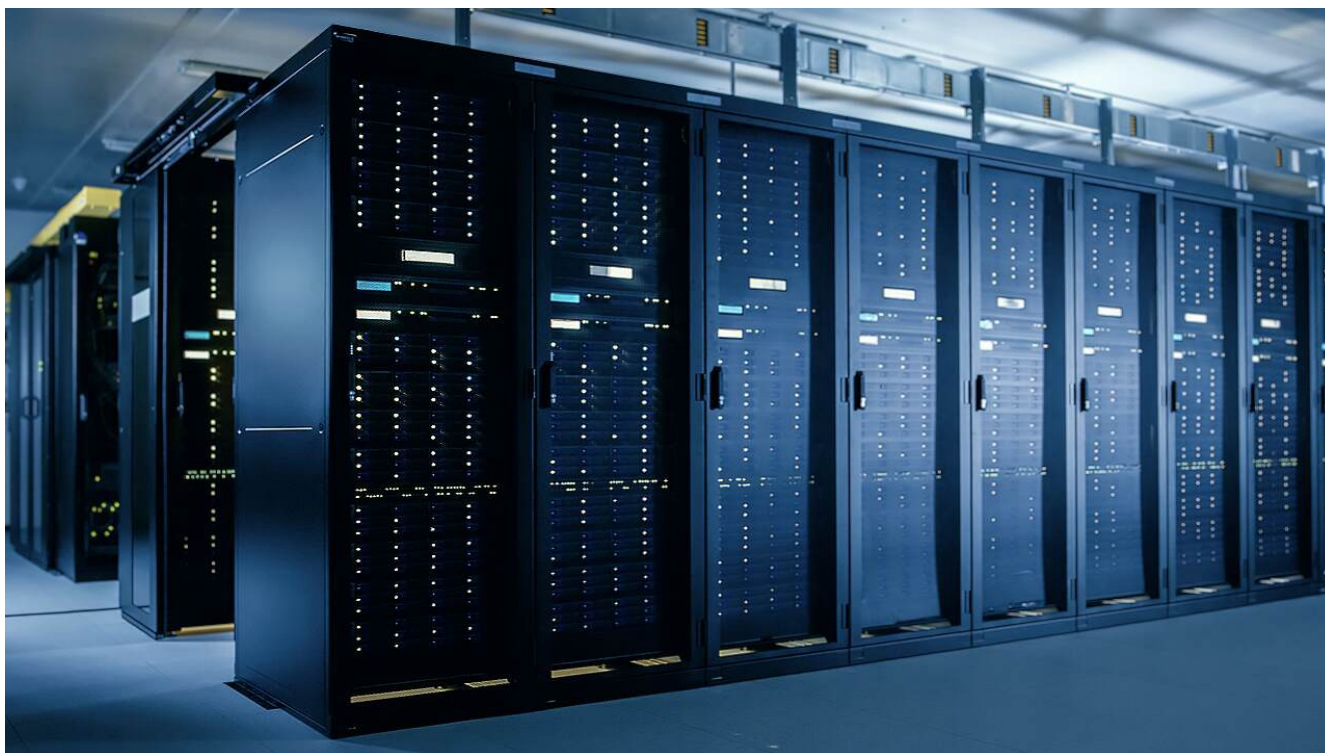


## Technical Article

# Die Weiterentwicklung von Rechenzentren angesichts des enormen Strombedarfs von KI



Brent McDonald, systems and applications engineer, Texas Instruments



Mit Large Language Models, die den Datenzugriff grundlegend verändern, revolutionieren Innovationen im Bereich künstliche Intelligenz (KI), wie Branchen und Gesellschaften die Rechenleistungskapazitäten von Rechenzentren nutzen. Anstatt bestimmte Schlüsselwörter in eine Suchmaschine einzugeben, können wir nun einfach KI eine Frage stellen, wie wir es bei einem menschlichen Gegenüber machen würden, und erhalten eine detaillierte Antwort. Natürlich ist dies nur die Spitze des Eisbergs, was die Fähigkeiten von KI betrifft. KI schreibt auch Code, erzeugt Bilder und Videos und transkribiert und fasst Meetings zusammen. All diese KI-Funktionen erfordern deutlich höhere Strommengen.

