

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Die Umgestaltung des Energiesystems hin zu einer CO₂-neutralen Energieversorgung stellt eine der größten Herausforderungen unserer Zeit dar. Betrachtet man Abb. 1.1, so kann für die Bundesrepublik Deutschland mit Stand 2021 eine CO₂-Emission von $m = 753 \text{ Mio.t}_{\text{CO}_2}$ bestimmt werden.

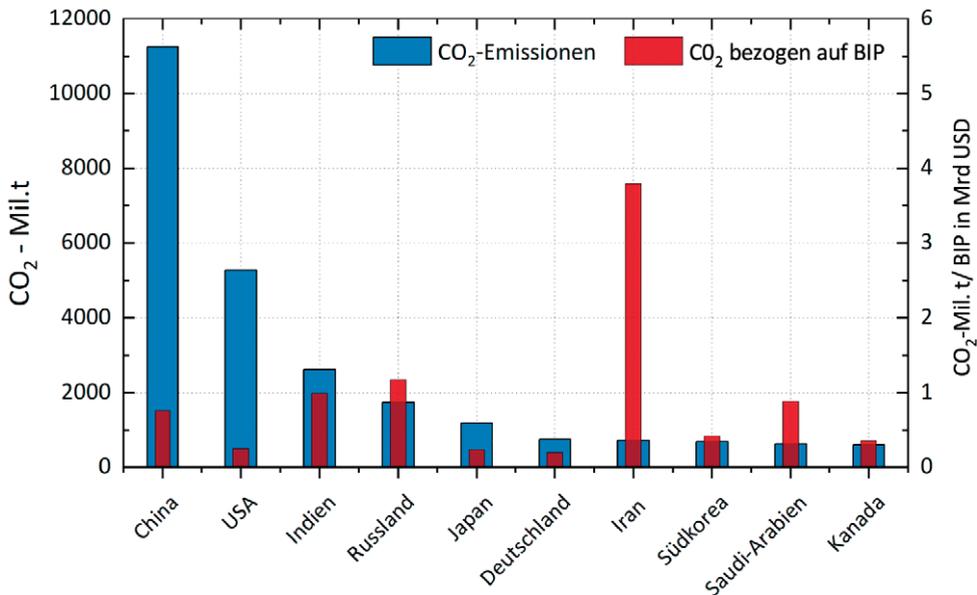


Abb. 1.1: CO₂-Emissionen verschiedener Länder im Vergleich

Im Vergleich zu anderen Industrienationen, z.B. USA, Russland oder Kanada, weist Deutschland eine mittlere CO₂-Emission auf. Interessant ist jedoch eine Betrachtung, bei der das BIP¹ in Bezug gesetzt wird. Diese Daten sind ebenfalls in Abb. 1.1 mit dokumentiert. Vergleicht man diese Kenndaten, dann weist Deutschland die niedrigsten CO₂-Emissionen auf. Ziel eines Transformationsprozesses für die Energietechnik muss es daher sein, die absoluten CO₂-Emissionen zu reduzieren und gleichzeitig ein Absinken des BIP und damit der Wirtschaftsleistung der Bundesrepublik Deutschland zu vermeiden.

Der für den Umbau des Energiesystems notwendige Transformationsprozess ist eine große Herausforderung, da aktuell ein zentralistisch orientiertes Energiesystem existiert ist. Dieses Energiesystem wird geprägt von Großkraftwerken, wie Kohlekraftwerken (Braun- und Steinkohle) / Gaskraftwerken sowie Kraftwerken auf Basis von Erdöl². Zukünftig werden vermehrt kleinere

¹ Bruttoinlandsprodukt

² Bis 2022 war noch ein signifikanter Anteil von Atomkraftwerken in Deutschland in Betrieb.

Kraftwerke bzw. Energiewandlungseinrichtungen zur Verfügung stehen, die jedoch so betrieben werden müssen, dass weiterhin die Versorgungssicherheit gewährleistet bleibt. Abb. 1.2 zeigt eine Prognose über die Anzahl an elektrischen Erzeugungsanlagen für die Jahre 2025 und 2030. Die Daten zeigen, dass Anlagen mit einer Leistung von $P_{el} < 100 \text{ kW}$ stark ansteigen werden. Im Jahre 2025 wird mit 2,7 Mio. Anlagen gerechnet und im Jahre 2030 mit über 6 Mio. (vgl. Abb. 1.2). Diese hohe Anzahl von Systemen mit kleiner und mittlerer Leistung wird nicht mehr gebündelt an einem Ort installiert sein, sondern vielmehr dezentral, d.h. nahe beim Verbraucher.

