitlich möglichst eng synchronisiert werden müssen.

Mit dem zunehmenden Ausbau von Rechenzentren verstärken sich diese Anforderungen zusätzlich. In einzelnen Regionen zeigen sich bereits heute Engpässe bei der Netzkapazität sowie verlängerte Zeiträume für den Anschluss neuer Großverbraucher, was die Geschwindigkeit des Infrastrukturausbaus beeinflusst.

### **3.2 Lösungsansätze und deren Grenzen**

Zur Bewältigung dieser Herausforderungen werden unterschiedliche Lösungsansätze diskutiert, die jedoch jeweils spezifische Grenzen aufweisen.

Speichertechnologien, insbesondere Batteriespeicher auf Lithium-Ionen-Basis, können kurzfristige Schwankungen im Stromangebot ausgleichen und sind geeignet,

tageszeitliche Differenzen zu glätten. Ihre wirtschaftliche und technische Eignung ist jedoch bei länger andauernden Versorgungsengpässen – beispielsweise über mehrere Tage – begrenzt. In solchen Szenarien steigen sowohl der erforderliche Kapazitätsbedarf als auch die Kosten erheblich.

Smart Grids und Power Purchase Agreements (PPA) tragen zur besseren Koordination von Erzeugung und Nachfrage bei und können die Integration erneuerbarer Energien verbessern. Sie erhöhen jedoch primär die Effizienz des Systems, ohne die grundsätzliche Herausforderung der zeitlich schwankenden Verfügbarkeit vollständig aufzulösen.

Grundlastfähige Energiequellen bieten demgegenüber eine kontinuierlich verfügbare Stromerzeugung. Technologien mit hohen Kapazitätsfaktoren ermöglichen eine stabile Deckung konstanter Lastprofile und reduzieren den Bedarf an kurzfristigen Ausgleichsmaßnahmen.

Ein Vergleich zentraler Kenngrößen verschiedener Erzeugungstechnologien verdeutlicht diese Unterschiede:

- Windenergie (Onshore): niedrige Stromgestehungskosten, jedoch geringe Planbarkeit und Kapazitätsfaktoren im Bereich von etwa 25–35%
- Solarenergie: ebenfalls niedrige Kosten, jedoch stark tageszeitlich und saisonal schwankende Einspeisung
- Kernenergie: höhere Investitionskosten, jedoch sehr hohe Kapazitätsfaktoren (über 90%) und kontinuierliche Verfügbarkeit
- Gaskraftwerke (Spitzenlast): flexibel einsetzbar, jedoch mit vergleichsweise hohen Betriebskosten

Diese Gegenüberstellung zeigt, dass die Bewertung einzelner Technologien auf Basis isolierter Kostenkennzahlen nicht ausreicht. Entscheidend ist vielmehr die Fähigkeit des Gesamtsystems, eine kontinuierliche und planbare Stromversorgung sicherzustellen.

Die folgende Betrachtung dient der Illustration relativer Unterschiede zwischen Technologien und Systemkonfigurationen.

**Vergleich LCOE (Levelized Cost of Energy, Prognose 2030):**

Technologie	LCOE (€/MWh)	Kapazitätsfaktor (%)	Planbarkeit
Wind Onshore	40–60	25–35	Niedrig
Solar PV	30–50	15–25	Niedrig
Kernenergie	60–90	>90	Hoch
Gas-Peaking	100+	10–20	Mittel

Eine detaillierte Gegenüberstellung der Stromgestehungskosten findet sich in Anhang B.

**Ergänzung:**

Die Betrachtung von Stromgestehungskosten (LCOE) greift jedoch für die Bewertung der Versorgung von KI-Rechenzentren zu kurz. LCOE bildet lediglich die Kosten der Erzeugung ab, nicht jedoch die Systemkosten einer jederzeit verfügbaren und planbaren Stromversorgung.

Für volatile erneuerbare Energien entstehen zusätzliche Kosten durch Speicher, Backup-Kapazitäten, Netzausbau sowie Systemdienstleistungen. Diese werden im Konzept der „Levelized Full System Cost of Electricity“ (LFSCOPE) berücksichtigt und können die effektiven Kosten signifikant erhöhen – insbesondere bei hohen Anteilen fluktuierender Erzeugung.

**Zwischenfazit**

Die Analyse verdeutlicht, dass der steigende Energiebedarf von KI-Rechenzentren auf ein Energiesystem trifft, das zunehmend durch volatile Erzeugungsstrukturen geprägt ist.

Für Anwendungen mit konstant hoher Last führt dies zu erhöhten Anforderungen an Systemintegration, Speicher, Netzausbau und ergänzende Erzeugungskapazitäten. Die Sicherstellung einer jederzeit verfügbaren Energieversorgung entwickelt sich damit zu einer zentralen Voraussetzung für die Skalierung von KI-Infrastruktur.

## 4. Die Ökonomie von KI-Rechenzentren: Von LCOE zu TCO und Time-to-Power

### 4.1. Einordnung: Warum klassische Stromkostenperspektiven nicht ausreichen

Die wirtschaftliche Bewertung von Energieinfrastruktur erfolgt traditionell über Stromgestehungskosten (Levelized Cost of Electricity, LCOE) oder aggregierte Systemkosten. Diese Perspektiven greifen für die Analyse von KI-Rechenzentren jedoch zu kurz.

Entscheidend ist daher nicht allein der Strompreis, sondern die wirtschaftlich und technisch verlässliche Bereitstellung von Rechenleistung am jeweiligen Standort.

### 4.2. Die zentralen Kostenblöcke von KI-Rechenzentren

Die Wirtschaftlichkeit von KI-Infrastruktur ergibt sich aus einem Zusammenspiel mehrerer Kosten- und Risikokomponenten. Mindestens sieben Dimensionen sind dabei entscheidend:

#### (1) Stromkosten als Bestandteil der operativen Kosten (OPEX)

Strom stellt einen wesentlichen, aber nicht isolierten Bestandteil der Betriebskosten dar. Entscheidend ist:

- der effektive Strompreis über die Zeit (inkl. Volatilität),
- die Absicherungsstruktur (z. B. langfristige Stromverträge),
- sowie der Anteil der Energiekosten an den Gesamtkosten je Workload.

Ein Standort mit höheren Strompreisen kann wirtschaftlich wettbewerbsfähig sein, wenn andere Kostenkomponenten – etwa Auslastung, Verfügbarkeit oder Infrastruktur – günstiger ausfallen.

#### (2) Netzanschluss und elektrische Infrastruktur (CAPEX)

Ein zentraler Engpass liegt häufig in der Bereitstellung standortnaher Leistung.

Relevante Kosten entstehen durch:

- Netzanschluss (inkl. Netzausbauanteile),
- Umspannwerke und Transformatoren,
- interne Verteilungssysteme,
- sowie Hochleistungsanschlüsse für hohe Leistungsdichten.

Diese Investitionen sind kapitalintensiv und beeinflussen maßgeblich die Standortentscheidung.

### **(3) Time-to-Power als ökonomische Schlüsselvariable**

Die Dauer bis zur Bereitstellung eines Netzanschlusses („Time-to-Power“) entwickelt sich zunehmend zu einer zentralen wirtschaftlichen Größe.

Verzögerungen wirken sich direkt aus auf:

- Markteintrittszeitpunkte,
- Umsatzrealisierung,
- Skalierung von KI-Modellen,
- sowie Wettbewerbspositionen.

Ein Standort mit moderat höheren Stromkosten kann ökonomisch überlegen sein, wenn dort ein schnellerer Anschluss möglich ist. Time-to-Power ist damit eine infrastrukturelle und investitionsökonomische Variable.

### **(4) Kosten von Redundanz und Resilienz**

Rechenzentren sind auf hohe Verfügbarkeit angewiesen. Entsprechend entstehen zusätzliche Kosten durch:

- Redundanzarchitekturen (z. B. N+1, 2N),
- unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV),
- Batteriesysteme,
- sowie Backup-Lösungen (z. B. Notstromaggregate).

Diese Kosten hängen eng mit der Qualität des umgebenden Energiesystems zusammen. In Systemen mit höherer Unsicherheit steigen typischerweise die notwendigen Resilienzinvestitionen.

### **(5) Kosten von Nicht-Verfügbarkeit (Outage-Kosten)**

Für Betreiber sind Stromausfälle technische Störungen und auch erhebliche wirtschaftliche Risiken.

Ausfallkosten umfassen unter anderem:

- direkte Umsatzverluste,
- Vertragsstrafen (SLA-Verletzungen),
- Reputationsschäden,
- sowie Folgekosten durch Systeminstabilitäten.

Damit verschiebt sich die ökonomische Bewertung:

Nicht nur Stromkosten, sondern auch die Kosten fehlender Verfügbarkeit werden zu einer zentralen Entscheidungsgröße.

### **(6) Kühlung, Wasser und thermische Infrastruktur**

Mit steigender Leistungsdichte von KI-Systemen gewinnen thermische Aspekte stark an Bedeutung.

Kostenrelevant sind:

- Kühlsysteme (inkl. Flüssigkühlung),
- Wasserverfügbarkeit,
- Wärmeabfuhr und -integration,
- sowie potenzielle Nutzung von Abwärme.

Diese Faktoren sind standortspezifisch und beeinflussen sowohl Investitions- als auch Betriebskosten.

### **(7) Regulierung, CO<sub>2</sub>-Kosten und Vertragsstrukturen**

Zunehmend relevant sind auch:

- CO<sub>2</sub>-Bepreisung und regulatorische Anforderungen,
- Nachhaltigkeitsberichte und ESG-Kriterien,
- Strombeschaffungsmodelle (z. B. Power Purchase Agreements),
- sowie Anforderungen an die zeitliche Qualität der Energieversorgung.