Um diese Energieanforderungen zu erfüllen und sicherzustellen, dass KI ihr volles Potenzial ausschöpfen kann, muss man bedenken, wie das IT-Server-Rack in einem Rechenzentrum aufgebaut ist und wie diese Leistung am besten erzeugt und bereitgestellt werden kann. Dieser Artikel behandelt die Erzeugung und Bereitstellung von Energie für die Serverfunktionen in Rechenzentren, die das Computing übernehmen; warum die Stromverteilungsarchitektur geändert werden muss, um die sich schnell entwickelnden Anforderungen an KI-Computing und Stromversorgung zu erfüllen, und wie dies ermöglicht werden kann.

**Abbildung 1** zeigt die Stromanforderungen auf Ebene des IT-Server-Racks an, die in Abhängigkeit von der Zeit erforderlich sind. **Abbildung 1** sagt vorher, dass ein IT-Rack im Jahr 2028 1,5 MW benötigen wird – 10-mal mehr Energie als heute.

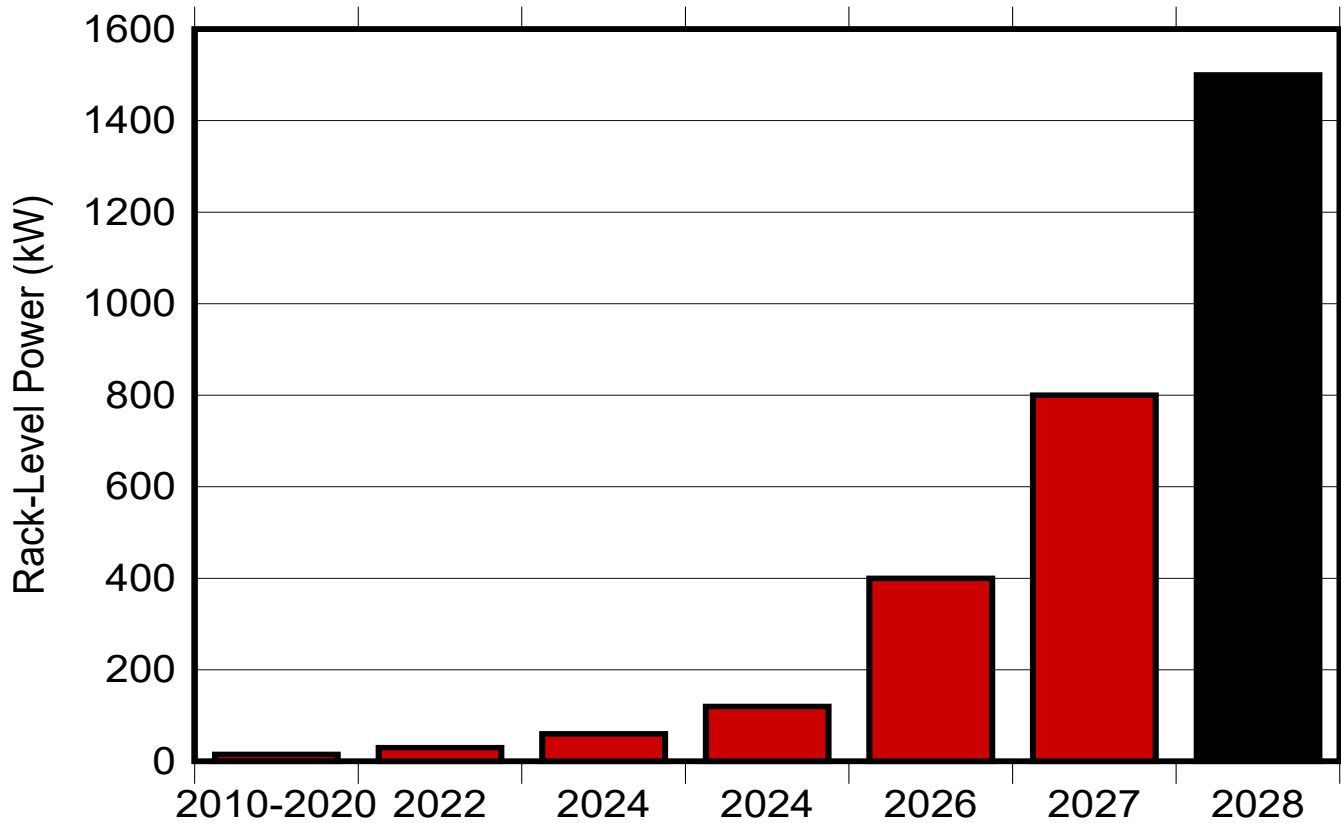


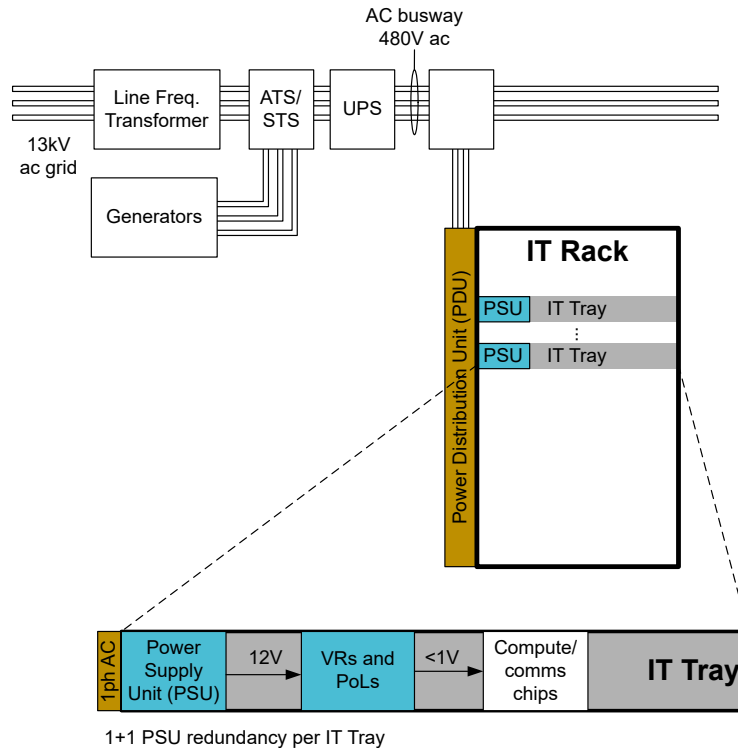
Abbildung 1. Stromanforderungen auf Rack-Ebene

### Eine kurze Geschichte

Um den Umfang der Veränderungen im Stromversorgungsnetz in Rechenzentren und Servern richtig einzuordnen, lassen Sie uns kurz die aktuelle Architektur betrachten. [Abbildung 2](#) zeigt die Architektur einer Stromverteilung der ersten Generation, wie sie seit den 1990er-Jahren bis heute Server und Rechenzentren dominiert. Der obere linke Bereich von [Abbildung 2](#) zeigt den Dreiphasenstrom aus dem Wechselstromnetz. Diese Leistung wird von einer „Mittelspannung“ von ca. 13 kV in eine Wechselstrom-Phase-zu-Phase-Spannung von 480 V umgewandelt. Eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) puffert diese Spannung.

Wenn das Wechselstromnetz ausfällt, verwendet die USV lokale Batterien und eine Wechselrichterfunktion, um die Server des Rechenzentrums so lange in Betrieb zu halten, dass die Backup-Generatoren übernehmen können. Dazu wird entweder ein automatischer Transferschalter (ATS) oder ein statischer Transferschalter (STS) verwendet. Die Wechselstrom-Leitungsspannung von 480 V entspricht einer Phase-zu-Neutral-Spannung von 277 V<sub>AC</sub>.