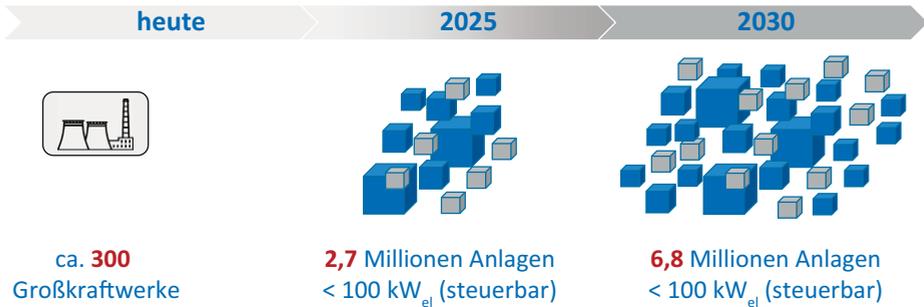


Abb. 1.2: Prognose zur Anzahl von Elektroenergieerzeugungseinrichtungen in Deutschland

Ausdruck verleiht sich die stärkere dezentrale Ausrichtung der Energietechnik schon heute am Trend der zugebauten Anlagen, wie z.B. PV-Systeme, PV-Speichersysteme, Wärmepumpen und E-Fahrzeuge. Abb. 1.3 dokumentiert den aktuellen Trend.

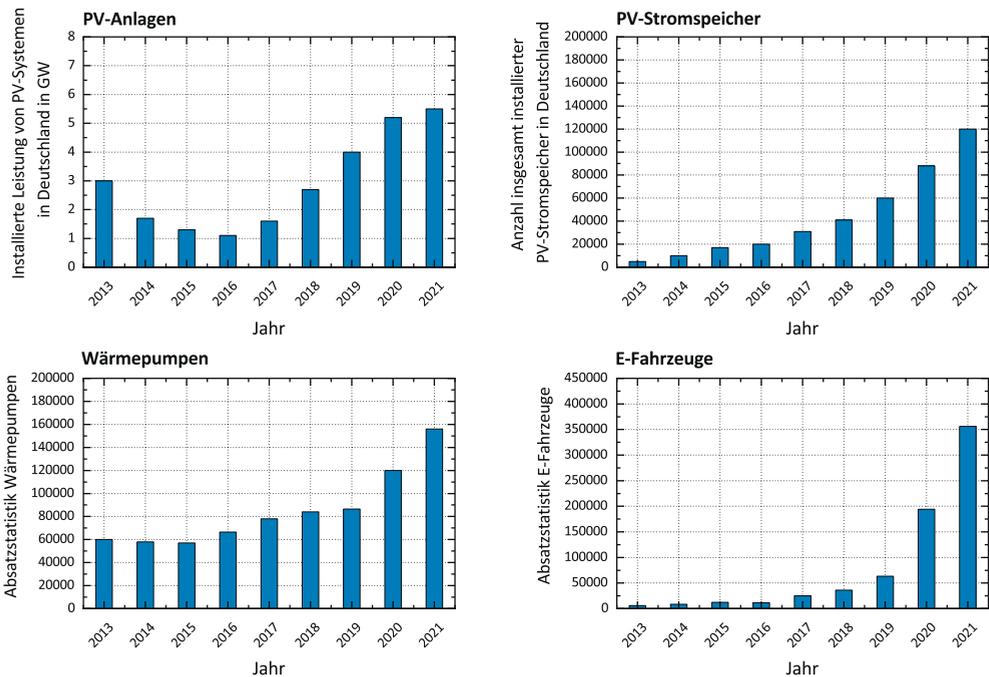


Abb. 1.3: Installation verschiedener dezentraler Energieanlagen + E-Fahrzeuge in Deutschland [22, 23, 78, 84]