Internationale Betreiber berücksichtigen dabei verstärkt nicht nur bilanziell „grüne“ Energie, sondern die zeitliche Deckung ihres Strombedarfs durch CO<sub>2</sub>-arme Erzeugung.

## **4.3. Standortentscheidungen als multidimensionale Optimierung**

Die Standortwahl für KI-Rechenzentren ist kein eindimensionaler Kostenvergleich, sondern ein komplexes Optimierungsproblem.

Zentrale Entscheidungsdimensionen sind:

- Strompreis und Preisstabilität
- Verfügbarkeit und Ausfallsicherheit
- Time-to-Power
- Anschlusskapazität
- Redundanzkosten
- Kühlungs- und Standortbedingungen

Diese Faktoren stehen in Wechselwirkung. Ein Vorteil in einer Dimension kann Nachteile in anderen kompensieren oder verstärken.

## 4.4. Der ökonomische Wert gesicherter Leistung

Neben den Kosten ist auch die generierte Wertschöpfung entscheidend.

KI-Rechenzentren erzeugen:

- hohe Produktivitätsgewinne,
- technologische Spillover-Effekte,
- sowie strategische Souveränitätsgewinne.

Daraus ergibt sich eine zentrale wirtschaftspolitische Implikation:

Die Bereitstellung gesicherter elektrischer Leistung für digitale Infrastruktur kann auch dann volkswirtschaftlich rational sein, wenn sie kurzfristig höhere Kosten verursacht.

## 4.5. Implikationen für Energie- und Standortpolitik

Die ökonomische Logik von KI-Rechenzentren rückt folgende Aspekte in den Mittelpunkt:

- Beschleunigung von Netzanschlüssen und Genehmigungsverfahren
- Priorisierung strategischer Infrastruktur im Netzausbau
- Integration von Energie-, Netz- und Digitalpolitik
- Förderung von Systemlösungen (Netze, Speicher, Verträge)
- Verbesserung der Planbarkeit für Investitionen

# 5. Vergleich globaler Strategien: USA vs. Europa/Deutschland

Mit der zunehmenden Bedeutung von KI-Infrastrukturen rückt die Energieversorgung als zentraler Standortfaktor in den Fokus des globalen Wettbewerbs. Dabei zeigen sich deutliche Unterschiede in den strategischen Ansätzen: Während in den USA die Sicherstellung planbarer, kontinuierlicher Energie im Vordergrund steht, liegt der Fokus in Europa stärker auf der Integration erneuerbarer Energien in bestehende Energiesysteme.

## 5.1 USA: Kernenergie als KI-Powerhouse

In den USA sichern sich Technologieunternehmen zunehmend langfristige Energiequellen mit hoher Verfügbarkeit, unter anderem über langfristige Stromabnahmeverträge und Kooperationen mit Energieanbietern. Dabei spielt auch Kernenergie eine wachsende Rolle als Option für planbare Leistung. Die beobachteten Projekte und Vereinbarungen deuten darauf hin, dass gesicherte, jederzeit verfügbare Energie in der Standortstrategie großer KI-Anbieter an Bedeutung gewinnt.

Unternehmen wie Microsoft, Google und Amazon investieren in langfristige Stromabnahmeverträge (Power Purchase Agreements, PPA) sowie in Kooperationen mit Energieanbietern. Ziel dieser Strategien ist es, sogenannte firm power, also jederzeit verfügbare Energie, sicherzustellen. Energiequellen mit hohen Kapazitätsfaktoren ermöglichen eine kontinuierliche Versorgung und reduzieren die Abhängigkeit von kurzfristigen Ausgleichsmechanismen.

Unternehmen	Partner/Projekt	Kapazität	Start	Quelle
Microsoft	Constellation (Three Mile Island Unit 1)	835 MW	2028	theguardian
Meta	TerraPower, Oklo, Vistra	bis 6,6 GW	2032+	carboncredits
Google	Kairos Power (3 SMRs)	500–600 MW/Anlage	2030	heise
Amazon	Talen (Susquehanna)	1,92 GW (PPA)	Laufend	aboutamazon

Diese „firm power“-Verträge verfolgen das Ziel, eine 24/7-Verfügbarkeit (Kapazitätsfaktor >90%) zu sichern, Skalierung zu ermöglichen und Risiken zu senken. Bis 2030 könnte Kernenergie 20–30% des US-Data-Center-Stroms decken.

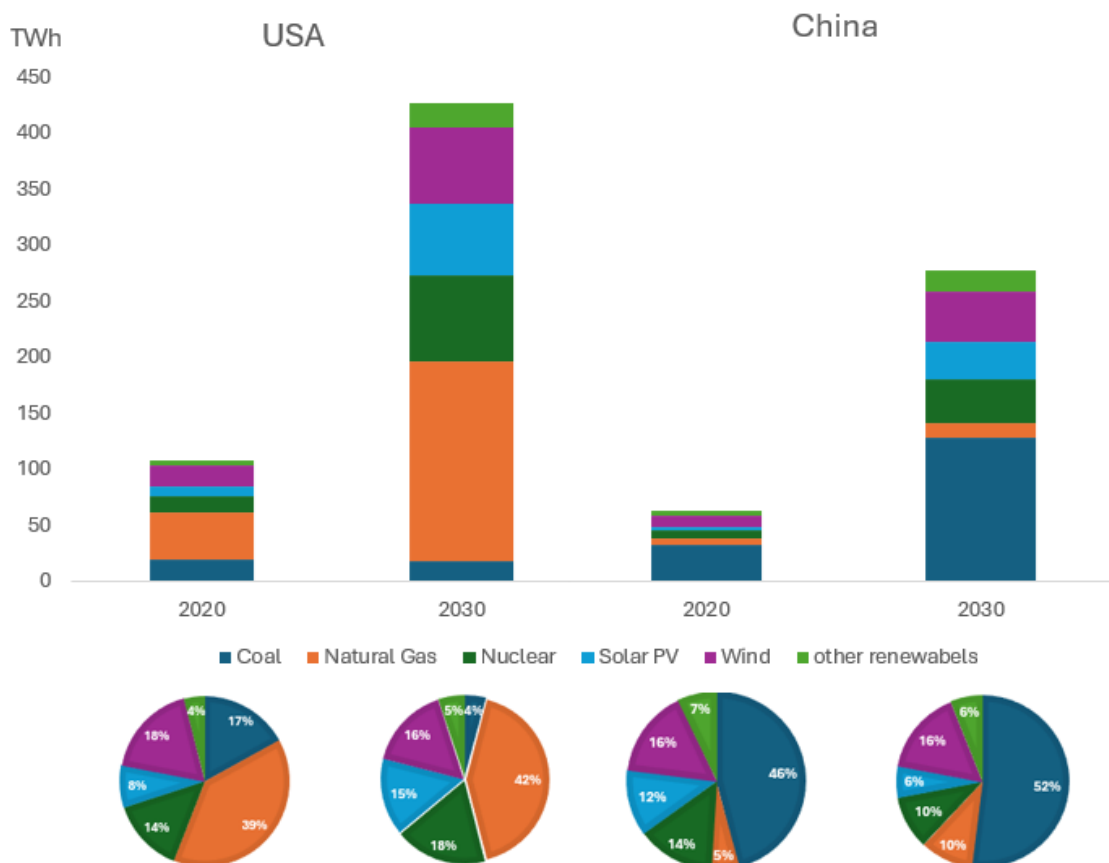
Ergänzend zeigt die International Energy Agency, dass selbst ambitionierte Beschaffungsstrategien nicht automatisch mit einer physisch klimaneutralen Versorgung gleichzusetzen sind. Viele erneuerbare Stromabnahmeverträge basieren auf Jahresmengen und sind weder stundenweise mit dem Verbrauchsprofil eines Rechenzentrums noch mit dem tatsächlichen Erzeugungsprofil der jeweiligen Anlagen synchronisiert. Dadurch kann ein Rechenzentrum bilanziell mit erneuerbarem Strom versorgt erscheinen, während die physische Stromversorgung in den relevanten Stunden weiterhin durch andere Quellen – etwa Erdgas oder Kohle – gedeckt wird. Die IEA beschreibt diesen Zusammenhang als Differenz zwischen dem beschafften beziehungsweise finanziellen Strommix und dem tatsächlich gelieferten physischen Strommix.

Für die Bewertung der Energieversorgung von KI-Rechenzentren ist diese Unterscheidung zentral. Denn für kontinuierliche Lasten ist entscheidend, ob hinreichend verlässliche, planbare und standortnahe Versorgung tatsächlich verfügbar ist. Damit bestätigt die IEA im Kern die hier vertretene Perspektive, dass für KI-Infrastruktur sowohl die bilanziell günstigste oder formal grünste Kilowattstunde ausschlaggebend ist, als auch die Fähigkeit des Gesamtsystems, Energie zeitlich passend und in gesicherter Qualität bereitzustellen. Zugleich verweist die IEA darauf, dass Unternehmen deshalb zunehmend auf stundenbezogene Beschaffungsmodelle („hourly matching“) sowie auf

Portfolios aus erneuerbaren Energien, Speichern und zusätzlichen planbaren CO2-armen Erzeugungsquellen setzen.

Veranschaulicht wird dies im IEA-Bericht auch anhand der projizierten physischen Stromversorgung von Rechenzentren in den USA und in China. Dabei zeigt sich, dass der Ausbau trotz zunehmender erneuerbarer Energien kurzfristig nicht zu einer überwiegend erneuerbaren physischen Versorgung führt. In den USA bleibt Erdgas auf absehbare Zeit der wichtigste Träger der Rechenzentrumsversorgung, während in China Kohle weiterhin den größten Anteil stellt; zugleich wachsen in beiden Fällen die Beiträge erneuerbarer Energien und nach 2030 zunehmend auch der Kernenergie.