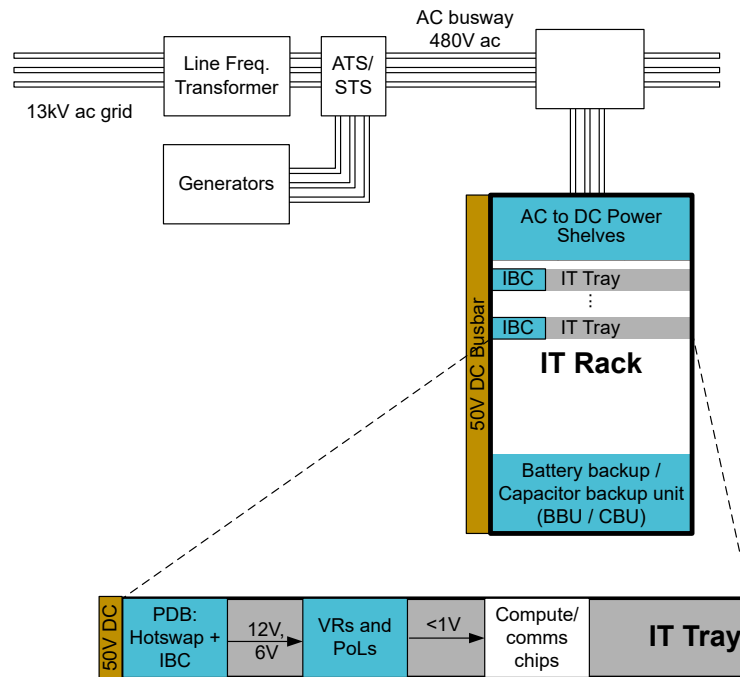
Nach der Breitstellung der drei Phasen des 277 V<sub>AC</sub> an das IT-Server-Rack führt ein Netzteil (PSU) eine Leistungsfaktorkorrektur (PFC) durch und erzeugt einen geregelten 12-V-Ausgang zur Verteilung an die IT-Server-Trays. Diese 12-V-Verteilungsspannung für Architekturen der ersten Generation versorgt verschiedene Lasten, Spannungsregler und andere Point-of-Load-Regler (PoL), wodurch Spannungen zur Stromversorgung der Prozessoren, Speicher und integrierten Kommunikationsschaltungen erzeugt werden, die in den Server-Trays verwendet werden. Diese Architektur funktionierte gut, als die gesamte Rack-Leistung etwa 10 kW bis 20 kW betrug. Mit der wachsenden Nachfrage nach mehr Rechenleistung steigt auch die zur Bewältigung dieser Rechenfunktionen erforderliche Strommenge.



**Abbildung 2. Herkömmliche Rack-Server der ersten Generation**

**Abbildung 3** zeigt die nächste Entwicklungsstufe der Stromverteilerarchitektur für Rechenzentren. Ausgehend vom linken oberen Bereich von **Abbildung 3** beginnt diese Architektur mit derselben Mittelspannungs-Eingangsstromquelle. Wie die Architektur der ersten Generation wandeln Transformatoren von dreiphasigen 13 kV in eine Phase-zu-Phase-Spannung von 480 V<sub>AC</sub> um. Diese Architektur verwendet keine USV, sondern sendet stattdessen die äquivalente Phase-zu-Neutral-Spannung von 277 V<sub>AC</sub> direkt an lokale Netzteile im IT-Rack. Diese Netzteile sind nicht mehr für jedes Server-Tray vorgesehen, sondern in einem einzigen Stromregal kombiniert. In diesem Kontext ist ein Stromregal einfach ein Regal von Netzteilen, deren Ausgänge die gemeinsamen Lastanforderungen der IT-Geräte teilen.

In der Regel gibt es in jedem Stromregal sechs Netzteile in einer N+1-Konfiguration, um Redundanz zu erreichen. Durch das Hinzufügen von Stromregalen wird die erforderliche Gesamtleistung für das IT-Rack erreicht. Der Ausgang dieser Stromregale ist ein 50-V<sub>DC</sub>-Bus, der über eine Hochstrom-Sammelschiene an der Rückseite des Server-Racks an jedes IT-Tray verteilt wird. Während einige Installationen der zweiten Generation die USV-Funktion beibehalten, entfällt sie bei anderen (wie in **Abbildung 3**) und wird durch eine lokale Batterie-Backup-Einheit (BBU) ersetzt, die den 50-V<sub>DC</sub>-Bus aktiv hält, bis die Stromversorgung wiederhergestellt ist oder die Backup-Generatoren übernehmen können. In einigen Fällen kann ein Kondensator-Regal oder eine Kondensator-Backup-Einheit (CBU) dazu beitragen, übermäßige Spannungstransienten und Stromtransienten im Zusammenhang mit Leistungsunterbrechungen zu beseitigen. Der 50-V-Bus läuft in jedem IT-Tray zu einem lokalen Zwischenbus-Konverter, der die 12 V erzeugt, die für die Stromversorgung der Systemlasten in den IT-Trays erforderlich sind.