Derzeit³ sind $P = 59 \text{ GW}_p$ an Erzeugungsleistung für PV-Systeme installiert. Ausbauziel bis zum Jahre 2030 sollen $P = 215 \text{ GW}_p$ sein. Die aktuell installierte PV-Batterie-Speicherleistung entspricht $P = 2,5 \text{ GW}$ (PV-Batterie-Speicherkapazität $W_{el} = 4,4 \text{ GWh}$) und ist in den letzten Jahren stark angestiegen. Zusätzlich ist ein enormer Zubau von Wärmepumpensystemen aufgrund der Wärmewende zu erwarten. Jährlich geplant sind von der Bundesregierung 500.000 Wärmepumpen-Neuinstallationen. Flankiert werden diese Entwicklungen vom starken Anstieg der E-Mobilität, wobei signifikante Anteile der Ladeinfrastrukturen dezentral, bei den Gebäuden installiert werden sollen. Dies alles führt dazu, dass dem elektrischen Niederspannungsnetz eine Schlüsselrolle bei der Umgestaltung des Energiesystems zukommen wird, da die dezentralen Energieanlagen hier installiert werden.

Charakteristisch für die neuen Energieanlagen wird sein, dass nicht mehr wie bisher die Nachfrage last die Steuerung der Anlagen bestimmt, sondern vielmehr die Residuallast⁴ die bestimmende Größe darstellt. Auf der Nachfrageseite wird der klassische „Consumer“ durch einen „Prosumer“ zunehmend abgelöst.

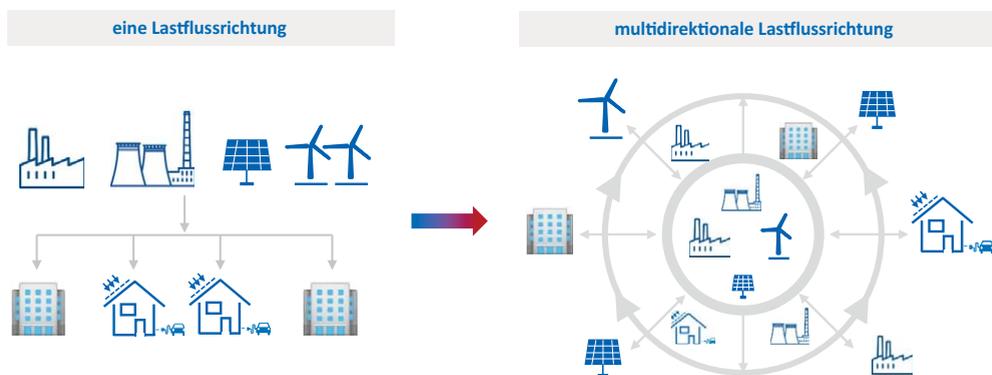


Abb. 1.4: Prognose zur Anzahl von Elektroenergieerzeugungseinrichtungen in Deutschland

Durch den Übergang vom „Consumer“ zum „Prosumer“ ändert sich die Struktur der Energiesysteme (gastechnisch / wärmetechnisch / elektrotechnisch). Die vormals gerichtete Lastflussrichtung geht in eine multidirektionale Lastflussrichtung über (vgl. Abb. 1.4). Diese zeitlich stark variierende Lastflussrichtung erschwert die Fahrplangestaltung der Systeme erheblich, da sich eine Abkehr von den bisher verwendeten, standardisierten Nachfrageprofilen hin zu einem stark zeitabhängigen, individualisierten Nachfrageprofil ergibt. Zusätzlich erschwerend kommt auf der Nachfrageseite noch die Integration der Elektromobilität hinzu. Es werden große regionale Unterschiede auftreten, wobei eine neue kennzeichnende Größe des Energiesystems die Flexibilität sein wird.

Flexibilität:

Unter Flexibilität wird die Fähigkeit verstanden, sich an veränderte Randbedingungen selbsttätig anzupassen.

³ Stand 2021

⁴ Die Residuallast ist der Anteil am Stromverbrauch, der abzüglich der volatilen erneuerbaren Energie bereitgestellt werden muss (Restbedarf an Strom, der gedeckt werden muss).

3 Kommunikationstechnologien

3.1 Grundlagen

Die informationstechnische Verbindung der unterschiedlichen Anlagen im zellularen Energiesystem stellt eine wesentliche Voraussetzung für dessen Realisierung dar. Aus der Automatisierungstechnik ist ein Pyramidenansatz bekannt, mit dem man eine Einteilung der unterschiedlichen Ebenen vornehmen kann. Abb. 3.1 zeigt eine grafische Abbildung dieses Ansatzes [95].

