

1

Topologien von Niederspannungs-Gleichstromnetzen

Die Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik (DKE) arbeitet seit einigen Jahren an der „Deutsche Normungs-Roadmap: Gleichstrom im Niederspannungsbereich“ [1]. Der Bereich der Niederspannung reicht bei Gleichspannung bis 1500 V. In den internationalen Normen findet man diesen Gleichspannungsbereich unter dem Begriff „Low Voltage Direct Current (LVDC)“. Die Normungs-Roadmap behandelt im Wesentlichen vier Hauptgruppen. Im Anschluss an wirtschaftliche und rechtliche Rahmenbedingungen befasst sie sich mit der Sicherheit, Schutzkonzepten und Netzstrukturen. Danach wird näher auf Anlagentopologien und Anwendungsfälle eingegangen, bevor das letzte Kapitel über Betriebsmittel und Komponenten die Normungs-Roadmap inhaltlich abrundet [1]. Eine wesentliche Grundlage für die Normungs-Roadmap sind die Betriebsspannungen und die Abnahmeleistungen.

■ 1.1 Betriebsspannungen und Abnahmeleistungen

In Gleichstromnetzen ist im Gegensatz zu Dreh- und Wechselstromnetzen der Bereich der verwendeten Betriebsspannungen groß. In Deutschland findet man bei Wechselstromnetzen nur noch 230 V und bei Drehstromnetzen nur noch 400 V. In einigen Industrienetzen werden außerdem 500 V bzw. 690 V verwendet. Bei Gleichstrom reichen dagegen die Betriebsspannungen in der Anwendung von Kleinspannungen unter 50 V bis zu 1000 V und mehr:

- 1000-V-Photovoltaik-Anlagen für einige 10 MW (teilweise bis 1500 V)
- 750-V- bzw. 660-V-Nahverkehrsbahnen
- 400-V-Ladeinfrastrukturen für Hochvolt-Elektrofahrzeuge (350 V bis 400 V)
- 380-V-Gleichstromnetze für Bürogebäude
- 380-V-Stromversorgung für große Rechenzentren (bipolar ± 190 V)
- 230-V-Hausinstallation von Wohngebäuden
- 220-V-Gleichstromanlagen für Steuerung, Regelung, Schutz, Messung und Automatisierung von Schaltanlagen und Kraftwerken

- 120-V-Bahnanwendungen
- 75-V-Kleinspannungsanwendungen
- 48-V-Stromversorgung für unfallgefährdete Bereiche in Wohngebäuden, wie z. B. für sichere Kinderzimmer oder Badezimmer
- 48-V-Stromversorgung als Netzinsel für netzferne Gebiete wie z. B. Wohngebäude in Entwicklungsländern und auch für Almhütten und Ferienhäuser
- 48-V-Bordnetze für Verbrennungskraftfahrzeuge
- 24/12-V-Netz für Beleuchtungen in Gebäuden und klassische Kfz-Bordnetze

Bis auf die singulären 1000-V-Photovoltaik-Anlagen können alle genannten Betriebsspannungen in Bereichen zur Anwendung kommen, in denen elektrotechnische Laien Anlagen und Geräte betreiben bzw. nutzen. Daher müssen diese aus Gründen der Personensicherheit einer besonderen Betrachtung unterzogen werden. Eine Besonderheit ist das mobile durch einen Akkumulator gespeiste Bordnetz eines Kraftfahrzeugs bzw. eines Elektrofahrzeugs. Durch die hohe Standzeit solcher Fahrzeuge wäre es von Vorteil, wenn die Akkumulatoren dieser Fahrzeuge als Speicher für den Netzbetrieb genutzt werden könnten, beispielsweise mit bidirektionalem AC-DC-Wandler [3] [4]. Bordnetzspannungen bei Elektrofahrzeugen reichen heute von 200 V für Kleinwagen bis zu 800 V für Oberklassewagen.

Die Dimensionierung und Auslegung dieser Niederspannungsnetze ist von der Abnahmeleistung der Verbraucher abhängig. Bei Gleichstromnetzen liegen die Abnahmeleistungen meist im Bereich von einigen 100 W bis einigen 1000 W. Insbesondere bei der Stromversorgung von Bürogebäuden und Rechenzentren sind sogar einige 100 kW und mehr Abnahmeleistung gefordert.

Eine nur geringe Abnahmeleistung von **100 W** erreicht man, wenn wie in Entwicklungsländern als Gleichstromverbraucher nur LED-Beleuchtungen, Ladegeräte für Mobiltelefone und ein TV-Gerät zum Einsatz kommen. Werden Geräte mit höherer Abnahmeleistung genutzt, wie z. B. Ventilatoren oder Kühlschränke, ergeben sich etwa **400 W**. Auch ein Elektroller mit einem 1,5-kWh-Akkumulator könnte darüber geladen werden. Mit einer Abnahmeleistung von **2000 W** muss man beim Einsatz von Staubsaugern und Waschmaschinen rechnen. Für den klassischen Bereich der Gebäudestromversorgung kann eine Abnahmeleistung von **4000 W** (z. B. Föhn, Kaffeemaschine, Mikrowellen- und/oder Elektroherd) angenommen werden (siehe Tabelle 8.1). Mit dieser Leistung könnte sogar eine einphasige Ladestation für **3,7 kW** für ein Elektrofahrzeug betrieben werden (230 V, 16 A). Höhere Leistungen ergeben sich, wenn zwei einphasige Anschlüsse für maximal **7,4 kW** (zweimal 230 V, 16 A) oder dreiphasige Drehstromanschlüsse für maximal **11 kW** (dreimal 230 V, 16 A) benötigt werden.