**Abbildung 3. Zweite Generation – Cloud- und KI-Computing**

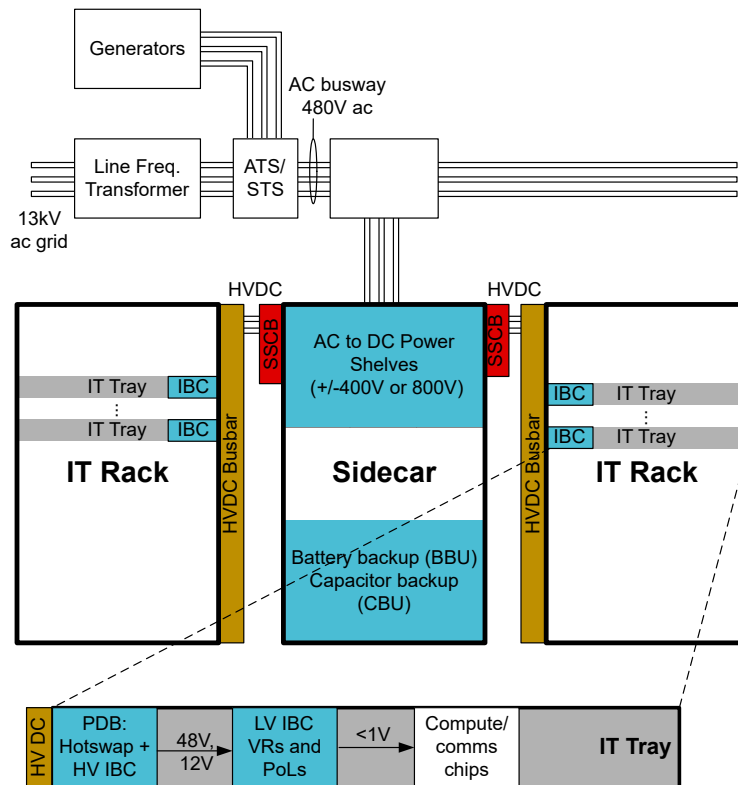
Mit einer Architektur der zweiten Generation kann das IT-Rack Lasten versorgen, die über das hinausgehen, was die erste Generation leisten kann. Realistische Lasten für die zweite Generation liegen im Bereich von 100 kW. Sobald die erforderliche Gesamtleistung etwa 200 kW erreicht, werden die Verteilungsverluste erheblich und weitere Leistungssteigerungen nicht praktikabel.

### Stromversorgung für KI-Rechenzentren

Rechenzentrum-Racks für die Ausführung fortschrittlicher KI-Modelle sollen 2028 einen Energiebedarf von 1 MW erreichen. Die Verteilung dieser Leistung in einer Architektur der zweiten Generation würde bei einer 50-V-Sammelschiene eine Stromstärke von 20.000 A erfordern. Eine für die Bereitstellung solch einer hohen Strommenge erforderliche Sammelschiene ist schwer, kostspielig und sehr unpraktisch. Daher werden die Anforderungen an die Hochstrom-Sammelschiene mittels eines Busses mit einer höheren Spannung von 800 V<sub>DC</sub> oder ±400 V<sub>DC</sub> zur Stromverteilung in neuen KI-IT-Server-Racks von 20 kA auf 1,25 kA reduziert. Die Verringerung der Stromstärke in dieser Größenordnung trägt dazu bei, die Effizienz der allgemeinen Stromversorgung zu erhöhen und den Einsatz einer Kupfersammelschiene mit geringerem Volumen und geringerer Dichte zu ermöglichen. [Abbildung 4](#) zeigt diese Architektur.

Das Stromregal einer Architektur der zweiten Generation wird durch einen Beiwagen ersetzt, der die dreiphasige Nspannung von 480 V<sub>AC</sub> als Eingang nimmt. Der Beiwagen wandelt diese in 800 V<sub>DC</sub> oder ±400 V<sub>DC</sub> für den Bus um und verteilt sie an ein oder mehrere IT-Server-Racks. Der Beiwagen beherbergt auch die BBU. Die Architektur der dritten Generation steigert nicht nur die Effizienz der Stromverteilung, sondern lässt auch mehr Platz im IT-Rack für Rechenfunktionen.