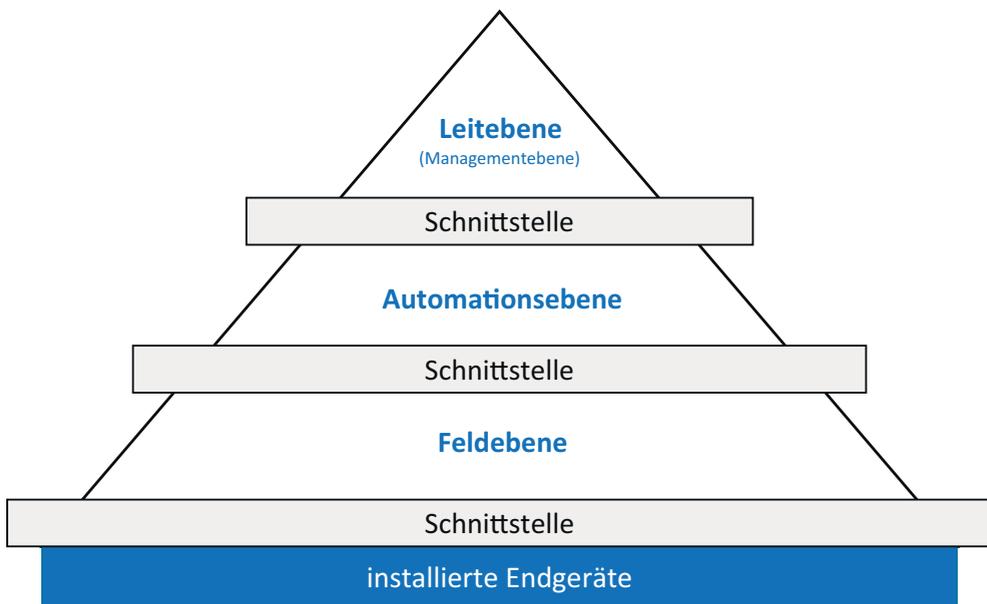


Abb. 3.1: Ebenenmodell der Automatisierungstechnik

Die unterste Ebene ist die interne Geräteebene, die über Schnittstellen an die *Feldebene* angebunden ist. In der Geräteebene werden Sensoren und Aktoren angebunden. Oftmals erfolgt innerhalb der Geräte eine Anbindung über eine eigene Regelung, d.h. applikationsspezifische Controller. Dies ist besonders der Fall, wenn innerhalb der Geräte sicherheitstechnische Funktionen berücksichtigt werden müssen (Regelung des Gasventils bei gastechnischen Geräten, interne Regelung des Kältekreislaufes bei Kälteanlagen). Überlagert, zur Feldebene, ist die *Automationsebene*. Sie enthält Grund- und Verarbeitungsfunktionen. Zu den Grundfunktionen zählen Melden / Messen/ Zählen sowie der Befehl. Unter den Verarbeitungsfunktionen werden manuelle Auswahlmöglichkeiten zu bestimmten Informationen, Anzeigen von Meldungen, Fernbedienungen, Anzeigen von Messwerten, Protokollierung, zeitabhängiges Schalten sowie Störstatistiken und Grenzwertüberwachungen verstanden. Die Automationsebene leitet Informationen aus der Feldebene an

die überlagerte Ebene weiter bzw. empfängt Informationen aus dieser. In der Praxis ist es üblich, zusätzlich Unterstationen und Unterzentralen einzubinden.

Die *Managementebene* fasst alle Informationen zusammen, weist Schnittstellen zu einer Markt-anbindung und Schnittstellen zu einer Interaktion mit dem Menschen (Human Interface) auf. Weiterhin wird in der Managementebene die Verbrauchserfassung, die Anlagenüberwachung, die Parametrierung des Systems sowie das Laden von Programmen in die Automatisierungsebene vorgenommen. Hinsichtlich der Anlagenüberwachung erfolgt der zyklische Aufruf ausgewählter Prozessdaten und die Protokollierung, die Anzeige von Prozessdaten, Ereignismeldungen sowie die Registrierung von Eingriffen und die Ausgabe von Alarmen. Sind Unterstationen im System vorhanden, kann aus der Managementebene heraus eine Sollwertverstellung sowie eine Parametrierung der Regler vorgenommen werden. Abb. 3.2 zeigt eine Struktur dieses Ebenenmodells mit unterschiedlichen Unterzentralen und Unterstationen.

