

# Einführung

In den Anfängen der elektrischen Energieversorgung wurde ausschließlich Gleichstrom verwendet. Für die kleinen lokalen Gleichstromnetze existierten neben Generatoren auch Motoren, Akkumulatoren sowie Kohlebogenlampen und später Kohlefadenlampen für die Beleuchtung von Straßen oder Hallen. Thomas Edison besaß mit seinem Unternehmen General Electric die meisten der US-amerikanischen Patente dazu.

Der weltweite erste Versuch, Gleichstrom über eine größere Strecke zu transportieren, wurde allerdings 1882 für die Internationale Elektrizitätsausstellung in München unternommen. Dazu wurde eine Telegrafenerleitung mit zwei Drähten über eine Strecke von 57 km von Miesbach nach München errichtet. In Miesbach trieb eine Dampfmaschine einen Gleichstromgenerator an, um im Glaspalast in München, wo die Ausstellung stattfand, eine von einem Gleichstrommotor angetriebene Wasserpumpe für einen kleinen künstlichen Wasserfall zu betreiben. Die Gleichstromleitung war für eine Gleichspannung von 1350 V bis 2000 V ausgelegt. Der Wirkungsgrad betrug nur 25 %. Somit kamen von der am Anfang eingespeisten Leistung von ca. 1000 W nur 250 W an Ende der Leitung an. Entsprechend verminderte sich die Spannung am Ende von ursprünglich 2000 V auf 500 V. Der über die Leitung fließende Strom betrug dabei nur 0,5 A. Eine Anekdote dazu besagt, die Leitung sei zur Ausstellung gar nicht fertig geworden und man habe den Wasserfall mechanisch betrieben.

Erst der stark steigende Energieverbrauch und die damit einhergehende Zunahme der Übertragungsverluste erforderte eine Transformierbarkeit der Elektrizität in deutlich höhere Spannungen, die nur mit Wechselstrom gelingen konnte. Insbesondere George Westinghouse und sein Mitarbeiter Nikola Tesla standen für diese neue Technik. Die Auseinandersetzung um die bessere Technik zwischen den Firmen General Electric und Westinghouse wurde um 1890 mit aller Härte geführt, vor allem vonseiten Edisons, mit leichten Vorteilen für Westinghouse. Ein großer Nachteil war, dass man damals mit Wechselstrom keinen Motor antreiben konnte.

Erst die Erfindung des Dreiphasen-Wechselstroms, des sogenannten Drehstroms, brachte den endgültigen Durchbruch für die Wechselstromtechnik. Ordnet man im Stator drei räumlich um  $120^\circ$  versetzte Wicklungen an und speist diese mit drei zeitlich um  $120^\circ$  versetzten Strömen, entsteht ein sich drehendes magnetisches Feld, das sogenannte Drehfeld. Dieses konnte mit Wechselstrom betriebene Elektromotoren, wie Synchron- und Asynchronmotoren, erst in Drehung versetzen. Weitere Vorteile, wie die zeitlich konstante Leistungszufuhr und der Wegfall des Rückleiters, führten dazu, dass heute in der öffentlichen Stromversorgung fast ausschließlich Drehstromsysteme zum Einsatz kommen.

Die Gleichstromtechnik wird heutzutage als Schlüsseltechnologie für die Netzanbindung und die Integration von erneuerbaren Energiequellen sowie für die Realisierung von integrierten elektrischen Energieversorgungssystemen angesehen. Zudem sind Gleichstromnetze ein wesentlicher Bestandteil neuer urbaner und industrieller Energieverteilungsnetze und dienen als Brücke zu oder als Unterstützung von bestehenden Wechselstromnetzen.

Einige elektrische Verbraucher wie Glüh- bzw. Halogenlampen oder Elektro-Direktheizungen können ohne Probleme direkt an Gleichstromnetze angeschlossen werden, sofern die richtige Spannung herrscht. Viele elektrische Verbraucher in Haushalt und Büro arbeiten intern mit Gleichstrom. Sie werden zwar über das Wechselstromnetz versorgt, zur Nutzung muss aber der Wechselstrom in Gleichstrom umgewandelt werden. Da Energieeffizienz eine immer wichtigere Rolle spielt, liegt es nahe, Verbraucher, die Gleichstrom benötigen, direkt damit zu versorgen, um eine Umwandlung von Wechselstrom in Gleichstrom und die dadurch entstehenden Verluste zu vermeiden. Die aktuell noch notwendigen Netzteile, die im Wesentlichen aus Gleichrichtern bestehen, könnten dann entfallen.

Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl tragbarer Geräte wie Handys, MP3-Player, schnurlose Telefone oder Elektrowerkzeuge, deren Gleichstrom-Akkumulatoren über Ladegeräte mit Energie versorgt werden. Diese Ladegeräte wandeln meist – mit geringem Wirkungsgrad – ebenfalls den Wechselstrom aus dem Netz in Gleichstrom um. Alle diese kleinen Wandlungen könnte man mit einer zentralen Umwandlung pro Gebäude oder Wohneinheit vermeiden und so die dadurch entstehenden Verluste verringern.

Eine Gebäudeinstallation auf Gleichstrombasis macht es einfacher, die immer wichtiger werdende lokale regenerative Energieerzeugung in das Stromnetz einzubinden. Photovoltaik-Anlagen und Brennstoffzellen erzeugen Gleichstrom, der mit Hilfe von Wechselrichtern in Wechselstrom umgewandelt werden muss, damit die Einspeisung ins Netz erfolgen kann. Diese Umwandlung verringert den Gesamtwirkungsgrad der regenerativen Energieerzeugung. Ein Gleichstromnetz hat auch während des Betriebs erhebliche Vorteile gegenüber einem Wechsel- bzw. Drehstromnetz. In Gleichstromnetzen gibt es keine Blindleistung. Mit Gleichstrom kann daher mehr Strom und damit mehr Leistung über ein und denselben Leiter übertragen werden als mit Wechselstrom, da der Blindanteil des Stromes entfällt. Zudem verringern sich die Spannungsfälle längs der Leitungen und die frequenzabhängigen Phänomene.

Eine große Bedeutung könnte den Niederspannungs-Gleichstromnetzen jedoch als Inselnetzen in der Versorgung netzferner Gebiete, insbesondere in Entwicklungsländern, zukommen. Laut der Internationalen Energieagentur (IEA) hatten 2011 1,3 Milliarden Menschen in der Welt keinen Zugang zu Elektrizität. In vielen dieser Regionen ist in naher Zukunft zudem nicht an eine öffentliche Stromversorgung mit Wechselstrom zu denken. Autarke kleine Gleichstromsysteme, sogenannte Mini- oder Mikronetze, könnten eine flächendeckende Stromversorgung der dortigen Bevölkerung ermöglichen.

Für einen zunehmenden Einsatz von Niederspannungs-Gleichstromnetzen spricht auch, dass die Komponenten, die für einen Betrieb erforderlich sind, schon lange am Markt erhältlich sind. Insbesondere Überstrom-Schutzeinrichtungen, wie Leitungsschutzschalter und Sicherungen sowie allstromsensitive Fehlerstrom-Schutzschalter, sind hier zu nennen. Aufgrund des großen Interesses an Gleichstromnetzen werden immer mehr Komponenten dafür entwickelt. Zur Anpassung der Netzgleichspannung an die Gerätespannung sind beispielsweise bereits Gleichstrom-Spannungswandler verschiedener Bauformen erhält-

lich. Für den höheren Leistungsbereich gibt es Spannungswandler für 600 V und für kleine Leistungen Bauformen, die in Steckdosen Platz finden.

Für Gleichstrom-Kleinverbraucher in Haushalt und Büro sind Niederspannungs-Gleichstrom-Steckersysteme verfügbar, die mit einem einheitlichen Stecker für alle Anwendungen, wie z. B. Handys, Notebooks oder Monitore, arbeiten und im Bereich von 5 V bis 24 V jeden Verbraucher über eine Codierung automatisch mit der richtigen Gleichspannung versorgen. Die Systeme verfügen über einen Lichtbogenschutz beim Abziehen der Stecker und verbrauchen im Stand-by-Betrieb keine Leistung.

Für den Einsatz der Technologie der Niederspannungs-Gleichstromnetze in großen Wohn- oder Bürogebäuden muss das öffentliche Energieverteilungsnetz jedoch entsprechend angepasst werden. Einen wesentlichen Einfluss hat der Ort, wo im Verteilungsnetz die Gleichrichter installiert werden. Erhält jedes einzelne Gebäude einen Gleichrichter, bleibt das öffentliche Drehstromnetz weitgehend erhalten. Werden mehrere Gebäude zusammengefasst und ein großer Gleichrichter installiert, muss das öffentliche Netz auf Gleichstrom umgestellt werden. Soll ein komplettes Gebäudeareal direkt mit Gleichstrom versorgt werden, spielen die Anforderungen an die Ausfallsicherheit der Gleichstromversorgung eine größere Rolle. Stromausfälle könnten z. B. durch ortsfeste Akkumulatoren in den einzelnen Gebäuden kompensiert werden.