In gewisser Weise ist die Erhöhung der Rechendichte des IT-Server-Racks noch kritischer als das Problem der Stromverteilung. KI-basierte IT-Racks verwenden Hunderte von Prozessoren, um die große Menge an Berechnungen, die für das optimale Funktionieren von KI erforderlich sind, schnell zu verarbeiten. Diese Prozessoren müssen untereinander mit hoher Dichte kommunizieren können. Indem ein großer Teil der Stromwandlung aus dem IT-Rack entfernt wird, können mehr Prozessoren auf kleinerem Raum untergebracht werden. Jetzt erhält jedes IT-Tray im Rack einen Eingang von 800 V<sub>DC</sub> oder ±400 V<sub>DC</sub> Busspannung. Der Zwischenbuskonverter im Tray wandelt diese Spannung dann für die Verteilung im IT-Tray um. Die Verteilungsspannung kann je nach gewählter Architektur 48 V, 12 V oder sogar 6 V betragen.

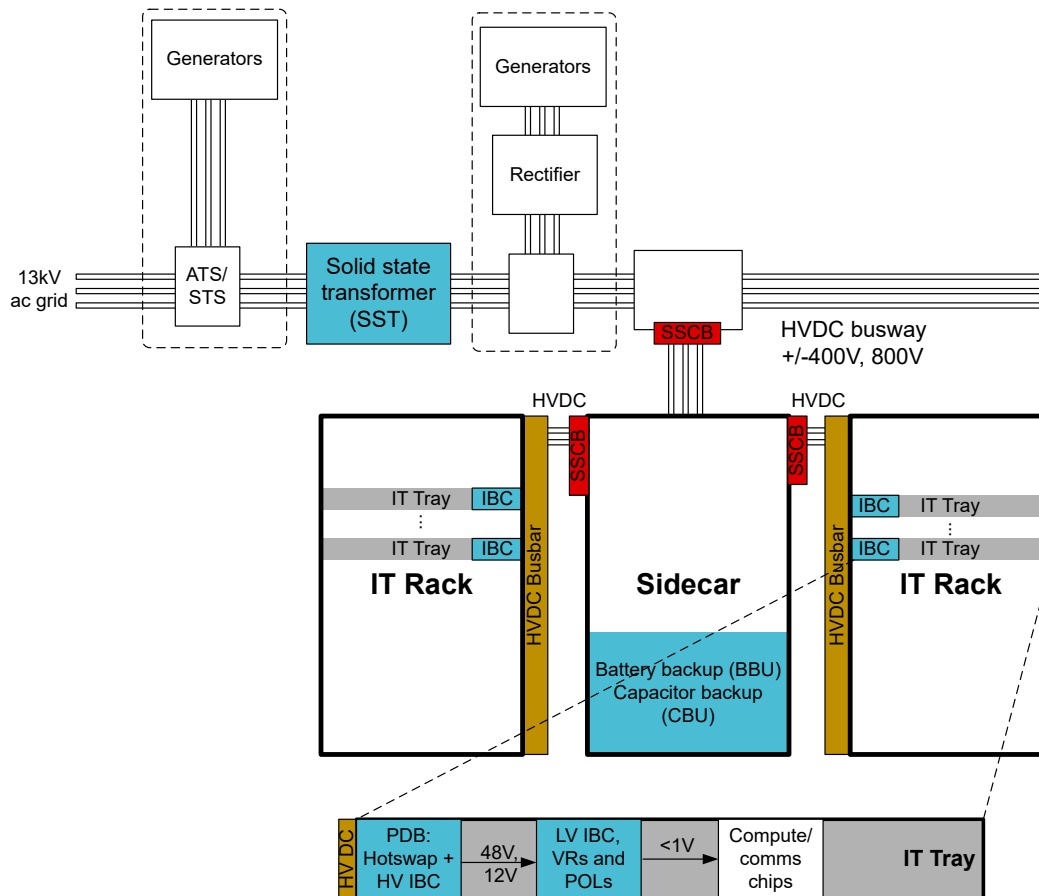


**Abbildung 4. Dritte Generation – DC-Verteilungsbeiwagen für KI-Computing**

### Was hält die Zukunft bereit?

Architekturen der dritten Generation sind zwar sehr effizient bei der Verbesserung der Stromverteilung und der signifikanten Erhöhung der Berechnungsdichte im IT-Rack, erfordern dafür aber mehr Platz im IT-Bereich des Rechenzentrums. Infolgedessen verlagert der nächste Entwicklungsschritt des Rechenzentrums die AC/DC-Stromwandlungsfunktionen des Beiwagens vom IT-Bereich in einen Versorgungsraum.