■ 1.2 Hybride Gleich- und Wechselstromsysteme

Gleich- und Wechselstromsysteme sind häufig hybrid aufgebaut, d. h., sie sind direkt miteinander gekoppelt. Wechsel- und Gleichstrombetriebsmittel sind an ein und derselben

Verteilung angeschlossen. Grundsätzlich können Betriebsmittel für Gebäudestromversorgungen in elektrischen Anlagen und Komponenten, die zur Stromeinspeisung, Stromverteilung sowie zur Stromanwendung dienen, unterteilt werden:

- Stromeinspeisung: Netzanschluss, Photovoltaik, Windenergieanlagen, Akkumulatoren
- Stromverteilung: Verteilerschränke, Schutzeinrichtungen, Leitungsnetz
- Stromanwendung: Motoren, Heizsysteme, Leuchtmittel, Aufzüge, Akkumulatoren

Dabei ist zu beachten, dass Stromspeicher, wie wiederaufladbare Akkumulatoren, sowohl Einspeiser als auch Verbraucher sind und unter Umständen auch ein autarker, vom Netz getrennter Betrieb des Netzes stattfindet. Aus diesem Grund müssen bei der Betrachtung von Gleichstromnetzen, insbesondere bei der Dimensionierung der Leitungen und der Schutzeinrichtungen, die unterschiedlichen Betriebsweisen Abnahmebetrieb, Einspeisebetrieb sowie der autarke Betrieb berücksichtigt werden.

1.2.1 Drehstromnetze mit Gleichstromkomponenten

Gleichstrom-Teilnetze in Verbindung mit großen Drehstromnetzen können eine Vielzahl sehr unterschiedlicher Anlagen und Komponenten enthalten. Bild 1.1 zeigt ein großes Drehstromnetz mit direkt über einen Wechselrichter verbundenen Gleichstromkomponenten, wie eine Photovoltaik-Anlage und einen Akkumulator. Gleichstromlasten gehören auch dazu. Die Synchronisation der Gleichstromkomponenten erfolgt mit fremdgeführten Wechselrichtern mit Hilfe der Wechselspannung. Die Erfahrung mit solchen Niederspannungsnetzen zeigt, dass das Zusammenspiel von Drehstrom- bzw. Wechselstromkomponenten mit Gleichstromkomponenten technisch mittlerweile kein Problem mehr darstellt. Soll eine Notstromversorgung möglich sein, muss ein selbst geführter Wechselrichter eingesetzt werden.

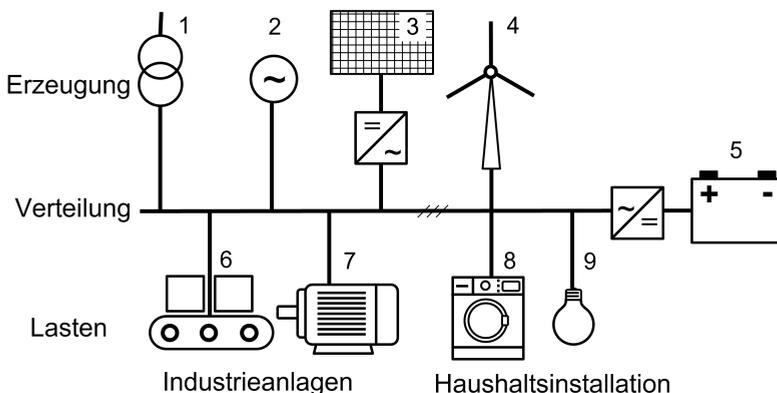


Bild 1.1 Topologie eines hybriden elektrischen Niederspannungsnetzes:

(1) Netzanschluss, (2) Generator, (3) Photovoltaik-Anlage, (4) Windenergieanlage, (5) Akkumulatorsystem, (6) Fließband, (7) Elektromotor, (8) Waschmaschine, (9) Beleuchtung

1.2.2 Wechselstromnetze mit Gleichstromkomponenten

Die Anzahl der verwendeten Gleichstromkomponenten in Wechselstromnetzen von Wohn- und Bürogebäuden ist gegenüber großen Drehstromnetzen deutlich geringer. Häufig findet man aufgrund der stark gestiegenen Installationen Photovoltaik-Anlagen für die Stromerzeugung. Vermehrt werden zur Stromspeicherung stationäre Akkumulatoren verwendet, die aufgrund der selbst geführten Wechselrichter einen Inselbetrieb des Wechselstromnetzes ermöglichen. Die Topologie eines Kollektivs von Gebäuden mit individueller Energieerzeugung und -speicherung zeigt Bild 1.2a. Verbraucher sind hier in der Regel Wechselstromverbraucher.

Aus wirtschaftlicher Sicht interessant ist auch eine gemeinsame Energieerzeugung und Energiespeicherung für ein Gebäudekollektiv (Bild 1.2b). Vorteile ergeben sich hier beim Platzbedarf, beim Wirkungsgrad und bei der Wartung. Nachteilig wirkt sich allerdings der Ausfall einzelner Komponenten der Energieversorgung aus, da gleich mehrere Wohngebäude davon betroffen sind.

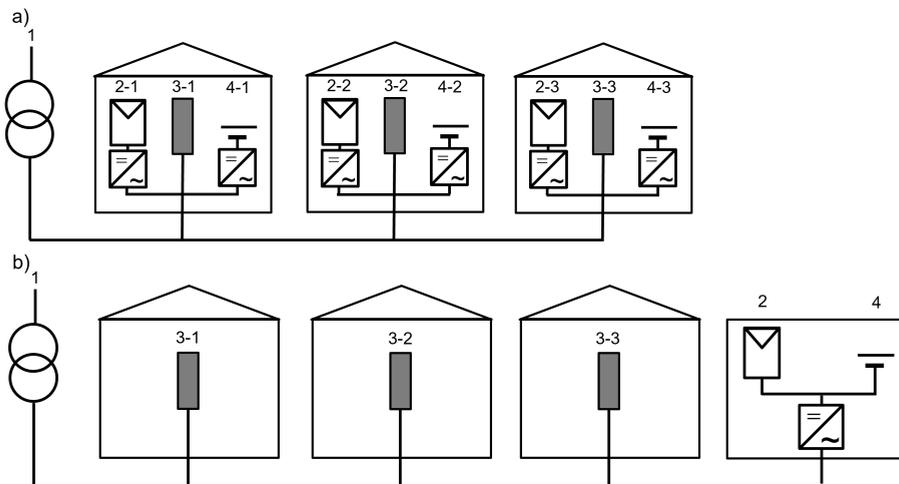


Bild 1.2 Topologien einer Energieversorgung von Gebäuden:

- a) mit individueller Energieerzeugung und Energiespeicherung: (1) Netzeinspeisung, (2-1) (2-2)(2-3) individuelle Energieerzeuger, (3-1)(3-2)(3-3) individuelle Verbraucher, (4-1)(4-2)(4-3) individuelle Speicher
- b) mit kollektiver Energieerzeugung und Energiespeicherung: (1) Netzeinspeisung, (2) gemeinsamer Energieerzeuger, (3-1)(3-2)(3-3) individuelle Verbraucher, (4) gemeinsamer Speicher

■ 1.3 Parallele Gleich- und Wechselstromsysteme

Eine weitere Möglichkeit, die Vorteile von Gleichstrom zu nutzen, sind parallel zu Wechselstromsystemen installierte Gleichstromsysteme. Beide Systeme sind galvanisch voneinander

der getrennt. Dabei werden Verbraucher geringer Leistung mit Gleichstrom und Verbraucher mit hoher Leistung mit Wechselstrom versorgt. Typische Anwendungen sind hier Ein- und Mehrfamilienhäuser, Kommunikationssysteme sowie die Gebäudeautomatisierung

1.3.1 Parallele Gleichstromsysteme für Gebäude

Verbraucher in Haushalten bzw. Gebäuden benötigen meist sehr unterschiedliche Leistungen und werden auch unterschiedlich lang genutzt. Verbraucher wie Kochherde, Waschmaschinen und Geschirrspüler, die einen hohen Leistungsbedarf über längere Zeit besitzen, werden wie bisher über das 230/400-V-Wechselstromnetz versorgt. Verbraucher mit niedrigem Leistungsbedarf oder nur kurzzeitig höherem Leistungsbedarf werden z. B. über eine 50-V-Gleichstrominstallation versorgt [6]. Dabei werden kurzzeitige Leistungsspitzen von Verbrauchern wie z. B. von einem Föhn zusätzlich von einer in die Gleichstrominstallation integrierten Akkumulatorbank abgedeckt. Ein mögliches Schema ist in Bild 1.3 dargestellt.

Neben der Energieeffizienz ist heute auch die demografische Entwicklung mit ihren steigenden Anforderungen an eine Energieversorgung ein Thema, wie z. B. Ausfallsicherheit oder Benutzerfreundlichkeit. Um die Energieversorgung jederzeit optimal anpassen zu können, wäre es von Vorteil, die Kabel für die Gleichstromnetze, die mit ungefährlichen Schutzkleinspannungen betrieben werden, nicht in, sondern auf den Wänden zu verlegen. Diese sind dann jederzeit variabel, und Räume können individuellen Bedürfnissen angepasst werden.

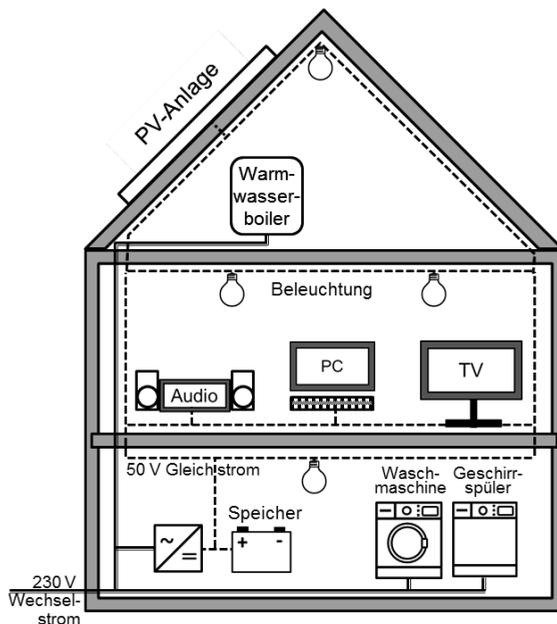


Bild 1.3 Schema einer Hausinstallation mit parallelem 50-V-Gleichstromsystem mit Stromspeicher und 230-V-Wechselstromsystem nach [6]

Haushalte mit älteren Menschen stellen in jedem Fall höhere Anforderungen in Bezug auf den sicheren Umgang mit der Stromversorgung. Eine solche parallele Stromversorgung in Privathaushalten wird durch die Entwicklung neuer Technologien in der Gleichstromtechnik und den damit einhergehenden Kostensenkungen in Zukunft durchaus wirtschaftlich tragbar sein.

1.3.2 PoE-Systeme für Kommunikationsgeräte

Power over Ethernet (PoE) ist ein System, das immer öfter zur Spannungsversorgung von IP-Telefonen, WLAN Access Points, Netzwerkkameras und anderen Netzwerkgeräten, aber auch von LED-Leuchtmitteln eingesetzt wird. Die derzeitige PoE-Technologie ist im Standard IEEE 802.3af beschrieben, der die Funktionsweise von Ethernet-Spannungsversorgungen für Kommunikationsgeräte spezifiziert [9]. Die Spezifikation sieht die Bereitstellung von Leistungen bis 25 Watt bei einer Nenn-Gleichspannung von 48 Volt über ungeschirmte Twisted-Pair-Verkabelung vor (Bild 1.4). Die Betriebsspannungen dürfen zwischen 36 V und 57 V liegen. Die Technologie funktioniert ohne Anpassung an der vorhandenen Verkabelungsanlage bei Cat 5, 5e oder 6, an horizontalen Kabeln, Patchkabeln, Patchpanels, Anschlüssen und Anschlusskomponenten. Netzwerkgeräte benötigen sowohl Datenverbindungen als auch eine Spannungsversorgung. Der Vorteil von PoE-Systemen ist, dass eine einzige Leitung beide Aufgaben übernehmen kann und folglich Einsparungen an Platz, Kosten und Installationszeiten möglich werden. PoE-Systeme erleichtern auch die Umpositionierung von Geräten, da sie einfach in eine PoE-fähige Netzwerkdose eingesteckt werden können. Aufgrund der geringen Leistung bis maximal 25 Watt würden zwei Zusatzleitungen mit $0,75 \text{ mm}^2$ ausreichen.