### Electricity Generation for Data Center (Approx.)



Eigene Darstellung auf Basis von IEA, *Energy and AI*, 2025

Die Beispiele machen deutlich, dass bilanzielle Klimaneutralität und physische Klimaneutralität im Rechenzentrumssektor nicht deckungsgleich sind.

## 5.2 Europa/Deutschland: Engpässe durch Energiewende

Im Gegensatz zu dieser stärker auf gesicherte und physisch verfügbare Leistung ausgerichteten Entwicklung befindet sich das Energiesystem in Europa und insbesondere in Deutschland in einem umfassenden Transformationsprozess.

Der Ausbau erneuerbarer Energien ist ein zentraler Bestandteil der Energiepolitik und hat bereits zu einem hohen Anteil fluktuierender Stromerzeugung geführt.

Diese Entwicklung bringt jedoch zusätzliche Anforderungen mit sich. Die Integration volatiler Energiequellen erfordert einen erheblichen Ausbau von Netzen, Speichern und flexiblen Erzeugungskapazitäten. Gleichzeitig steigt mit dem Wachstum von Rechenzentren der Bedarf an kontinuierlich verfügbarer Energie.

In einzelnen Regionen zeigen sich bereits heute Engpässe bei Netzkapazitäten sowie Verzögerungen beim Anschluss neuer Großverbraucher. Auch die Stromkosten liegen im internationalen Vergleich auf einem höheren Niveau, was sich auf Investitionsentscheidungen auswirken kann.

Als ergänzende Lösungen werden unter anderem Gaskraftwerke, Wasserstofftechnologien und alternative Speicherlösungen diskutiert. Diese sind jedoch jeweils mit spezifischen wirtschaftlichen, technologischen oder regulatorischen Herausforderungen verbunden.

Im Ergebnis entsteht ein Spannungsfeld zwischen den Zielen der Dekarbonisierung, der Versorgungssicherheit und der internationalen Wettbewerbsfähigkeit.

Die zusätzlichen Anforderungen eines stark auf erneuerbaren Energien basierenden Systems werden in Anhang C anhand einer Simulation weiter vertieft.

Ergänzend verdeutlichen Beispiele aus Regionen mit besonders günstigen natürlichen Rahmenbedingungen die Bandbreite möglicher Systemkonfigurationen. In sonnenreichen Regionen mit sehr hohen Einstrahlungswerten – etwa in Teilen des Nahen Ostens – können erneuerbare Energien deutlich höhere Volllaststunden erreichen als in Mitteleuropa.

Dies ermöglicht unter spezifischen Bedingungen eine vergleichsweise kostengünstige und planbare Strombereitstellung. Gleichzeitig handelt es sich hierbei um strukturelle Grenzfälle: Hohe und stabile Einstrahlung, geringe saisonale Schwankungen sowie großflächig verfügbare Standorte sind Voraussetzungen, die in dieser Form nicht auf Deutschland übertragbar sind.

Für Deutschland ergibt sich daraus keine direkte Blaupause, sondern eine zentrale Implikation: Unter weniger günstigen klimatischen und räumlichen Bedingungen steigen die Anforderungen an Netzinfrastruktur, Speicher, Systemintegration und ergänzende gesicherte Leistung. Diese zusätzlichen Anforderungen gehen mit höherer Komplexität und potenziell höheren Systemkosten einher.

### 5.3 Solarversorgung: Masdar City (VAE) vs. Deutschland

Masdar zeigt, daß eine weitgehende erneuerbare 24/7-Versorgung unter außergewöhnlichen Standortbedingungen möglich ist. Für Deutschland ist dies jedoch kein direkt übertragbares Modell.

Die regional unterschiedlichen Rahmenbedingungen werden exemplarisch in Anhang D am Beispiel von Masdar analysiert.

### 5.4 Rolle planbarer und gesicherter Leistung

Vor dem Hintergrund der steigenden Anforderungen an die Energieversorgung rücken grundlastfähige Technologien zunehmend in den Fokus der Diskussion. Energiequellen mit hoher Verfügbarkeit und planbarer Erzeugung bieten strukturelle Vorteile für Anwendungen mit konstantem Lastprofil, wie sie bei KI-Rechenzentren typisch sind.

Technologien mit hohen Kapazitätsfaktoren ermöglichen eine kontinuierliche Stromversorgung und reduzieren den Bedarf an kurzfristigen Ausgleichsmaßnahmen.

Allerdings ist auch hier eine differenzierte Betrachtung erforderlich. Neben technischen Aspekten spielen wirtschaftliche, regulatorische und gesellschaftliche Faktoren eine entscheidende Rolle bei der Bewertung und Umsetzung entsprechender Technologien.

Die folgende Betrachtung dient der Illustration relativer Unterschiede zwischen Technologien und Systemkonfigurationen.

**Tabelle 5.3: Vorteile Kernkraft vs. Alternativen**

Kriterium	Kernkraft (SMR)	PV+Speicher	Gas
Verfügbarkeit	95%	70% (mit Backup)	85%
LCOE 2030 (€/MWh)	60–90	80–150	100+
CO <sub>2</sub> (g/kWh)	<10	<50 (Lifecycle)	400

Eine vertiefte Betrachtung der Rolle von Speichern und deren wirtschaftlicher Skalierung findet sich in Anhang E.

### Zwischenfazit

Der internationale Vergleich zeigt, dass sich unterschiedliche energiepolitische Strategien unmittelbar auf die Entwicklung von KI-Infrastrukturen auswirken.

Während in den USA der Fokus auf schneller Skalierung und der Sicherstellung planbarer Energie liegt, verfolgt Europa einen stärker regulierten und auf Nachhaltigkeit ausgerichteten Ansatz. Beide Modelle bringen spezifische Vor- und Nachteile mit sich.

Mit zunehmender Bedeutung von KI-Anwendungen wird jedoch deutlich, dass die Verfügbarkeit geeigneter Energieinfrastruktur zu einem entscheidenden Faktor im globalen Standortwettbewerb wird.

## 6. Diskussion und strategische Implikationen

Die Analyse zeigt, dass sich im Kontext von KI-Infrastruktur ein struktureller Wandel der energieökonomischen Bewertung vollzieht.

Dabei wird deutlich, dass KI-Infrastruktur keine homogene Last darstellt. Trainingsprozesse, Inferenzanwendungen und klassische Cloud-Workloads unterscheiden sich hinsichtlich Lastprofil, Flexibilität und Standortanforderungen. Entsprechend variieren auch die Anforderungen an die Energieversorgung. Während Teile der Nachfrage zeitlich verschiebbar sind, erfordern andere Anwendungen eine hohe Verfügbarkeit und geringe Latenz.

Vor diesem Hintergrund gewinnt die zeitliche Qualität der Stromversorgung an Bedeutung. Für Betreiber ist nicht allein entscheidend, ob ausreichend Energie bilanziell verfügbar ist, sondern ob diese zum Zeitpunkt des Bedarfs zuverlässig bereitgestellt werden kann. Dies führt zu steigenden Anforderungen an Netzinfrastruktur, Speicher, Flexibilitätsoptionen sowie an vertragliche Absicherungsmodelle.

Die wirtschaftliche Perspektive unterstreicht diese Entwicklung: Standortentscheidungen folgen einer Optimierung aus Anschlussgeschwindigkeit, Verfügbarkeit, Resilienz und Infrastruktur.

In diesem Kontext wird deutlich, dass hohe Anteile fluktuierender Erzeugung nicht per se ein Standortnachteil sind, jedoch die Anforderungen an Systemintegration und Infrastruktur erhöhen. Die Wettbewerbsfähigkeit eines Standorts hängt somit weniger von einzelnen Erzeugungstechnologien ab als von der Fähigkeit, diese in ein leistungsfähiges Gesamtsystem zu integrieren.

Im internationalen Vergleich zeigen sich Unterschiede insbesondere bei der Geschwindigkeit und Planbarkeit von Infrastrukturprojekten. Neben Strompreisen gewinnen Faktoren wie Netzanschlussdauer, Genehmigungsverfahren und verfügbare Anschlusskapazitäten an Bedeutung. Verzögerungen bei der Bereitstellung von Leistung können direkte Auswirkungen auf Investitionsentscheidungen, Skalierungspfade und Marktpositionen haben.

Für Deutschland ergibt sich daraus ein Spannungsfeld zwischen Klimazielen, Versorgungssicherheit und internationaler Wettbewerbsfähigkeit. Der Ausbau

erneuerbarer Energien bleibt eine zentrale Voraussetzung für eine nachhaltige Energieversorgung. Gleichzeitig wird es entscheidend sein, die Systemfähigkeit der Energieinfrastruktur weiterzuentwickeln – insbesondere durch den Ausbau von Netzen, die Beschleunigung von Anschlussprozessen sowie die Verbesserung von Planbarkeit und Investitionssicherheit.

Die weitere Entwicklung hängt dabei maßgeblich von technologischen Fortschritten, Effizienzgewinnen und regulatorischen Rahmenbedingungen ab.

Zunehmend relevant ist zudem die Art der Strombeschaffung. Internationale Betreiber setzen verstärkt auf langfristige Vertragsmodelle sowie auf Konzepte, die eine zeitlich möglichst genaue Deckung von Strombedarf und CO<sub>2</sub>-armer Erzeugung anstreben. Dies unterstreicht die Bedeutung integrierter Lösungen, die über die reine Bereitstellung von Energiemengen hinausgehen.