**Abbildung 5** zeigt einen Vorschlag für eine Architektur der vierten Generation. In dieser Architektur beherbergt der Beiwagen die BBU-Funktionen, und die AC/DC-Funktion wurde in einen Halbleitertransformator (SST) verschoben. In der ersten, zweiten und dritten Generation ist die Eingangsspannung die vom Netz bereitgestellte 13-kV-Mittelspannung. Sie wird in einen dreiphasigen 480-V<sub>AC</sub>-Verteilungsbuss umgewandelt, der dann in die DC-Verteilungsbussspannung umgewandelt wird. Der SST ersetzt sowohl die 13-kV-Transformatoren als auch die Stromwandlung von 480 V<sub>DC</sub> auf 800 V<sub>DC</sub> oder  $\pm 400$  V<sub>DC</sub>. Der SST erfüllt die PFC-Funktion, die Spannungsabwärtswandlung und die Umwandlung in DC in einer einzigen Leistungswandlungsstufe. Die Backup-Generatoren müssen jetzt über einen AC/DC-Wandler an den Mittelspannungsknoten oder den Ausgang des SST angeschlossen werden. Das Ergebnis ist ein effizienteres Stromverteilungsnetz und mehr Platz im IT-Bereich für die Computertechnik.



**Abbildung 5. Vierte Generation – KI-Computing mit SST und DC-Verteilung**

### Die erforderlichen Technologien

Die Erstellung jeder Stromverteilung benötigt eine große Anzahl hochentwickelter Stromwandlungsfunktionen. Zu diesen Funktionen gehören unter anderem PFC, die DC/DC-Wandlung auf 800 V<sub>DC</sub> oder ±400 V<sub>DC</sub>, Dioden-ODER-Verknüpfung, Stromverteilung, Hot-Swap, Schutz, Steuerung und Strommessung. Fortschrittliche Halbleiter sind der Schlüssel für jede dieser Funktionen, da sie mit höchstmöglicher Leistung und Effizienz arbeiten können. Beispiel:

- Die Ausführung des PFC und die Erzeugung der DC-Busspannungen erfordern Echtzeit-Mikrocontroller [1].
- Die Aktivierung von Topologien wie Induktor-Induktor-Kondensator (LLC) und PFC erfordert hocheffiziente Halbleiterschalter mit großer Bandlücke [2].
- Die Unterstützung von Stromzählung, Steuerung und Schutz erfordert eine genaue Strom- und Spannungsmessung [3].
- Die Stromversorgung der verschiedenen isolierten Schalter im System erfordert hocheffiziente, kompakte Vorspannungs-Stromversorgungen [4] und Gate-Treiber [5].

### Fazit

KI verändert, wie wir mit Informationen und Daten interagieren. Um den Anforderungen an die Stromwandlung gerecht zu werden, benötigen Rechenzentren neue Stromverteilungsarchitekturen.

In den zukünftigen Teilen dieser Reihe werden die Netzteile ausführlich untersucht, die Energiespeicherung besprochen und die Trends bei Zwischenbuswandlern und Spannungsreglern sowie die wichtigsten Technologien und Halbleiter, die sie ermöglichen, behandelt.

## Quellennachweise

1. Texas Instruments. o. D. [C2000™ real-time microcontrollers](#). Abgerufen am 29.07.2025.
2. Texas Instruments. o. D. [Gallium nitride \(GaN\) power stages](#). Abgerufen am 29.07.2025.
3. Texas Instruments. o. D. [Webseite für isolierte ADCs](#). Abgerufen am 29.07.2025.
4. Texas Instruments. o. D. [Isolated power modules \(integrated transformer\)](#). Abgerufen am 29.07.2025.
5. Texas Instruments. o. D. [Isolated gate drivers](#). Abgerufen am 29.07.2025.