Um den Leistungsbereich zu erhöhen, werden in der IEC 60950-21 Remote-Power-Feeding-Systeme für bis zu 100 W mit einer Betriebsspannung von 120 V ohne Schutzschalter und von 200 V mit Schutzschalter vorgeschlagen.

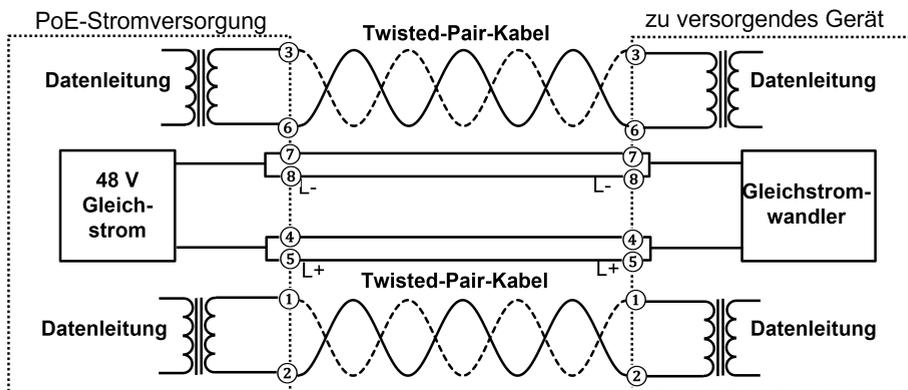


Bild 1.4 Gleichstromversorgung von Kommunikationsgeräten mit PoE-System

1.3.3 KNX-Systeme für die Gebäudeautomatisierung

Seit 1991 gibt es ein ähnliches System für die Gebäudeautomatisierung, den Feldbus KNX. Seit 2002 ist der Feldbus KNX als Standard auch in der europäischen Norm EN 50090 beschrieben. In herkömmlichen Elektroinstallationen sind die Steuerfunktionen mit der Energieverteilung fest verbunden und erfolgen mittels Parallel- oder Reihenschaltung. Nachträgliche Schaltungsänderungen sind daher schwierig umzusetzen. Auch übergeordnete Steuerfunktionen wie ein zentrales Schalten aller Beleuchtungsstromkreise in einem Gebäude können nur mit hohem Aufwand realisiert werden.

KNX trennt die Gerätesteuerung und die Spannungsversorgung auf in zwei Netze: das klassische Stromversorgungsnetz mit Wechselspannung, aus dem die Lasten versorgt werden, und das Busleitungsnetz (KNX-Bus) aus Twisted-Pair-Leitungen. Dabei werden die KNX-Komponenten mit einer Gleichspannung von 29 V versorgt und dieser die Steuerungssignale überlagert (Bild 1.5). Die Steuerungssignale sind gepulste Wechselspannungen, wobei Zeitabschnitte ohne Signalspannung als eine logische 1 und Zeitabschnitte mit Signalspannung als eine logische 0 interpretiert werden. Die Übertragungsrate beträgt nur 9,6 kbit/s, ist aber ausreichend für eine Kommunikation mit 10.000 Einzelgeräten. Es existiert auch eine Powernet-Variante, bei der die Steuersignale über ein phasengekoppeltes Stromnetz gesendet werden. Powernet-KNX ist in erster Linie für die nachträgliche Installation gedacht. Das Spannungsversorgungsnetz und das Busleitungsnetz können unabhängig voneinander oder direkt parallel in einem Kabelkanal im Haus verlegt werden, da keine großen Anforderungen an die Schirmung der Leitungen gestellt werden [19]. Die Busleitung besteht aus einer Mantelleitung mit Schirmfolie und vier Leitern mit einem Durchmesser von 0,8 mm bis 1 mm. Der Leiter KNX+ und der Leiter KNX-, die in der Regel nicht angeschlossen sind, können zur zusätzlichen Stromversorgung eines Strangs verwendet werden. Die maximale Leitungslänge ist auf 1000 m und die maximale Anzahl von Teilnehmern auf 256 begrenzt. Dabei fällt die Versorgungsspannung auf minimal 21 V ab. Da ein Netzteil des KNX-Busses eine galvanisch getrennte und damit potenzialfreie Gleichspannung zur Verfügung stellt, darf der Metallschirm weder verbunden noch geerdet werden.

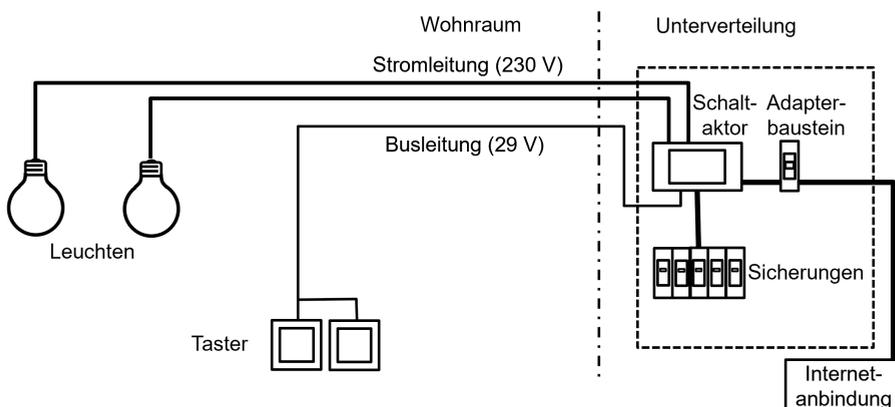


Bild 1.5 29-V-Gleichstromversorgung von Steuerungselementen in der Gebäudeautomatisierung mit dem KNX-Bussystem

Es können alle Geräte über den KNX-Bus miteinander verbunden werden und so Daten austauschen. Die Funktion der einzelnen Busteilnehmer, wie Taster, Displays, Aktoren und Sensoren, wird durch ihre Programmierung bestimmt, die jederzeit verändert und angepasst werden kann. Die Geräte unterschiedlicher Hersteller können dabei uneingeschränkt miteinander in einem System eingesetzt werden, sofern sie die entsprechende Zertifizierung durch die KNX-Association besitzen.