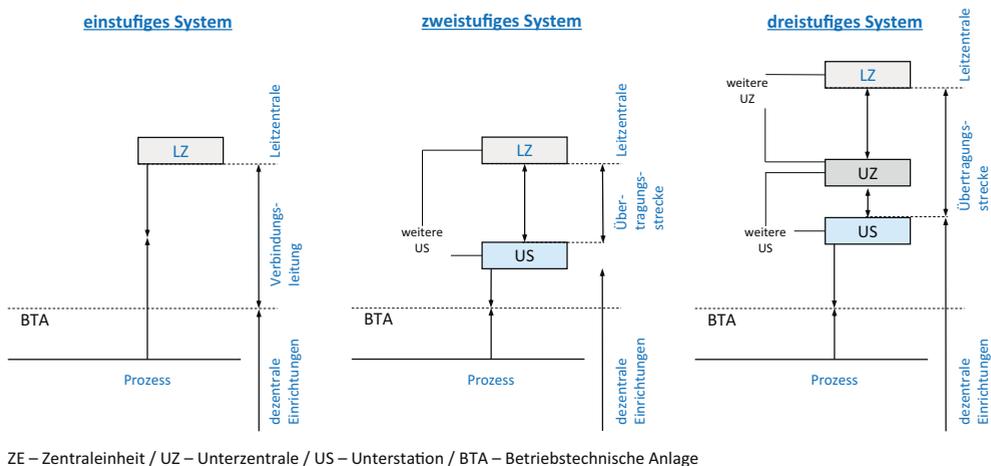


Abb. 3.2: Feldebene und Automatisierungsebene mit Unterstationen und Unterzentralen

Auf lokaler Ebene bei den Betriebstechnischen Anlagen (BTA) werden für die Kommunikation meist Bussysteme eingesetzt. Exemplarisch seien genannt die Bussysteme EIB/KNX, LON und BACnet¹⁹. Die hohe Anzahl von Bussystemen, die derzeit auf dem Markt verfügbar ist, führt jedoch auch zu Problemen, da die Interoperabilität meist nicht gegeben ist. Aus diesem Grunde wurde EE-Bus entwickelt, der als übergeordnete Struktur verstanden werden kann und Schnittstellen bzw. Konverter zu allen gängigen Bussystemen aufweist. Die Bus-Technologie wird überwiegend als kabelgebundene Lösung umgesetzt.

Neben der kabelgebundenen Lösung der Datenübertragung rückt zunehmend die Funktechnologie in den Fokus der Betrachtung zur Anbindung von BTA-Systemen. Sie bietet den Vorteil, dass die Installation sehr viel einfacher ist als bei kabelgebundenen Lösungen, eine hohe Flexibilität vorliegt, was sich wiederum auf die Installationskosten günstig auswirkt. Tab. 3.1 liefert einen Überblick zu gängigen Systemen.

¹⁹ EIB – Europäischer Installationsbus; KNX – Konnex-Bus; LON – Local Operating Network; BACnet – Building Automation and Control Networks

5 Verteilung – Elektrische Netze

5.1 Arten elektrischer Energiesysteme und deren Anwendung

Auch heute noch werden viele unterschiedliche Arten von Elektroenergiesystemen verwendet. Dies ist sowohl durch die historische als auch die technische Entwicklung begründet. Im Folgenden werden die wichtigsten Elektroenergiesysteme vorgestellt.

5.1.1 Gleichspannungssysteme

Die ersten elektrischen Energieversorgungssysteme waren lokale Gleichspannungssysteme. Gleichspannung wurde früher durch Gleichspannungsgeneratoren erzeugt. Heute wird Gleichspannung mit Hilfe von leistungselektronischen Schaltungen durch Umwandlung aus Wechsel- oder Drehspannungssystemen oder direkt durch Batteriesysteme gewonnen. Bei den folgenden Anwendungen kommen Gleichspannungssysteme zum Einsatz:

Mess-, Steuerzwecke und Notbeleuchtung

Für lokale sicherheitsrelevante Anwendungen wird die elektrische Energie von Batterien bzw. Akkumulatoren genutzt, um ein autarkes, hochzuverlässiges Versorgungssystem aufzubauen.