## Weitere Ressourcen

- Lesen Sie auch den Artikel [Fünf wichtige Trends bei der Entwicklung von Stromversorgungslösungen für Server](#).
- Lesen Sie die folgenden Artikel in Data Center Frontier, [Grid-to-Gate: A Framework for Understanding Power-Management Challenges](#) und [High-Voltage DC Power: The Future of Data Center Power Architecture](#).
- Lesen Sie auch DataCenter Knowledge: [High-Voltage DC: The Power Solution for AI Data Centers](#).
- Sehen Sie sich das Video [±400VDC Rack Power System for ML AI Application](#) an.

## Marken

All trademarks are the property of their respective owners.



## WICHTIGER HINWEIS UND HAFTUNGSAUSSCHLUSS

TI STELLT TECHNISCHE UND ZUVERLÄSSIGKEITSDATEN (EINSCHLIESSLICH DATENBLÄTTER), DESIGNRESSOURCEN (EINSCHLIESSLICH REFERENZDESIGNS), ANWENDUNGS- ODER ANDERE DESIGNBERATUNG, WEB-TOOLS, SICHERHEITSINFORMATIONEN UND ANDERE RESSOURCEN „WIE BESEHEN“ UND MIT ALLEN FEHLERN ZUR VERFÜGUNG. UND SCHLIESST ALLE AUSDRÜCKLICHEN UND STILLSCHWEIGENDEN GEWÄHRLEISTUNGEN AUS, EINSCHLIESSLICH UND OHNE EINSCHRÄNKUNG ALLER STILLSCHWEIGENDEN GEWÄHRLEISTUNGEN DER MARKTGÄNGIGKEIT, DER EIGNUNG FÜR EINEN BESTIMMTEN ZWECK ODER DER NICHTVERLETZUNG VON RECHTEN

Diese Ressourcen sind für qualifizierte Entwickler gedacht, die mit TI-Produkten entwickeln. Sie allein sind verantwortlich für (1) die Auswahl der geeigneten TI Produkte für Ihre Anwendung, (2) das Design, die Validierung und den Test Ihrer Anwendung und (3) die Sicherstellung, dass Ihre Anwendung die geltenden Normen sowie alle anderen Sicherheits- und sonstigen Anforderungen erfüllt.

Diese Ressourcen können jederzeit und ohne Vorankündigung geändert werden. Sie erhalten von TI die Erlaubnis, diese Ressourcen ausschließlich für die Entwicklung von Anwendungen mit den in der Ressource beschriebenen TI-Produkten zu verwenden. Jede andere Vervielfältigung und Darstellung dieser Ressourcen ist untersagt. Es wird keine Lizenz für andere Rechte am geistigen Eigentum von TI oder an Rechten am geistigen Eigentum Dritter gewährt. TI übernimmt keine Verantwortung für und Sie schützen TI und seine Vertreter gegen Ansprüche, Schäden, Kosten, Verluste und Verbindlichkeiten, die sich aus Ihrer Nutzung dieser Ressourcen ergeben.

Produkte von TI werden gemäß den [Verkaufsbedingungen von TI](#), den allgemeinen [Qualitätsrichtlinien von TI](#), oder anderen geltenden Bedingungen, die entweder auf [ti.com](https://www.ti.com) verfügbar sind oder in Verbindung mit solchen TI-Produkten bereitgestellt werden. Durch die Bereitstellung dieser Ressourcen durch TI werden die geltenden Garantien oder Gewährleistungsausschlüsse von TI für TI-Produkte weder erweitert noch verändert. Sofern TI ein Produkt nicht ausdrücklich als kundenspezifisch oder nach Kundenwunsch gefertigt bezeichnet, handelt es sich bei TI-Produkten um Standard-, Katalog- und Allzweckgeräten.

TI widerspricht allen zusätzlichen oder abweichenden Bedingungen, die Sie möglicherweise vorschlagen und lehnt sie ab.

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

Letzte Aktualisierung 10/2025



## IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATASHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you fully indemnify TI and its representatives against any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to [TI's Terms of Sale](#), [TI's General Quality Guidelines](#), or other applicable terms available either on [ti.com](https://www.ti.com) or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products. Unless TI explicitly designates a product as custom or customer-specified, TI products are standard, catalog, general purpose devices.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may propose.

Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated

Last updated 10/2025