■ 1.4 Reine Gleichstromsysteme

In reinen Gleichstromsystemen wird auf Wechselstromkomponenten und -geräte verzichtet. Deshalb sind hier spezielle Anforderungen zu beachten, insbesondere bei Art und Leistung der eingesetzten Geräte [14]. Zum Einsatz kommen solche Gleichstromsysteme bereits für Rechenzentren, aber auch für Bürogebäude und Supermärkte gibt es erste Installationen [15]. Motivation ist hier immer die höhere Energieeffizienz. Der Aufbau von autarken oder netzfernen Energieversorgungsnetzen als reines Gleichstromsystem ist dagegen ohne Alternative.

1.4.1 Gleichstromsysteme für kommerziell genutzte Gebäude

Bei Stromversorgungssystemen mit hohem Leistungsbedarf, wie bei kommerziell genutzten Gebäuden, wird häufig eine Gleichspannung von 380 V verwendet [2]. Vor allem in Bürogebäuden erweisen sich die Schaltprozesse der Beleuchtung beim Einsatz von 380 V als Herausforderung. So wird die Beleuchtung in den Räumen und im Treppenhaus zu den Nutzungszeiten laufend ein- und ausgeschaltet. Dafür sind spezielle Schalter notwendig, die den Effekt des Lichtbogens bei Gleichstrom vermeiden [13] (siehe auch Abschnitt 6.2).

Verschiedene Studien zeigen die Möglichkeiten auf, wie ein Bürogebäude vollständig mit Gleichstrom versorgt werden kann [10] [16]. Bild 1.6 links zeigt ein bestehendes Wechselstromnetz mit Einspeisern erneuerbarer Energien, mit empfindlichen Lasten, die über eine unterbrechungsfreie Stromversorgung angeschlossen sind, und mit Digitalelektronik, wie z. B. PCs oder Faxgeräte. Das dargestellte Netz besteht aus insgesamt zwölf Wandlern: drei Wechselrichter, fünf Gleichrichter und vier Gleichstromwandler. Dieses Netz kann in ein reines Gleichstromnetz, das nur noch fünf Wandler aufweist, überführt werden (Bild 1.6 rechts), dabei ist ein zentraler Gleichrichter an die Wechselstromversorgung angeschlossen. Die Digitalelektronik und die empfindlichen Lasten können direkt mit der Gleichstromverteilung verbunden werden, da sie über die zentrale Akkumulatorbank abgesichert sind. Einzig für reine Wechselstromlasten muss noch ein Wechselrichter vorgesehen werden.

In den Studien werden umfangreiche Berechnungen durchgeführt: Vor allem der Spannungsfall entlang der Leitungen und die Leitungsverluste werden betrachtet. Aus den Studien geht hervor, dass eine Gleichstrominstallation mit 326 V, dem Scheitelwert der Netzspannung von 230 V, aus wirtschaftlicher und technischer Sicht am besten für die Nutzung in Bürogebäuden geeignet ist. Vorhandene Kabel und Leitungen können ohne Probleme

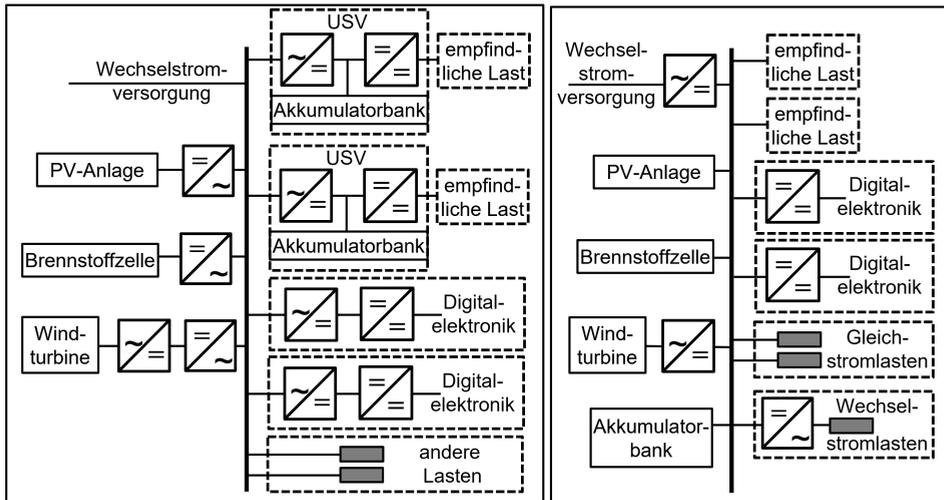


Bild 1.6 Gleichstromversorgung eines Bürogebäudes: bestehende Wechselstrominstallation (links), vorgeschlagenen Gleichstrominstallation nach [10] (rechts)

auch mit Gleichstrom benutzt werden, wodurch eine Umrüstung von Wechselstrominstallationen auf Gleichstrom einfacher und kostengünstiger wird. So sind in einem Bürogebäude in der Regel viele Computerarbeitsplätze vorhanden. Das bietet auch die Möglichkeit, eine stationäre Akkumulatorbank als unterbrechungsfreie Stromversorgung einzusetzen. Wirtschaftliche Betrachtungen dieser Netzsysteme zeigen, dass größere Kosteneinsparungen erreicht werden können, wenn Wechselrichter entfallen und direkt Gleichstrom verwendet wird. Ein weiterer Vorteil von Gleichstrom liegt unter anderem in den höheren Grenzwerten von elektromagnetischen Feldern, in diesem Fall z. B. am Arbeitsplatz.

Zusätzlich könnte man schon das vorgelagerte Verteilnetz mit Gleichstrom betreiben, bei Bedarf auch mit höherer Spannung von beispielsweise 1 kV. An jedem Gebäude müsste allerdings je ein Gleichstrom-Spannungswandler vorgesehen werden [11] [12].

1.4.2 Gleichstromsysteme für Rechenzentren

Bei Rechenzentren dagegen spielen naturgemäß Schaltprozesse keine Rolle, weil die Geräte, wie Server, Switches und Kommunikationsgeräte, fest angeschlossen sind und nicht abgeschaltet werden dürfen (Bild 1.7).