Elektrische Bahnen

Die Straßen-, S-, Industrie- und Grubenbahnen werden oft mit Fahrdrabtspannungen von $U_{b=}$ = 500...3000 V betrieben. Diese Anwendung ist historisch begründet.

Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ)

Bei der HGÜ wird mit Gleichspannung von $U_{b=}$ = 100...800 kV gearbeitet. Bei der klassischen HGÜ werden als zentrale leistungselektronische Bauelemente Thyristoren eingesetzt. Diese können den Stromfluss nur einschalten. Man spricht von netzgeführten Stromrichterschaltungen. Bei neueren Anlagen werden Insulated-Gate Bipolar Transistoren (IGBTs) verwendet, die eine selbstgeführte Betriebsweise ermöglichen. Diese neue Technik findet Anwendung bei der Anbindung von Offshore-Windparks. Ein wesentlicher Vorteil dieser Anlagen besteht darin, dass sich, ähnlich wie bei konventionellen Generatoren, die Wirk- und Blindleistung in weiten Bereichen unabhängig voneinander einstellen lässt. Die HGÜ wird heute immer häufiger genutzt. Einerseits wird der Transport großer Mengen elektrischer Energie über lange Strecken stark vereinfacht. Andererseits stellt die HGÜ für den Betrieb langer Kabelstrecken, welche für die Offshore-Anbindung von Windparks benötigt werden, die einzig sinnvolle technische Lösung dar.

5.1.2 Wechsel- und Drehspannungssysteme

Die Entdeckung der Wechselspannung und die Entwicklung von Wechsel- und Drehspannungsgeneratoren und -motoren sowie des Transformators um 1880 beeinflusste den Einsatz der Elektrizität maßgeblich. Mit Hilfe der Transformatoren kann man sowohl sehr hohe Spannungen, die für den europaweiten Transport elektrischer Energie erforderlich sind, als auch niedrige Spannungen, die für eine einfache Anwendung elektrischer Energie benötigt werden, bereitstellen. Heute werden die folgenden Wechsel- / Drehstromsysteme angewendet:

Wechselspannung $f = 50 \text{ Hz}/60 \text{ Hz}$

Wechselstrom wird in Verbindung mit den Niederspannungsnetzen für Haushalte eingesetzt. In Deutschland erfolgt die Wechselspannungsversorgung in den Niederspannungsnetzen basierend auf Drehspannungsnetzen mit genormter Frequenz und Spannung.

Einphasen-Wechselspannung $f = 16,7 \text{ Hz}$

Die Einphasen-Wechselspannung mit $f_b = 16,7 \text{ Hz}$ wird bei Vollbahnen (z.B. Deutsche Bahn AG) mit einer Fahrdrachtspannung von $U_b = 15 \text{ kV}$ eingesetzt. Die Anwendung hat historische Gründe. Die ersten Bahnmotoren waren Gleichspannungsmotoren, die man mit einer Wechselspannung niedriger Frequenz betrieb.

Einphasen-Wechselspannung $f = 50 \text{ Hz}$

Einige europäische Länder betreiben ihre Vollbahnen mit einer Frequenz von $f_b = 50 \text{ Hz}$ und einer Spannung von $U_{b\sim} = 25 \text{ kV}$.

Drehspannungsversorgung

Für die öffentliche Energieversorgung in Europa werden Drehspannungssysteme genutzt. Dabei handelt es sich um drei zyklisch symmetrische Wechselspannungssysteme mit einer Phasenverschiebung von $\varphi_b = 120^\circ$. Hieraus ergeben sich die folgenden Vorteile:

- Einsparung des Materials und der Verluste des Rückleiters bei symmetrischem Betrieb, da die Summe der drei Leiterströme $I_{L1} + I_{L2} + I_{L3}$ null ist (Index L1 ... L3 steht für die Leiter 1 ... 3). Entsprechendes gilt für die Spannung.
- Fällt ein Leiter des Drehspannungssystems aus, so kann für eine begrenzte Zeit noch ein Teil der elektrischen Energie übertragen werden. Hierdurch bleibt die Synchronität zweier Teilnetze erhalten.
- Im Niederspannungsnetz gibt es die Möglichkeit, die Leiter-Erde-Spannung U_{LE} oder die Leiter-Leiter-Spannung U_{LL} zu verwenden. Es stehen also zwei Spannungen unterschiedlicher Höhe zur Verfügung.
- In Drehstromgeneratoren treten geringere Rüttelmomente auf als in Wechselstromgeneratoren.