Der Standortwettbewerb im KI-Zeitalter wird durch die Fähigkeit entschieden, Energie, Netze und Infrastruktur als integriertes System bereitzustellen.

## 6.1 Risiken für Deutschland

Aus dieser Konstellation ergeben sich mehrere strukturelle Risiken für den Standort Deutschland:

- **Wirtschaftliche Risiken:**  
Im internationalen Vergleich höhere Strompreise sowie begrenzte Netzkapazitäten können die Skalierung energieintensiver digitaler Infrastrukturen verlangsamen. Dies betrifft insbesondere den Aufbau großer KI-Rechenzentren und kann Investitionsentscheidungen beeinflussen.
- **Geopolitische Risiken:**  
Die weiterhin hohe Abhängigkeit von außereuropäischen Cloud- und Plattformanbietern birgt Risiken für die technologische Souveränität. Eine unzureichende eigene Infrastruktur verstärkt diese Abhängigkeit zusätzlich.
- **Umwelt- und Systemrisiken:**  
Der steigende Bedarf an gesicherter Leistung kann kurzfristig zu einem verstärkten Einsatz konventioneller Backup-Lösungen führen. Dies kann Zielkonflikte zwischen Versorgungssicherheit und Klimazielen verschärfen, sofern keine geeigneten alternativen Lösungen etabliert werden.

Ohne schnell verfügbare Anschlussleistung steigt das Risiko, daß Investitionen in KI-Infrastruktur an andere Standorte abwandern.

## 6.2 Grenzen der Studie

Die Ergebnisse dieser Studie basieren auf aktuellen Markt- und Technologiedaten sowie auf Prognosen, die mit Unsicherheiten behaftet sind. Insbesondere technologische Entwicklungen – etwa bei Speicherlösungen oder Effizienzsteigerungen von KI-Systemen – können zukünftige Entwicklungen maßgeblich beeinflussen.

Weitere Forschung sollte daher insbesondere systemische Modellierungen, etwa durch Netz- und Energiesimulationen, einbeziehen, um die Wechselwirkungen zwischen Energieangebot und Nachfrage noch präziser abzubilden. Effizienzgewinne können den Strombedarf dämpfen, lösen die infrastrukturellen Anforderungen jedoch nicht auf.

## 7. Prioritäre Maßnahmen

Die folgenden Maßnahmen sind nach ihrer Bedeutung für die kurzfristige Skalierbarkeit von KI-Infrastruktur priorisiert:

**Priorität 1:** Netzanschlüsse für strategische Rechenzentren beschleunigen.

Ohne verfügbare Anschlussleistung können neue Kapazitäten unabhängig vom Strompreis nicht realisiert werden. Rechenzentren mit hoher volkswirtschaftlicher Relevanz sollten in Netzplanung und Anschlussverfahren als strategische Lasten priorisiert werden.

**Priorität 2:** Time-to-Power systematisch verkürzen.

Die Geschwindigkeit von Genehmigungen, Netzbereitstellung und Projektumsetzung bestimmt die Skalierungsfähigkeit von KI-Infrastruktur. Bund und Länder sollten Anschlussdauer, Umspannwerkskapazitäten und Genehmigungszeiten transparent machen und gezielt beschleunigen.

**Priorität 3:** 24/7-fähige Strombeschaffung ermöglichen.

Verlässlicher Betrieb erfordert geeignete Markt- und Vertragsmodelle. Rahmenbedingungen für langfristige PPAs, flexible Beschaffungsmodelle und regionale Matching-Ansätze sollten so ausgestaltet werden, dass eine kontinuierliche Versorgung wirtschaftlich darstellbar wird.

**Priorität 4:** Rechenzentrumsansiedlung integrieren (Netz, Wärme, Fläche).

Standortentscheidungen sollten systemisch erfolgen: dort, wo Netzkapazitäten, geeignete Flächen, Kühlung und Abwärmenutzung zusammenkommen. Eine stärkere Verzahnung mit kommunaler Wärmeplanung erhöht Effizienz und Akzeptanz.

### Einordnung:

Die ersten beiden Maßnahmen adressieren physische und zeitliche Engpässe bei der Bereitstellung von Leistung. Die übrigen Maßnahmen verbessern Betrieb und Systemintegration bestehender und neuer Standorte

## 8. Schlussfolgerung (Zusammenfassung)

Künstliche Intelligenz entwickelt sich zu einem zentralen Treiber wirtschaftlicher Wertschöpfung und technologischer Innovation. Mit dem steigenden Bedarf an Rechenleistung rückt die physische Infrastruktur – insbesondere die Energieversorgung von Rechenzentren – in den Mittelpunkt der Standortpolitik.

Die vorliegende Analyse zeigt, dass sich die entscheidende Bewertungsgröße im Kontext von KI-Infrastruktur verschiebt. Sowohl kostengünstige Erzeugung von Strom ist ausschlaggebend, als auch die Fähigkeit eines Systems, verlässliche, zeitlich passende und wirtschaftlich kalkulierbare Energie bereitzustellen.

**KI macht Energieinfrastruktur zu einem strategischen Standortfaktor. Der Engpaß im KI-Zeitalter ist nicht Rechenleistung, sondern die Energie, sie zuverlässig zu betreiben.**

## Literaturverzeichnis

**Bitkom (2024). Rechenzentren: Deutschland verliert den Anschluss.**

<https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Rechenzentren-Deutschland-verliert-Anschluss>.

**BloombergNEF (2025). Power for AI: Easier Said Than Built.**

<https://about.bnef.com/insights/commodities/power-for-ai-easier-said-than-built/>.

**Borderstep-Institut (2025). Zukunftsmarkt nachhaltige Rechenzentren.**

<https://www.dena.de/infocenter/zukunftsmarkt-nachhaltige-rechenzentren/>.

**Carboncredits.com (2026). Meta Signs Three Nuclear Deals of up to 6.6 GW.**

<https://carboncredits.com/meta-signs-three-nuclear-deals-of-up-to-6-6-gw-to-fuel-ai-data-center-growth/>.

**Cargoson (2025). Wie groß ist der KI-Markt?** <https://www.cargoson.com/de/blog/wie-gross-ist-der-ki-markt-statistiken>.

<https://www.cargoson.com/de/blog/wie-gross-ist-der-ki-markt-statistiken>.

**CBS News (2026). Meta signs 3 deals for nuclear energy.**

<https://www.cbsnews.com/news/meta-nuclear-power-deals-ai-data-centers/>.

**ENGIE Deutschland (2026). Wie Rechenzentren die Energiewende unterstützen.**

<https://www.engie-deutschland.de/de/magazin/wie-rechenzentren-die-energiewende-aktiv-unterstuetzen>.

**Global Energy Solutions e.V. (2026). Energie für KI.pdf [Original-Draft].**

**Introl (2026). Nuclear power for AI: Data center energy deals.**

<https://introl.com/blog/nuclear-power-ai-data-centers-microsoft-google-amazon-2025>.

**JLL (2025). Energieversorgung für Rechenzentren – Ausblick 2025.**

[https://www.jll.com/de-de/insights/energie-sicherheit-und-anpassungsfahigkeit-im-fokus.](https://www.jll.com/de-de/insights/energie-sicherheit-und-anpassungsfahigkeit-im-fokus)

**Marketplace (2025). Big Tech goes all-in on nuclear.**

[https://www.marketplace.org/story/2025/09/29/big-tech-goes-all-in-on-nuclear-as-data-centers-proliferate.](https://www.marketplace.org/story/2025/09/29/big-tech-goes-all-in-on-nuclear-as-data-centers-proliferate)

**Mordor Intelligence (2025). Enterprise AI Market.**

[https://www.mordorintelligence.com/de/industry-reports/enterprise-ai-market.](https://www.mordorintelligence.com/de/industry-reports/enterprise-ai-market)

**Öko-Institut (2025). KI auf Kosten des Klimaschutzes.**

[https://www.oeko.de/news/pressemeldungen/ki-auf-kosten-des-klimaschutzes-energiebedarf-von-rechenzentren-verdoppelt-sich-bis-2030.](https://www.oeko.de/news/pressemeldungen/ki-auf-kosten-des-klimaschutzes-energiebedarf-von-rechenzentren-verdoppelt-sich-bis-2030)

**Statista (2024). Globales KI-Marktvolumen bis 2030.**

[https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1405265/umfrage/kuenstliche-intelligenz-marktvolumen/.](https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1405265/umfrage/kuenstliche-intelligenz-marktvolumen/)

**Tagesschau (2025). Strom zu knapp und teuer – Deutschlands KI-Revolution?**

[https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/energiewende-strom-zu-knapp-und-teuer-scheitert-daran-deutschlands-ki-revolutio.](https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/energiewende-strom-zu-knapp-und-teuer-scheitert-daran-deutschlands-ki-revolutio)

**TTMS (2026). Growing Energy Demand of AI Data Centers 2024–2026.**

[https://ttms.com/growing-energy-demand-of-ai-data-centers-2024-2026/.](https://ttms.com/growing-energy-demand-of-ai-data-centers-2024-2026/)

# Anhang A: Entwicklung des Strombedarfs und Standortvergleich

Die zunehmende Bedeutung von KI-gestützten Anwendungen führt zu einer grundlegenden Verschiebung der Anforderungen an die Energieversorgung digitaler Infrastrukturen. Die folgenden Abbildungen verdeutlichen sowohl die quantitative Entwicklung des Strombedarfs von Rechenzentren in Deutschland als auch zentrale Unterschiede in den Standortbedingungen zwischen Deutschland und den USA.