Nachdem man sich in den letzten Jahren auf die Optimierung der Klimatechnik in Rechenzentren konzentriert hat, liegt der Fokus heute auf der Energieversorgung selbst. Eine konsequente Verwendung der Gleichstromtechnologie im Rechenzentrum ist wirtschaftlicher und effizienter als die konventionelle Wechselstromtechnologie. Anfänglich wurden Betriebsspannungen von 43 V bis 53 V verwendet, später 326 V. Heute gibt es weltweit über 20 Rechenzentren, die mit 380 V versorgt werden. Es fehlt jedoch an technischen Standards und Normen für die Komponenten und Schnittstellen.

Bedingt durch die Gleichspannung entfallen zudem die aufwendigen PFC-Filter (PFC = Power Factor Correction) in den Netzteilen, die deren schlechten Leistungsfaktor korri-

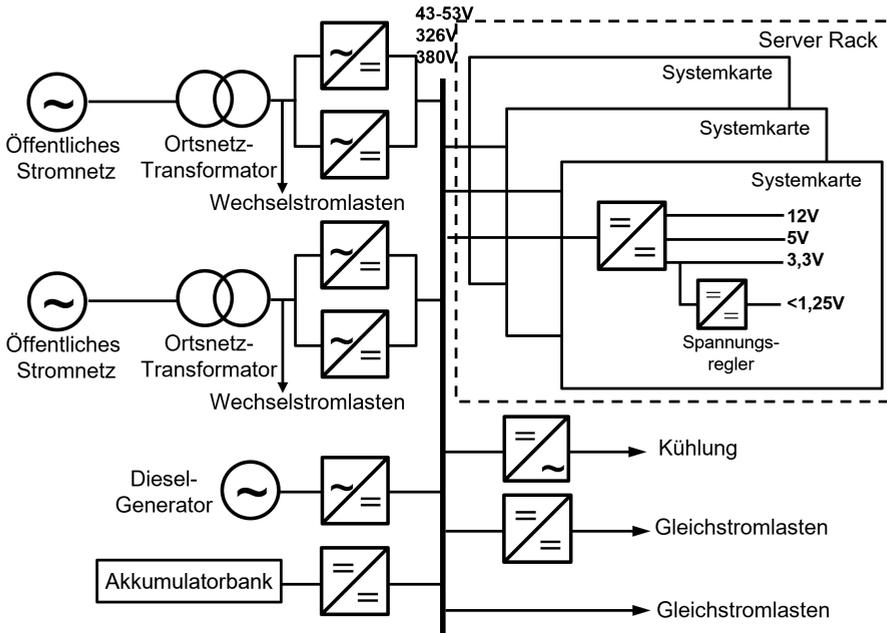


Bild 1.7 Gleichstromversorgung von Rechenzentren aus dem öffentlichen Stromnetz mit Transformator, Gleichrichter, Akkumulatorbank und Lasten nach [8]

gieren. Diese Filter enthalten unter anderem relativ große Elektrolytkondensatoren, welche über die Jahre austrocknen und den Neustart eines Servers eventuell nicht mehr gewährleisten können. Weiterhin generieren moderne Schaltnetzteile Oberschwingungen im Netz, die seitens der Netzbetreiber nicht erwünscht sind und die aus Sicht der Rechenzentren andere eingesetzte elektronische Geräte durch hohe Spannungen schädigen könnten. Als Nebeneffekt verringert sich außerdem der Platzbedarf der Netzteile, was wiederum Vorteile für die interne Luftführung mit sich bringt. Auch die Wandlungsprozesse innerhalb eines unterbrechungsfreien Netzes würden durch die Verwendung von Gleichstrom eliminiert und zwangsläufig zu einer weiteren Effizienzsteigerung führen. Letztendlich erleichtert sich bei der Verwendung von Gleichstrom im Rechenzentrum auch die Integration von erneuerbaren Energien erheblich. USV-Anlagen neuester Generation erlauben den direkten Anschluss von PV- oder Windkraftanlagen an die USV-Anlage. Die USV koppelt dabei die erzeugte Gleichspannung der Anlagen mit der Spannung des Akkumulatorzwischenkreises und regelt damit die Gleichspannung am Ausgang entsprechend.

Ein Gleichstromverteilungssystem bietet also zahlreiche Vorteile [7]:

- reduzierter Kühlbedarf
- Stromreduzierung um 10 bis 20 %
- Platzersparnis
- geringere Komplexität und höhere Ausfallsicherheit
- niedrigere Betriebskosten

Index

B

- Berühren, direktes 237, 252, 310
- Berühren, indirektes 237, 251, 320
- Betrieb mit Gleichstrom
 - Asynchronmotor 236, 242
 - Diodengleichrichter 237
 - Gleich-/Wechselrichter 242, 251
 - Leistungsfaktor-Korrektur 236
 - Reihenschluss-Gleichstrommaschine 235
 - Schaltkontakte 236
 - Spaltpolmotor 235
 - Universalmotor 235
- Bleiakkumulatoren
 - Aufbau 51
 - Aufbau, gasdichter 51
 - Elektrolyt 47, 48, 51
 - Entladeschlussspannung 52, 75
 - Entladetiefe 54, 55, 58
 - Innenwiderstandsabschätzung 56
 - Innenwiderstandsfaktor 58
 - Kapazität, entnehmbare 51, 52
 - Ladeschlussspannung 66
 - Leerlaufspannung 54
- Bordnetze
 - 48-V-Technik 19
 - Gleichstromwandler 19, 20
 - Isolationsüberwachung 20, 25
 - Ladeleistung 20
 - Personensicherheit 25
 - Schutzleiter 25
 - Starter-Generator 19
 - Verbraucherleistungen 18

E

- Eintaktwandler
 - Ausgangsleistung 122
 - Funktionsweise 115
 - Glättungskapazität 119, 122

- HF-Transformator 118, 119, 121
- Ladungsmenge 121
- Mittelwert des Ausgangsstroms 117
- Schaltung 115
- Trennung, galvanische 115
- Welligkeit 115, 116