Ein breites Einsatzgebiet von Niederspannungs-Gleichstromnetzen darf dabei nicht vergessen werden: die Kfz-Bordnetze von Straßenfahrzeugen. Solche mobilen Gleichstromnetze zur Versorgung der Verbraucher an Bord werden sowohl für Verbrennungs- als auch für Elektromotorantriebe benötigt. Diese werden mit 12 V oder bei höherem Leistungsbedarf mit 48 V betrieben. Auch das Hochvoltnetz von Elektrofahrzeugen stellt ein kleines lokales Gleichstromnetz mit allerdings hohem Leistungsbedarf dar, der aufgrund des elektromotorischen Antriebs entsteht. Entsprechend hohe Netzspannungen und Akkumulatorkapazitäten sind daher erforderlich. Deshalb wurde das Gleichstromladen entwickelt, das die Ladezeit erheblich verkürzt. Dabei wird der Traktionsakkumulator direkt mit Gleichstrom hoher Leistung unter Umgehung des Ladegeräts geladen. Der leistungsstarke Gleichrichter sitzt dabei in der ortsfesten Ladestation.

All dies zeigt, dass der Bedarf an mobilen und stationären Niederspannungs-Gleichstromnetzen weiter zunehmen wird. Für Ausbildung und Beruf erfordert dies eine grundlegende Beschäftigung mit den Besonderheiten von Gleichstromnetzen, was dieses Buch Ihnen in den folgenden elf Kapiteln in ausführlicher Weise ermöglicht.

# 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  $\pm 190$  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

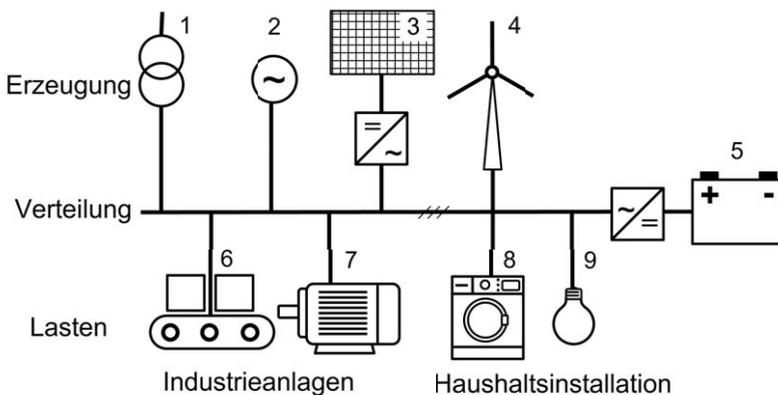
Verteilung angeschlossen. Grundsätzlich können Betriebsmittel für Gebäudestromversorgungen in elektrischen Anlagen und Komponenten, die zur Stromeinspeisung, Stromverteilung sowie zur Stromanwendung dienen, unterteilt werden:

- 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.



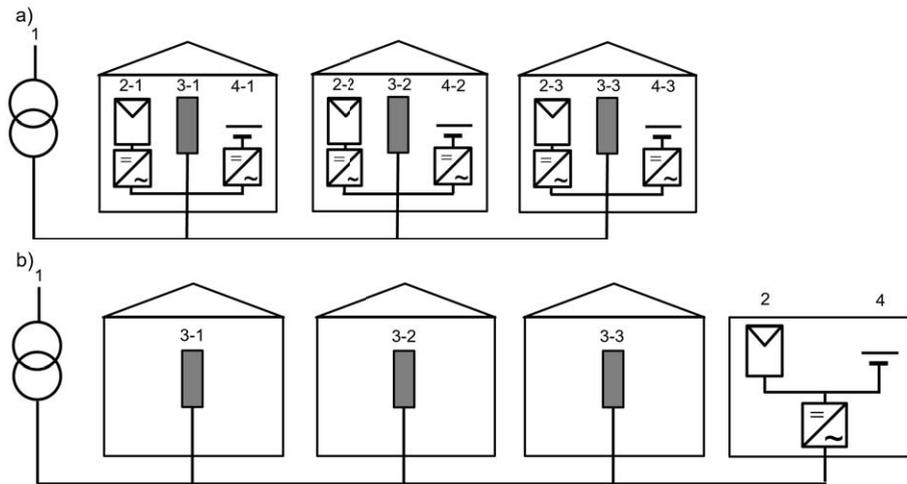
**Bild 1.1** Topologie eines hybriden elektrischen Niederspannungsnetzes:

(1) Netzeinspeisung, (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

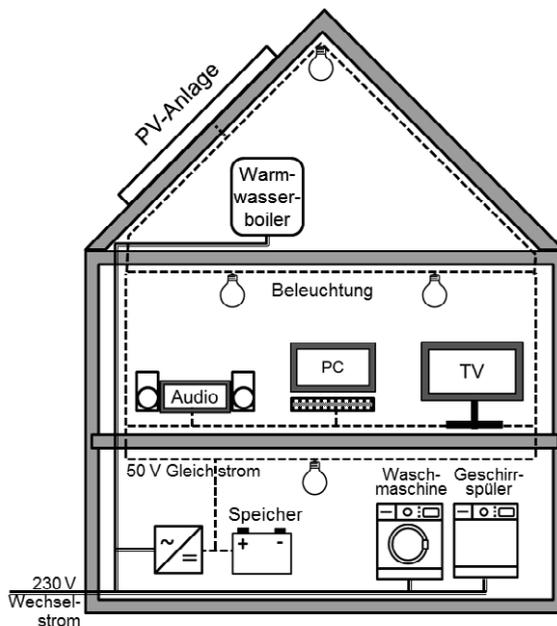
Eine weitere Möglichkeit, die Vorteile von Gleichstrom zu nutzen, sind parallel zu Wechselstromsystemen installierte Gleichstromsysteme. Beide Systeme sind galvanisch voneinander

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.



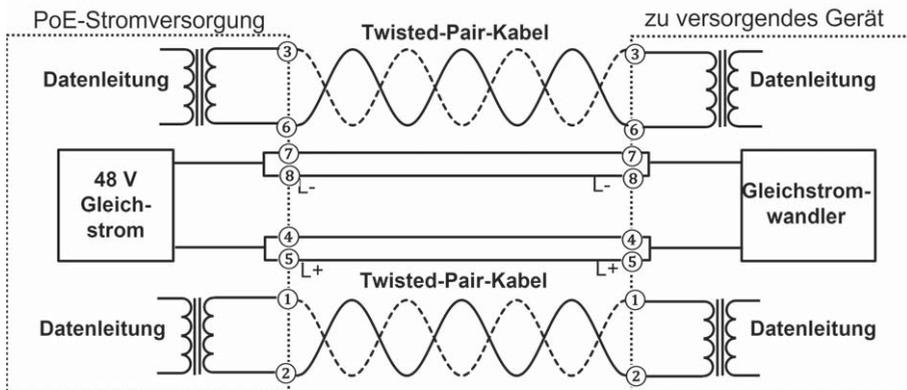
**Bild 1.3** Schema einer Hausinstallation mit parallelem 50-V-Gleichstromsystem mit Stromspeicher und 230-V-Wechselstromsystem nach [6]

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.

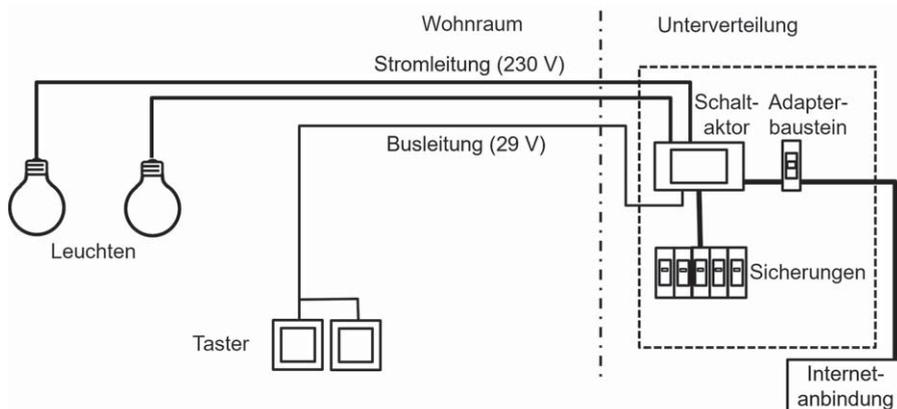


**Bild 1.4** Gleichstromversorgung von Kommunikationsgeräten mit PoE-System

### 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