Das Interesse zur Anwendung von Gleichspannung für den Transport und die Verteilung elektrischer Energie steigt kontinuierlich. Der größte Nachteil der Gleichspannung im Vergleich zur Wechselspannung bestand darin, dass es keine einfache Möglichkeit gab, die Spannungshöhe frei zu wählen. Bei der Wechselspannung ist dies mit einem Transformator einfach, kostengünstig und sehr effizient möglich. Die neuen leistungselektronischen Bauelemente und Schaltungen haben dies grundlegend geändert. Darüber hinaus nutzen auf der technologischen Ebene immer mehr

dezentrale Erzeugeranlagen und Speicher direkt Gleichspannung. Die Gleichspannung wandelt man heute noch in Wechselspannung um und verbindet die Geräte mit Wechselspannung. Dies gilt zum Beispiel für Photovoltaik-Systeme und Akkumulatoren. Es gibt aktuell zahlreiche Forschungsaktivitäten [19], um die Verteilung elektrische Energie direkt mit Gleichspannung durchzuführen.

5.2 Struktur der elektrischen Energieversorgung

Die elektrische Energieversorgung in Europa basiert auf einem Drehstromsystem und wird in verschiedene Netzebenen eingeteilt. Die Struktur dieser Netzebenen ist in der Abb. 5.1 dargestellt. Die Netzebenen sind durch die Höhe der jeweils verwendeten Spannungen und die Aufgaben in dieser Netzebene definiert. In den Netzebenen 2, 4 und 6 findet die Transformation der Spannung zur Verbindung der beiden benachbarten Netzebenen statt.