F

- Fehlerklärung
 - Durchlasskennlinie 285
 - Fehlerstrom-Schutzschalter 282, 309, 312
 - Längsfehler 281, 282
 - Leitungsschutzschalter 282–284, 286, 306, 307, 311
 - NH-Sicherung 284, 286, 290, 307, 310
 - PV-Sicherung 286
 - PV-Sicherung 286
 - Querfehler 281
 - Schmelzsicherungen 282
 - Sicherungscharakteristik 284, 287, 297
 - Überstromfehler 281
 - Zylinder-Sicherung 286
- Fehlerlichtbogen-Detektion
 - Auftrieb, thermischer 343
 - Coulomb-Kraft 345
 - elektromagnetische Wellen 345
 - Elektronengas 345
 - Energieniveaus 343
 - Ladungsdichtewellen 345
 - Lichtbogenrauschen 329, 345, 348, 351, 353, 354
 - Lichtquanten 343
 - Plasmaentionisierung 344
 - Plasmafrequenzen 345
 - Plasmaionisierung 343
 - Plasmaoszillationen 345
 - Rauschen, rosa 346
 - Stromanteil, hochfrequenter 345

- Fehlerlichtbogen-Messtechnik
 - Empfangssignalstärke 349
 - HF-Stromwandler 345
 - Kommunikationseinrichtungen 349
 - Lichtbogendetektor 355
 - Rauschleistung 346
- Fehlerlichtbogen-Schutzeinrichtung
 - Anregungszustand 356
 - Auslösekriterium 356
 - Feuchtraumleitung 326
 - HF-Transformator 356
 - Infrarot-Sensor 327
 - Schrittmotor 327
 - Signalprozessor, digitaler 327
- G**
- Gebäudenetze
 - Anlagen/Komponenten 7–9
 - Anwendungen 5
 - Bürogebäude 12
 - Energieeffizienz 14
 - Leistung, geforderte 6
 - Mini-Grids 15
 - Netz, autarkes 15
 - Personensicherheit 21
 - Schutzleiter 22, 24
 - Spannungsversorgung 10, 11
- Gegentaktwandler
 - Ausgangsleistung 126
 - Funktionsweise 125
 - Glättungskapazität 124
 - Gleich-/Gegentakt 124
 - HF-Transformator 123, 125, 126
 - Mittelwert des Ausgangsstroms 125
 - pulsweitenmoduliert 124
 - Reihen- und Parallelschaltung 127
 - Schaltung 123
 - Trennung, galvanische 123, 126
 - Welligkeit 124, 126
- Generator
 - Erregerwicklung 31
 - Fremderregung 32
 - Klauenpolgenerator 31
 - Selbsterregung 32
 - Vorerregung 32
- Glättungskapazität 92, 95, 96, 109, 112, 119, 122, 124
- Gleichrichter 12, 18, 29, 33, 263, 272
- Grundlagen zu Akkumulatoren
 - Ersatzschaltbild 48
 - Leerlaufspannung 47
 - Nennkapazität 50

- Reihen-/Parallelschaltung 49, 80
- Zellenaufbau 48

H

- HF-Transformator 115, 118, 121, 123, 126, 131, 356
- Hochsetzsteller
 - Funktionsweise 104
 - Glättungskapazität 109, 112
 - Lösung, analytische 104
 - Mittelwert des Ausgangsstroms 107
 - Schaltung 103
 - Spulenstrom 107
 - Welligkeit 105, 108, 112, 114

I

- Innenwiderstand 48, 55, 58, 60, 61, 203, 212, 259, 273–279

K

- Kabelisolierung-Entzündung
 - Fehlerlichtbogen, paralleler 323, 324, 352
 - Fehlerlichtbogen, serieller 324, 351
 - Feld, elektrisches 325
 - Glühemission 326
 - Isoliertes 325
 - Polyethylen (PE) 325
 - Polyvinylchlorid (PVC) 325
 - Strompfad, verengter 324
- Kurzschlussstrom-Auswirkung
 - Erwärmung, kurzzeitige 273
 - Klemmen-Kurzschlussstrom 273
 - Stromkräfte 273
 - Überstrom-Schutzeinrichtungen 273
- Kurzschlussstrom-Berechnungsgrößen
 - Dauerkurzschlussstrom 260, 261, 264, 266, 267, 269–271, 273, 277, 278
 - Impedanzwinkel 264, 268, 270
 - Innenwiderstand 273, 274, 277–280
 - Scheitelzeit 262, 264, 265, 272, 278, 279
 - Spannungsfaktor 265, 269, 270
 - Stoßkurzschlussstrom 259, 261, 264, 268–271, 273, 275, 278
- Kurzschlussstrom-Betriebsmittel
 - Bleiakumulatoren, ortsfeste 260
 - Eigenbedarfsanlagen 260, 262
 - Glättungsdrossel 263, 266
 - Gleichstrommotor 260
 - Kommutierungsdrossel 263, 266, 268
 - Kondensatorbank 260

- Netzeinspeisung/Drehstrombrücke 260, 263, 267
- Stromrichtertransformator 263, 265–267, 269, 273

L

Ladeverfahren

- Konstantspannung 64
- Konstantstrom 64
- Ladeverfahren, kombiniertes 64

Ladungsausgleich

- HF-Transformatoren 73
- Kondensatoren 70
- Passive Balancing 68
- Spulen 71
- Überladen von Zellen 67
- Widerstände 68
- Z-Dioden 68

Leerlaufspannung 33, 34, 47, 54, 60, 61

Leitungen

- Betriebstemperatur 243, 244
- Dauerbelastungsstrom 206
- Grenzleistung, thermische 213
- Grenztemperatur 205
- Kupferwiderstand 243, 244
- Nennquerschnitt 206
- Stromkreislänge 208
- Strommoment 210
- Leitungsanordnungen, typische
 - Belastung, einfache 213, 223
 - Belastung, mehrfache 211, 216, 224, 244, 245
 - Rechteck-/Linienvariante 231
 - Superposition 217, 224
 - Teilleiterstrom 217
 - Teilspannungsfall 217
 - Verbrauchergruppen 220, 221, 230
 - Zuleitung 228–231, 245, 246