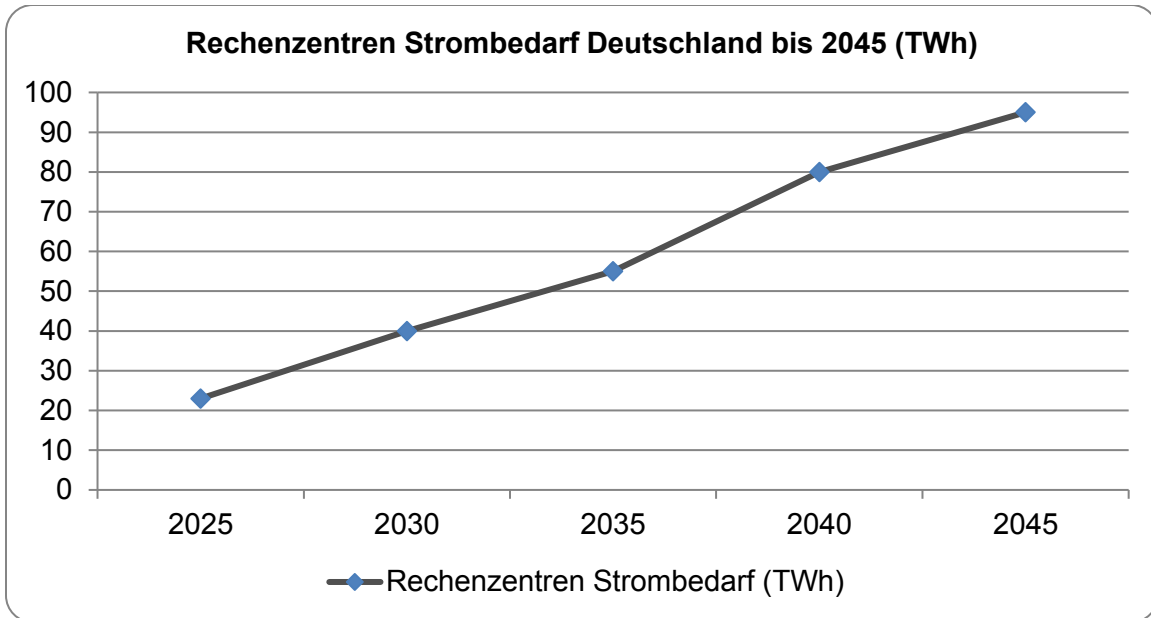
## A1. Entwicklung des Strombedarfs von Rechenzentren in Deutschland

Die dargestellte Entwicklung zeigt einen signifikanten Anstieg des Strombedarfs von Rechenzentren in Deutschland im Zeitraum von 2025 bis 2045. Ausgangspunkt ist ein Verbrauch von rund 20–25 TWh im Jahr 2025. Bis 2030 wird ein Anstieg auf etwa 35–50 TWh erwartet, während langfristige Prognosen bis 2045 von einem Bedarf von bis zu 90 TWh oder mehr ausgehen.

Diese Entwicklung ist maßgeblich durch die zunehmende Integration von Künstlicher Intelligenz in wirtschaftliche Prozesse getrieben. Insbesondere KI-Workloads unterscheiden sich strukturell von klassischen IT-Anwendungen, da sie eine dauerhaft hohe Auslastung der Recheninfrastruktur erfordern. Während traditionelle IT-Systeme häufig lastabhängig betrieben werden können, führt die Kombination aus Modelltraining und kontinuierlicher Inferenz bei KI zu einer nahezu konstant gesicherten Leistung.

Der steigende Strombedarf ist somit nicht nur Ausdruck eines wachsenden Digitalisierungsgrades, sondern auch Ergebnis eines strukturellen Wandels hin zu energieintensiven Anwendungen. In der Folge wird der Anteil von Rechenzentren am gesamten Stromverbrauch Deutschlands deutlich zunehmen und mittelfristig in eine Größenordnung von bis zu 10–15% vordringen.

Die folgende Betrachtung stellt eine vereinfachte, heuristische Einordnung dar und dient der Illustration relativer Unterschiede zwischen verschiedenen Systemkonfigurationen. Sie ersetzt keine vollständige technoökonomische Bewertung.



Prognosebandbreite basierend auf Marktwachstum und steigenden KI-Workloads.

**Definitionen:** Strombedarf umfasst den jährlichen Energieverbrauch von Rechenzentren (inkl. IT-Last, Kühlung und Infrastruktur). Werte für 2030–2045 basieren auf Fortschreibungen aktueller Marktentwicklungen und steigender KI-Workloads.

**Quellen:** Borderstep Institut (2025): *Rechenzentren in Deutschland – Status und Perspektiven*; Internationale Energieagentur (IEA) (2024): *Electricity 2024 – Analysis and Forecast*; Bitkom (2024): *Rechenzentren: Deutschland verliert den Anschluss*; eigene Darstellung und Fortschreibung.

## A2. Standortvergleich: USA vs. Deutschland

Die zweite Abbildung stellt zentrale Standortfaktoren für den Betrieb von KI-Rechenzentren in den USA und Deutschland gegenüber. Dabei werden insbesondere Stromkosten, Planbarkeit der Energieversorgung, Netzstabilität sowie die Dauer bis zur Bereitstellung neuer Anschlusskapazitäten („Time-to-Power“) betrachtet.

Im Bereich der Stromkosten zeigen sich deutliche Unterschiede: Während die USA von vergleichsweise niedrigen und stabileren Energiepreisen profitieren, liegt das Preisniveau in Deutschland signifikant höher. Dies wirkt sich unmittelbar auf die Betriebskosten von Rechenzentren aus, da Energie einen dominanten Anteil der laufenden Kosten darstellt.

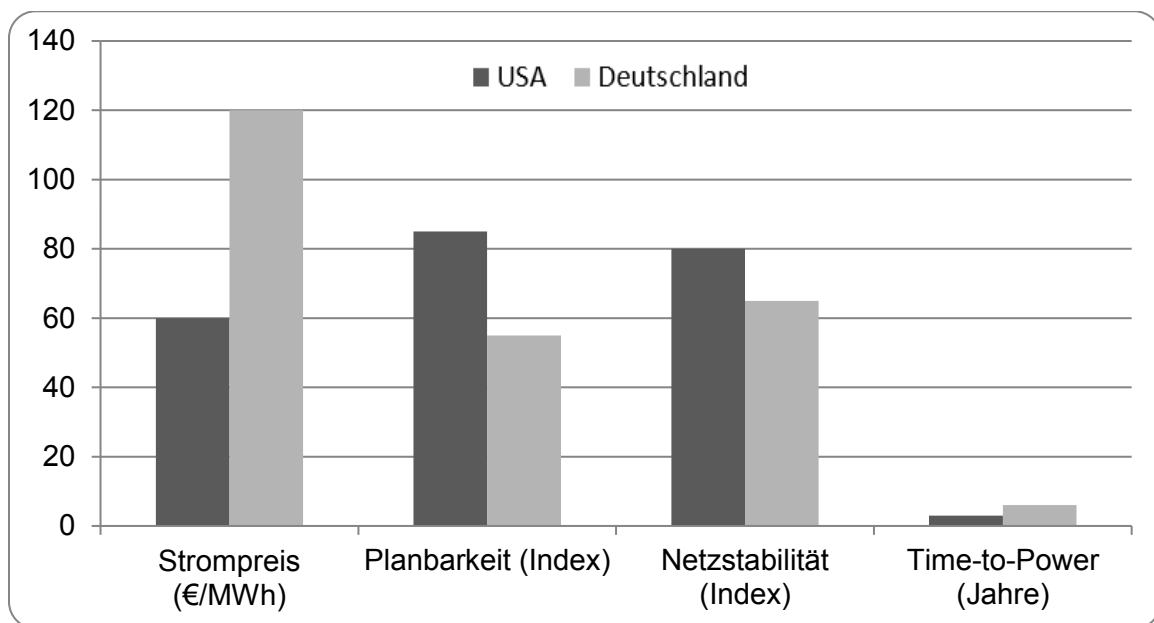
Ein weiterer zentraler Unterschied liegt in der Planbarkeit der Energieversorgung. Die USA verfügen über einen diversifizierten Energiemix mit einem signifikanten Anteil an grundlastfähigen Energiequellen, was eine kontinuierliche und verlässliche Strombereitstellung begünstigt. In Deutschland hingegen ist die Energieversorgung stärker durch volatile erneuerbare Energien geprägt, deren Verfügbarkeit naturgemäß schwankt. Dies führt zu erhöhten Anforderungen an Ausgleichsmechanismen und kann die Planungssicherheit für Betreiber einschränken.

Auch im Hinblick auf die Netzstabilität zeigen sich Unterschiede. Während das US-amerikanische System durch regionale Diversifizierung und hohe Investitionen in Infrastruktur gekennzeichnet ist, bestehen in Deutschland zunehmend Engpässe, insbesondere in Regionen mit hoher Nachfrage durch Rechenzentren.

Schließlich spielt die Zeit bis zur Bereitstellung neuer Stromanschlüsse eine entscheidende Rolle. In einem dynamischen Marktumfeld wie der KI-Industrie ist die Geschwindigkeit, mit der neue Kapazitäten aufgebaut werden können, ein wesentlicher Wettbewerbsfaktor. Längere Genehmigungs- und Anschlusszeiten in Deutschland stellen daher einen potenziellen Standortnachteil dar.

Die folgende Betrachtung stellt eine vereinfachte, heuristische Einordnung dar und dient der Illustration relativer Unterschiede zwischen verschiedenen Systemkonfigurationen. Sie ersetzt keine vollständige technoökonomische Bewertung.

Standortvergleich für KI-Rechenzentren: USA vs. Deutschland



Hinweis: Indizes (0–100) für Planbarkeit und Netzstabilität; illustrative Vergleichswerte

**Definitionen:**

Strompreis: Durchschnittliche industrielle Stromkosten (€/MWh).