Leitungsnetz

- Anschlussstelle 204
- Betriebsspannung, minimale 210
- Hauptverteilung 221, 242, 245, 246, 251
- Industriestecker 207
- Ortsnetzstation 251
- Spannungsfall, zulässiger 207
- Verbraucherwiderstand 205

Lichtbogenkennlinie

- Arbeitspunkte 136, 137, 141, 146
- Ayrton-Gleichung 135, 194
- Krater der Kathode 199
- Löschlänge 182
- Löschspannung 170, 182
- Löschstrom 182

- Materialkonstanten 135
- Parameter 178–181, 198, 199
- Verlauf, dynamischer 190

Lichtbogenlöschung

- Aktoren 149
- Anker-/Erregerinduktivität 154, 188
- Anker-/Erregerwicklung 153
- Differentialgleichung, gewöhnliche 150
- Eisenkerndrossel 186
- Elektromagnet 149
- Elektromotor 153
- Gleichstrommotor 155
- Kontakttrennung 141–143, 146, 155, 159, 160
- Kraft, elektromotorische 154
- Lichtbogenverlängerung 140
- Plasmabebulung 160
- Reihenschlussmotor 153, 186
- Selbstinduktionsspannung 150, 186, 188
- Universalmotor 153, 186
- Zuggeschwindigkeit 148–150, 153, 161

Lichtbogenprüfung

- Auswertegrößen-Flammen 329
- Auswertegrößen-Lichtbogen 328
- Auswertung, statistische 328
- Prüfparameter 328
- Verkohlungsphase 331
- Zündphase 331

Lichtbogentheorie

- Austrittsenergie 133
- Elektrodenfallgebiete 135
- Elektrodenfallspannungen 134, 141, 142, 159, 162
- Elektronenemission 133
- Energie, kinetische 133
- Entladung, selbstständige 134
- Fermi-Energie 133
- Gitterverband 133
- Glüh-/Feldemission 133
- Kräfte, elektrostatische 133
- Lorentz-Kraft 159
- Potenzial-Napfmodell 133
- Raumladungszonen 134
- Stoß-/Thermoionisation 134
- Tunneleffekt 133
- Weglänge, mittlere freie 135
- Zünd-/Brennspannung 134
- Lithium-Ionen-Akkumulatoren
 - Aktivmaterial 58
 - Elektrodenaufbau 59
 - Elektrolyt 59
 - Energiedichte 62
 - Entladetiefe 61

- Innenwiderstand 62
- Leerlaufspannung 60, 61
- Lithium-Eisen-Phosphat 59, 60, 62, 63, 77

P

Personengefährdung

- Durchströmungsdauer 288, 300, 303, 307, 309, 310, 317
- Herzkammerflimmern 288
- Körperstrom 282, 288–290, 294, 296, 297, 301–304
- Körperwiderstand 302, 303
- Loslassschwelle 289
- Muskelkontraktionen 288
- Störung der Reizleitung 288
- Thrombosen 289
- Wirkungen, pathophysiologische 288, 300

Personenschutzsysteme

- Berühren, direktes 237, 252
- Berühren, indirektes 237, 251
- Berührspannung 290, 294, 296, 298, 299, 302, 304, 305, 308, 310
- Dauerkurzschlussstrom 312, 314, 317, 320
- Fehlerschleifenlänge 277, 313, 314, 316, 318, 320
- Isolationsüberwachung 298
- Mittelpunkterdung 299
- Schutzklasse 306
- Zusatzschutz 307

Photovoltaik-Anlagen

- Arbeitskennlinie 37
- Arbeitspunkte eines Akkumulators 39
- Arbeitspunkte eines Gleichspannungswandlers 40
- Arbeitspunkte eines Lastwiderstands 36
- Einstrahlungsleistung 34
- I-U-Kennlinie 33
- Kennwerte 33
- Leerlaufspannung 33, 34
- Leistung, abgebbare 36, 40
- Skalierung 35

S

Schalten von Gleichstrom

- Beblasung, magnetische 166
- Deionisations-Kammer 166
- Kühlmittel 166
- Lorentz-Kraft 166
- Löschgrenze 165
- Löschkammer 166
- Löschkondensator 166
- Schaltkammer 166
- Thermoionisation 165
- Vakuumkammer 166

Schaltgeräte

- IGBT 167
 - Kompaktleistungsschalter 167
 - Kurzschlussauslöser 167
 - Lasttrennschalter 167
 - MOSFET 167
 - Nullpunktlöscher 166
 - Schalten, lichtbogenfreies 168
 - Schaltvermögen 166, 167
 - SiC 167
 - Sperrspannung 167
 - strombegrenzende 166
 - Trennschalter 168
- ### Spannungsfallberechnungen
- Blindleistung 238, 240, 250
 - Drehstromkabel 242, 243, 248, 250, 251, 253
 - Knotenregel 226, 254, 256
 - Korridorbeleuchtung 220, 221, 240, 246, 249, 251, 253, 255
 - Längsspannungsfall 238
 - Leistungsfaktor 238, 242, 250
 - Querspannungsfall 238
 - Scheinleistung 250
 - Wirkleistung 238, 240, 252

Spannungswandler für Gleichstrom

- Abwärts-/Aufwärtswandler 83
 - Dimensionierung 128
 - Durchflusswandler 84, 123
 - Sperrwandler 103, 107, 115
 - Taktung, primäre/sekundäre 83
- ### Steckverbindungen
- Auftrieb, thermischer 170
 - Bordnetzstecker 192
 - Kontakt, voreilender 168
 - Leuchterscheinung 169
 - Plasma-Deionisation 170
 - Schutzkontaktstecker 168
 - Zuggeschwindigkeit 171, 184, 186, 192, 194, 195, 198

T

Tiefsetzsteller

- Ausgangsleistung 90
- Betrieb, lückender 101
- Diode, ideale/reale 98
- Funktionsweise 84
- Glättungskapazität 92, 95, 96
- Lösung, analytische 86
- Lückgrenze 103
- Mittelwert des Ausgangsstroms 88
- Schaltung 83
- Welligkeit 86–88, 91, 92, 94
- Zeitverlauf 87, 88, 90