Planbarkeitsindex (0–100): Qualitativer Indikator für die zeitliche Verfügbarkeit und Prognostizierbarkeit von Strom (inkl. Dispatchability und Volatilität).

Netzstabilitätsindex (0–100): Qualitativer Indikator für die Fähigkeit des Stromsystems, Frequenz- und Spannungsschwankungen auszugleichen (inkl. Reservekapazitäten und Netzauslastung).

Time-to-Power: Zeitspanne von Planung bis zur Bereitstellung neuer Netzanschlüsse für Großverbraucher.

**Quellen:** International Energy Agency (2024): *Electricity Markets and Data Centres*; BloombergNEF (2025): *Power for AI*; Statista (2024): Strompreise international; U.S. Energy Information Administration (2024); Bundesnetzagentur (2025); eigene Darstellung.

### **A3. Einordnung und Implikationen**

Die beiden Abbildungen verdeutlichen zusammen eine zentrale Herausforderung: Der stark steigende Strombedarf von KI-Rechenzentren trifft in Deutschland auf ein Energiesystem, das hinsichtlich Planbarkeit, Skalierbarkeit und Kosten unter zunehmendem Druck steht.

Während die Nachfrage nach Rechenleistung und damit nach Energie weiter exponentiell wächst, wird die Fähigkeit, diese Nachfrage zuverlässig zu bedienen, zu einem entscheidenden Standortfaktor. Unterschiede in Energiepreisen, Versorgungssicherheit und Ausbaugeschwindigkeit können dabei maßgeblich darüber entscheiden, wo zukünftige KI-Infrastrukturen aufgebaut werden.

Die Analyse legt nahe, dass nicht allein die technologische Leistungsfähigkeit oder regulatorische Rahmenbedingungen über die Wettbewerbsfähigkeit im KI-Sektor entscheiden, sondern in zunehmendem Maße die physische und energetische Infrastruktur. Damit rückt die Energieversorgung in den Mittelpunkt strategischer Überlegungen zur Sicherung von Innovationsfähigkeit und wirtschaftlicher Souveränität.

Hinweis: Die Indizes stellen vereinfachte, vergleichende Bewertungsgrößen dar und basieren auf einer aggregierten Betrachtung technischer und wirtschaftlicher Parameter.

## **Anhang B: Stromgestehungskosten (LCOE) und Systemkosten**

Die Bewertung von Energieerzeugungstechnologien erfolgt häufig anhand der sogenannten Levelized Cost of Electricity (LCOE), also der durchschnittlichen Stromgestehungskosten über die Lebensdauer einer Anlage. Diese Kennzahl ermöglicht einen Vergleich unterschiedlicher Technologien auf Basis von Investitions-, Betriebs- und Kapitalkosten.

In den vergangenen Jahren sind die LCOE für erneuerbare Energien, insbesondere Photovoltaik und Windkraft, signifikant gesunken und liegen in vielen Regionen unter denen konventioneller Kraftwerke. Diese Entwicklung wird häufig als Argument für die wirtschaftliche Überlegenheit erneuerbarer Energien herangezogen.

Die folgende Betrachtung dient der Illustration relativer Unterschiede zwischen Technologien und Systemkonfigurationen.

**Tabelle 5.3: Vorteile Kernkraft vs. Alternativen**

Kriterium	Kernkraft (SMR)	PV+Speicher	Gas
Verfügbarkeit	95%	70% (mit Backup)	85%
LCOE 2030 (€/MWh)	60–90	80–150	100+
CO <sub>2</sub> (g/kWh)	<10	<50 (Lifecycle)	400

Allerdings weist die isolierte Betrachtung der LCOE eine wesentliche Einschränkung auf: Sie berücksichtigt nicht die Systemkosten, die durch die Integration volatiler Energiequellen entstehen. Dazu zählen insbesondere Kosten für Speicher, Netzausbau, Reservekapazitäten sowie Eingriffe zur Stabilisierung des Stromsystems.

Mit steigendem Anteil erneuerbarer Energien nehmen diese Systemkosten überproportional zu. Insbesondere die Notwendigkeit, Energie zeitlich zu verschieben (Speicher) oder durch Backup-Kapazitäten abzusichern, führt zu einer deutlichen Erhöhung der effektiven Gesamtkosten des Systems.

Für energieintensive Anwendungen wie KI-Rechenzentren ist daher nicht allein der LCOE entscheidend, sondern der sogenannte „System-LCOE“, der die tatsächlichen Kosten einer jederzeit verfügbaren Stromversorgung abbildet. Diese Perspektive verschiebt die Bewertung zugunsten von Technologien mit hoher Verfügbarkeit und Planbarkeit.

In internationalen Technologiekostenstudien werden für Kernkraft typischerweise folgende Parameter verwendet. Die folgende Betrachtung dient der Illustration relativer Unterschiede zwischen Technologien und Systemkonfigurationen.

Parameter	Typischer Wert
Investitionskosten	~5000–9000 €/kW
Kapazitätsfaktor	~80–90%
Volllaststunden	~7000–7900 h/Jahr
Lebensdauer	~60 Jahre (Standardannahme), Laufzeitverlängerungen bis 70-80 Jahre möglich
Discountsatz	3-10% (typische Szenarien), Referenz häufig ~7%

Die Stromgestehungskosten ergeben sich aus den Investitionskosten pro installierter Leistung (€/kW), die über die Lebensdauer und die erzeugte Strommenge (Volllaststunden) auf die Stromproduktion umgelegt werden.

Reale Betriebsdaten der weltweiten Kernkraftflotte bestätigen diese Größenordnung: Der durchschnittliche Kapazitätsfaktor liegt global bei etwa 82–83%, mit über 90% in einigen Ländern wie den USA. Dies entspricht etwa 7200–7900 Volllaststunden pro Jahr und liegt damit im gleichen Bereich wie die Kapazitätsfaktoren, die in internationalen Kostenstudien für Technologievergleiche angenommen werden.

Die Volllaststunden ergeben sich aus dem Kapazitätsfaktor multipliziert mit der jährlichen Betriebszeit von 8760 Stunden.

In internationalen Kostenstudien wird für neue Kernkraftwerke üblicherweise eine ökonomische Lebensdauer von etwa 60 Jahren angesetzt. Gleichzeitig zeigen reale Betriebsdaten und regulatorische Genehmigungen, dass Laufzeitverlängerungen auf 70 bis 80 Jahre technisch und regulatorisch zunehmend umgesetzt werden.

Internationale Kostenstudien berechnen LCOE häufig für mehrere Diskontsätze (z. B. 3%, 7% und 10%), da Finanzierungskosten einen entscheidenden Einfluss auf die Stromgestehungskosten kapitalintensiver Technologien wie Kernkraft haben.

Die folgende Betrachtung stellt eine vereinfachte, heuristische Einordnung dar und dient der Illustration relativer Unterschiede zwischen verschiedenen Systemkonfigurationen. Sie ersetzt keine vollständige technoökonomische Bewertung.

## LCOE Deutschland basierend auf BDEW/BWE/IWR

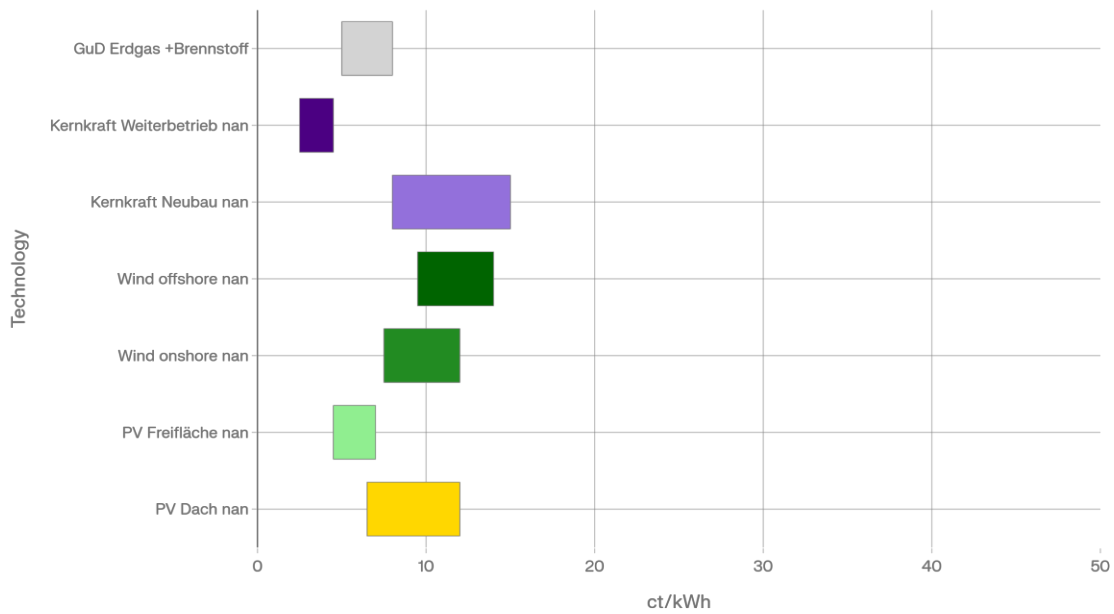
Im Vergleich zu Fraunhofer ISE 2024 Annahmen

Technologie	Quelle	CAPEX (€/kW)	OPEX fix (€/kW/a)	OPEX var (€/MWh)	FLH	Life (J)	WACC (%)	LCOE (ct/kWh)
PV Freifläche	Fraunhofer ISE	700-900	15-20	0	950-1300	30	3-5	4.5-7.3
PV Freifläche	Öko/BDEW 2025	500-800	15-20	0	900-1200	30	4.0-6.0	4.5-7.0
PV Dach	Fraunhofer ISE	1000-2000	20-30	0	950-1300	30	3-4	6.1-14.1
PV Dach	Fraunhofer PV 2025	1200-1500	20-25	0	950-1100	30	3.5-5.0	6.5-12.0
Wind onshore	Fraunhofer ISE	1300-1900	32	7-8	1800-3200	25	3.9	4.3-9.2
Wind onshore	BWE/E-Charts 2024	1300-1900	35-50	10-15	1750-2500	25	5.0-6.5	7.5-12.0
Wind offshore	Fraunhofer ISE	2200-3400	39	7-8	3200-4500	25	6.0	5.4-10.3
Wind offshore	BWE Offshore 2024	2800-3400	75-90	20-25	3500-4200	25	6.0-7.5	9.5-14.0
Kernkraft Neubau	Fraunhofer ISE	6000-16000	100	7	4300-6300	45	7.8	13.6-49.0
Kernkraft Neubau	IWR/US-NRC 2024	7000-12000	85-105	5-7	7500-8500	60	6.5-8.5	8.0-15.0
Kernkraft Weiterbetrieb	Loviisa/UK	1000-2000	70-90	4-6	7500-8000	20	5.5-6.5	2.5-4.5
GuD Erdgas	Fraunhofer ISE	900-1300	20-23	4-5	4000-6000	30	6.4	1.9-3.5 (+Br.)
GuD Erdgas	VGB PowerTech	850-1100	25-30	30-50	3000-5000	32	6.0-7.0	5.0-8.0 (+Br.)

## LCOE Deutschland basierend auf BDEW/BWE/IWR

Cost ranges for major energy technologies in Germany

Powered by  perplexity



Diese Werte finden sich unter anderem in Studien der International Energy Agency und der OECD Nuclear Energy Agency (Projected Costs of Generating Electricity), in Technologiedaten der IEA-ETSAP-Modelle sowie in akademischen Analysen des Massachusetts Institute of Technology.

**Empirische Bestätigung:** Globale Kernkraftflotte erreicht 82–83% Kapazitätsfaktor (WNA 2024: 7.130–7.270 h), viele Reaktoren >90%; Laufzeitverlängerungen (USA-NRC, Loviisa bis 2050) belegen Realisierbarkeit.

## Literatur (Auswahl)

- International Energy Agency & OECD Nuclear Energy Agency (2020). Projected Costs of Generating Electricity.
- International Energy Agency – ETSAP Technology Brief E03: Nuclear Power.
- Massachusetts Institute of Technology (2018). The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2022). AR6 Working Group III – Mitigation of Climate Change.
- World Nuclear Association – World Nuclear Performance Reports.
- Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems – Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien.

# Anhang C: Simulation eines vollständig erneuerbaren Energiesystems

## C1. Methodische Annahmen

Die Simulation basiert auf einer modellhaften Abbildung eines Stromsystems, das ausschließlich durch Wind- und Solarenergie versorgt wird. Ziel ist es, die zeitliche Übereinstimmung von Stromerzeugung und Nachfrage über ein typisches Kalenderjahr zu analysieren.

Als Grundlage dienen historische Erzeugungsprofile für Wind- und Solarenergie, die auf ein System skaliert werden, dessen installierte Leistung rechnerisch ausreicht, um den jährlichen Strombedarf vollständig zu decken.

Für die Nachfrageseite wird eine standardisierte Lastkurve verwendet, die typische saisonale und tageszeitliche Schwankungen im Stromverbrauch abbildet.

Zusätzlich werden Batteriespeicher mit definierter Kapazität modelliert, um kurzfristige Schwankungen zwischen Erzeugung und Nachfrage auszugleichen. Die Speicher

werden als verlustbehaftet angenommen und ausschließlich zur zeitlichen Verschiebung von Energie eingesetzt.

Die Simulation stellt eine vereinfachte Betrachtung dar. Aspekte wie Netzausbau, sektorübergreifende Flexibilitäten oder internationale Stromflüsse werden nicht berücksichtigt.

## C2. Ergebnisse der Simulation

Die Simulation zeigt, dass trotz ausreichend dimensionierter installierter Leistung aus Wind- und Solarenergie im Jahresverlauf erhebliche zeitliche Diskrepanzen zwischen Stromerzeugung und Nachfrage auftreten.

Insbesondere in den Wintermonaten treten mehrtägige Phasen mit geringer Einspeisung auf, während in den Sommermonaten Überschüsse entstehen.

Auch unter Annahme zusätzlicher Batteriespeicher mit mehrtägiger Kapazität verbleiben Zeiträume, in denen die Nachfrage nicht vollständig durch die modellierte Erzeugung gedeckt werden kann.

Die folgende Betrachtung stellt eine vereinfachte, heuristische Einordnung dar und dient der Illustration relativer Unterschiede zwischen verschiedenen Systemkonfigurationen. Sie ersetzt keine vollständige technoökonomische Bewertung.

### Energiebilanz Deutschland über ein typisches Jahr

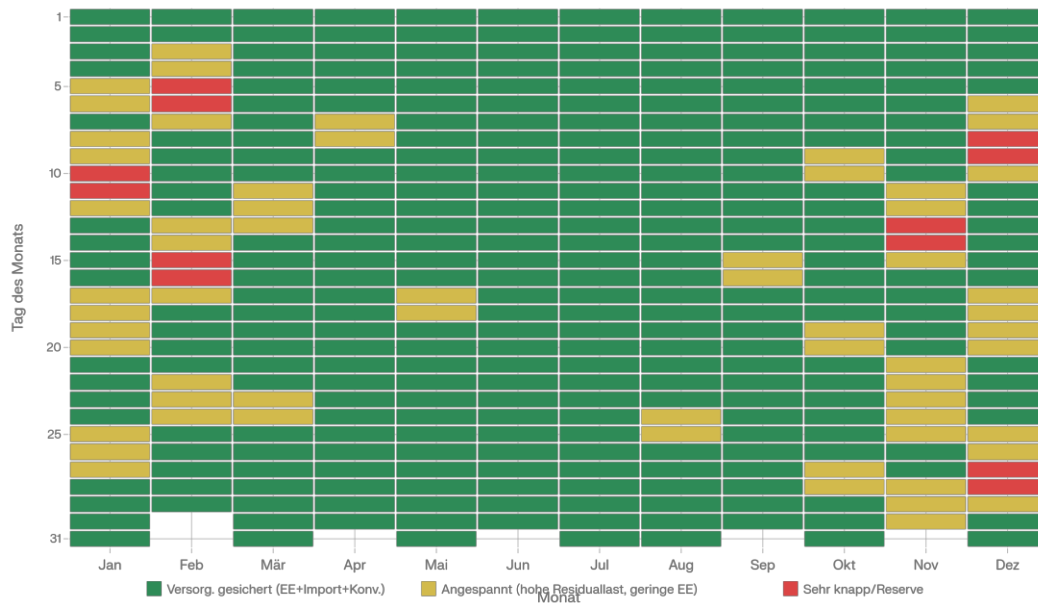
Wind+Solar 1500 TWh/Jahr + 3-Tage-Speicher zeigt Winterlücken



**Zum Vergleich:** Die heutige Stromerzeugung zeigt bei weniger EE-Anteil sogar weniger Deckungslücken.

### Energiebilanz Deutschland - typisches Jahr heute

~60% Erneuerbare + Konventionelle sichern Versorgung ganzjährig



### Anmerkung

2025 wurden über 50% des deutschen Strombedarfs aus Wind und Solar generiert. Rechnerisch könnte also bei einer Verdopplung der installierten Leistung 100% des gesamten Strombedarfs aus Wind und Sonne gedeckt werden.

Die Versorgungssicherheit erfordert jedoch die Bedarfsdeckung zu jeder Zeit, gekoppelt mit Batterien mindestens alle 2 Tage eine 100%+ Erzeugung. Die Heatmap anbei zeigt die Deckungslücken bei verdoppelter Stromproduktion aus Wind und Sonne.

Hieraus folgt rein technisch die Notwendigkeit von Maßnahmen, um die Volatilität auszugleichen.

Dazu zählen:

- Flexibilitäts- und Sicherungskapazitäten: Vorhaltung und Betrieb von Backup-Kraftwerken, Molekülimporte (derzeit fossil, später grün), Reserveleistungen, Schwarzstartfähigkeit
- Netz- und Engpassmanagement: Redispatch, Abregelung von EE, Netzausbau
- Speicher und Lastmanagement: Bau und Betrieb von Speichern, Demand-Side-Management, Power-to-X

Da Batteriespeicher bislang vor allem kurzfristige Schwankungen ausgleichen können, bleiben ergänzende gesicherte Leistungskapazitäten notwendig. Das hat nichts mit fossiler Lobby zu tun, zumal diese auch mit klimaneutralen Molekülen betrieben werden können.

### **C3. Einordnung der Ergebnisse**

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass ein vollständig auf volatilen erneuerbaren Energien basierendes Stromsystem zusätzliche Maßnahmen erfordert, um eine kontinuierliche Versorgung sicherzustellen.

Hierzu zählen insbesondere langfristige Speicherlösungen, flexible Backup-Kapazitäten sowie eine stärkere Systemintegration über Netze und sektorübergreifende Anwendungen. Während kurzfristige Speicher geeignet sind, tageszeitliche Schwankungen auszugleichen, stellen länger andauernde Phasen geringer Einspeisung eine strukturelle Herausforderung dar.

Die wirtschaftliche und infrastrukturelle Skalierbarkeit der notwendigen Maßnahmen ist dabei von zentraler Bedeutung und Gegenstand weiterer Analysen.

## **Anhang D: 24/7 Erneuerbare – Fallbeispiel Masdar**

Das Konzept der „24/7 erneuerbaren Energieversorgung“ zielt darauf ab, Strombedarf zu jedem Zeitpunkt vollständig durch erneuerbare Energiequellen zu decken. Ein prominentes Beispiel hierfür ist das von Masdar entwickelte Modell, das eine Kombination aus Solarenergie, Windkraft und Speichersystemen vorsieht.

Ziel dieses Ansatzes ist es, die zeitliche Diskrepanz zwischen Erzeugung und Nachfrage durch eine intelligente Kombination verschiedener Technologien auszugleichen. Dabei werden insbesondere geografische Diversifikation, unterschiedliche Erzeugungsprofile sowie Speicherlösungen genutzt.

Erste Projekte zeigen, dass eine solche Versorgung technisch grundsätzlich möglich ist, jedoch mit erheblichen Zusatzkosten verbunden sein kann. Insbesondere die erforderlichen Überkapazitäten sowie der Einsatz von Speichern führen zu einer deutlichen Erhöhung der Gesamtkosten im Vergleich zu Systemen mit grundlastfähigen Energiequellen.

Für Anwendungen mit konstant hohem Energiebedarf, wie etwa KI-Rechenzentren, stellt sich daher die Frage nach der wirtschaftlichen Skalierbarkeit solcher Modelle. Während 24/7-Ansätze einen wichtigen Beitrag zur Dekarbonisierung leisten können, bleibt ihre Rolle im Kontext hochgradig energieintensiver und kontinuierlicher Lastprofile Gegenstand weiterer Analysen.

Die folgende Betrachtung stellt eine vereinfachte, heuristische Einordnung dar und dient der Illustration relativer Unterschiede zwischen verschiedenen Systemkonfigurationen. Sie ersetzt keine vollständige technoökonomische Bewertung.

Monat	Standort	PV-Ertrag (Ø GWh/Tag)	Nachtlänge (h)	Batteriebedarf (GWh)	Ladung tagsüber möglich?	1 GW 24/7 möglich?	Ausfallrisiko (geschätzt)
Januar	VEA	26,0	12 h	12,0	✓ Ja	✓ Ja	● <1 % (sehr gering)
	DE	6,7	16 h	16,0	✗ Nein	✗ Nein	● >90 % (sehr hoch)
Februar	VEA	28,5	11,5 h	11,5	✓ Ja	✓ Ja	● <1 %
	DE	10,8	15 h	15,0	✗ Kaum	⚠ Teilweise	● ~60–80 %
März	VEA	32,5	11 h	11,0	✓ Ja	✓ Ja	● <1 %
	DE	27,1	13 h	13,0	✓ Ja (meistens)	✓ Meistens	● ~20–30 %
April	VEA	36,5	10 h	10,0	✓ Ja	✓ Ja	● <1 %
	DE	45,1	11 h	11,0	✓ Ja	✓ Ja	● ~5 %
Mai	VEA	38,2	9,5 h	9,5	✓ Ja	✓ Ja	● <1 %
	DE	45,6	9 h	9,0	✓ Ja	✓ Ja	● ~2 %
Juni	VEA	37,0	9 h	9,0	✓ Ja	✓ Ja	● <1 %
	DE	42,5	8,5 h	8,5	✓ Ja	✓ Ja	● ~5 % (Schlechtwettertage)
Juli	VEA	36,5	9 h	9,0	✓ Ja	✓ Ja	● <1 %
	DE	45,1	9 h	9,0	✓ Ja	✓ Ja	● ~3 %
August	VEA	35,0	9,5 h	9,5	✓ Ja	✓ Ja	● <1 %
	DE	39,0	10 h	10,0	✓ Ja	✓ Ja	● ~5–10 %
September	VEA	34,0	10 h	10,0	✓ Ja	✓ Ja	● <1 %
	DE	28,3	11 h	11,0	✓ Ja (gerade so)	⚠ Teilweise	● ~20–30 %
Oktober	VEA	30,5	11 h	11,0	✓ Ja	✓ Ja	● <1 %
	DE	12,7	13,5 h	13,5	✗ Nein	✗ Nein	● >80 %
November	VEA	27,0	11,5 h	11,5	✓ Ja	✓ Ja	● <1 %
	DE	8,2	15 h	15,0	✗ Nein	✗ Nein	● >90 %
Dezember	VEA	25,0	12 h	12,0	✓ Ja	✓ Ja	● <1 %
	DE	4,3	16 h	16,0	✗ Nein	✗ Nein	● >95 %

### ● Legende für Ausfallrisiko (vereinfacht geschätzt)

- <1 % = **praktisch nie** (extrem stabile Sonne, wie in VEA)
- 1–10 % = **selten**, meist durch Wetterextreme
- 10–30 % = **häufige Tage mit Unterdeckung**
- >80 % = **systemische Unterdeckung**, 24/7 Betrieb nicht machbar

## Detail

Mit Masdar 24/7 errichten die Vereinigten Arabischen Emirate das erste Großkraftwerk der Welt, das ausschließlich mit Photovoltaik und Batteriespeichern eine stabile 24/7-Stromversorgung bereitstellt – ohne fossile Reserve, ohne Windkraft.

### Das Projekt liefert dauerhaft 1 Gigawatt Leistung, gespeist aus:

- 5,2 GWp Photovoltaik
- 19 GWh Lithium-Ionen-Batteriespeicher
- Standort: Abu Dhabi, VAE – eine Region mit über 2.000 kWh/m<sup>2</sup>/a Solarstrahlung

### Kosten & Wirtschaftlichkeit:

- Gesamtinvestition: ca. 5 Mrd. US-Dollar (offiziell angegeben)
- Kapazitätsfaktor 24/7-Betrieb: ~87–90 % (dank Speicher)
- Stromgestehungskosten (LCOE, gesichert):
- ~3–4 ct/kWh – für kontinuierliche Lieferung, 365 Tage im Jahr
- PV allein: ~1,5 ct/kWh (Weltrekordniveau)

Diese niedrigen Gestehungskosten sind durch folgende Faktoren möglich:

- Gigantischer Maßstab → Skaleneffekte
- Hohe Sonneneinstrahlung + stabile Wetterverhältnisse
- Staatlich unterstützte Infrastruktur + günstige Finanzierung

### **Bedeutung & Grenzen**

Masdar 24/7 zeigt, dass unter optimalen Bedingungen eine vollständig solarerzeugte gesicherte Leistung möglich ist – zu einem Bruchteil der Kosten konventioneller Kraftwerke.

**Anmerkung:** In sonnenärmeren Regionen (wie Mitteleuropa) wäre ein solches Modell technisch nur mit massiver Überdimensionierung und extrem hohen Kosten realisierbar.

## **Quellenangaben – Masdar 24/7 Vergleich**

### **1. Global Solar Atlas – World Bank**

→ Solare Einstrahlungsdaten weltweit, u. a. für Abu Dhabi

 <https://globalsolaratlas.info/>

### **2. Masdar Projektinformationen (2024/2025)**

→ Angaben zur Leistung: 5,2 GWp PV + 19 GWh Batterie

 <https://masdar.ae/>


### **3. Fraunhofer ISE – Energy Charts**

→ Reale Erzeugungsdaten deutscher PV-Anlagen (stunden- & monatsweise)

 <https://energy-charts.info/>

### **4. Open Power System Data (OPSD)**

→ Historische Einspeisewerte & Lastdaten für Deutschland

 <https://data.open-power-system-data.org/>

### **5. Dunkelflauten-Analyse – Agora Energiewende**

→ Typische Wetterlagen mit geringer Stromerzeugung über mehrere Tage

 <https://www.agora-energiewende.de/>


### **6. Deutscher Wetterdienst (DWD)**

→ Sonnenstunden, Tag-/Nachtlängen, Bewölkungsstatistiken

 <https://www.dwd.de/>

### **7. NOAA Astronomical Calculators**

→ Berechnung von Sonnenauf-/untergangszeiten nach Breitengrad

 <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/>

### **8. BMWK – Langfristszenarien zur Transformation des Energiesystems**

→ Studien zur Versorgungssicherheit, Speicherbedarf & Ausbaupfade

 <https://www.bmwk.de/>

### **9. DENA – Deutsche Energie-Agentur**

→ Analysen zur Versorgungssicherheit und Bedarf an Flexibilitäten

 <https://www.dena.de/>

## Anhang E: Einordnung der Energieanforderungen für KI-Infrastruktur

Die vorangegangenen Analysen verdeutlichen, dass die Energieversorgung eine zentrale Voraussetzung für den Betrieb und die Skalierung von KI-Infrastrukturen darstellt. Insbesondere die Kombination aus wachsendem Strombedarf und hohen Anforderungen an Verfügbarkeit und Planbarkeit führt zu einer Verschärfung der systemischen Anforderungen an das Energiesystem.

Die Betrachtung von LCOE, Systemkosten und Versorgungsmodellen zeigt, dass die Transformation hin zu einem klimaneutralen Energiesystem mit erheblichen Herausforderungen verbunden ist, insbesondere wenn gleichzeitig eine kontinuierliche und skalierbare Energieversorgung gewährleistet werden muss.

Für Deutschland und Europa ergibt sich daraus die Notwendigkeit, Energiepolitik und Infrastrukturentwicklung stärker mit den Anforderungen digitaler Technologien zu verzahnen. Die Sicherstellung einer zuverlässigen, wirtschaftlichen und nachhaltigen Energieversorgung wird damit zu einem entscheidenden Faktor für die langfristige Wettbewerbsfähigkeit im globalen KI-Wettbewerb.