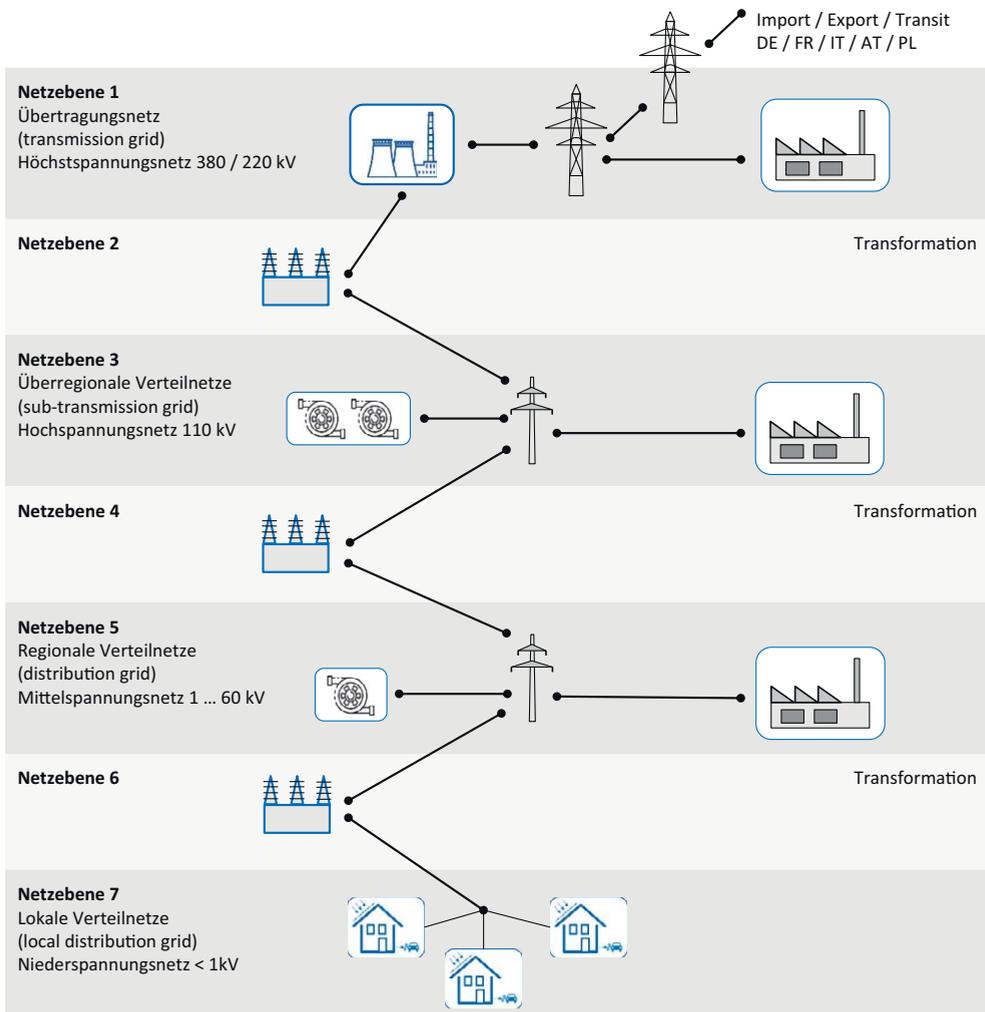


Abb. 5.1: Netzebenen der elektrischen Energieversorgung, basierend auf [140], [153]

11 Praxisbeispiele zellularer Energiesysteme

In den nachfolgenden Abschnitten sollen einige Beispiele von zellularen Energiesystemen aus den Projekten der Autoren vorgestellt werden. Es sei an dieser Stelle ausdrücklich darauf verwiesen, dass die umgesetzten Forschungsprojekte hierbei nicht alle Aspekte eines vollständigen zellularen Energiesystems beinhalten.

11.1 Projekt – Regionales, Virtuelles Kraftwerk TUD/EWE

In den Jahren 2015 – 2017 wurde an der TU Dresden das Forschungsprojekt „Praxiserprobung des Regionalen, Virtuellen Kraftwerks (RVK)“ in Kooperation mit der EWE-Oldenburg⁶² durchgeführt [128]/[130]. Ziel des Forschungsvorhabens war die Erprobung eines Virtuellen Kraftwerks als Vorstufe zu einem zellularen Energiesystem. Untersuchungsgegenstand war im Besonderen die kleinste zur Verfügung stehende KWK-Leistungsklasse ($P_{el} = 1,0$ kW), um den Betrieb des Systems im Wohngebäudebereich (Ein-/Mehrfamilienhäuser) zu untersuchen und notwendige Erkenntnisse in Bezug auf Regelung und Übertragbarkeit auf andere Erzeugungssysteme zu gewinnen. Hierzu wurden unterschiedliche Maßnahmen realisiert. Insgesamt wurden 17 Liegenschaften mit einer einheitlichen Anlagentechnik ausgestattet und informationstechnisch verknüpft. Weiterhin wurden die Anlagen mittels eines im Projekt entwickelten Gateway-Systems (vgl. Abb. 11.6) an ein zentrales Backend angeschlossen und anschließend gezielt gesteuert. In den nachfolgenden Abschnitten sollen die hardwareseitigen, softwareseitigen und algorithmischen Erkenntnisse aus dem Projekt zusammengefasst werden.

11.1.1 Gebäude / Anlage

Das *regionale, virtuelle Kraftwerk* wurde als Demonstrationsvorhaben von der TU Dresden und der EWE AG geplant, aufgebaut und umgesetzt. Angeordnet war es in der Region um Oldenburg und bestand aus Ein- und Zweifamilienhäusern sowie Gewerbeliegenschaften, welche einen unterschiedlichen Wärmebedarf aufweisen. Abb. 11.1 zeigt die Anordnung der Liegenschaften um Oldenburg und exemplarische Gebäude.

⁶² EWE (ehemals Energieversorgung Weser-Ems) Aktiengesellschaft



Abb. 11.1: Regionales, virtuelles Kraftwerk TUD / EWE AG

Gegenstand war eine einheitliche Anlagentechnik, die aus folgenden Komponenten bestand:

- Mikro-KWK-Anlagen oder Brennstoffzelle
- Gas-Brennwertgerät
- thermischer Speicher inkl. Heizstab

Alle Komponenten wurden vollständig mit Messtechnik⁶³ erfasst, um Fehler zu detektieren bzw. Systembilanzen erstellen zu können. Abb. 11.2 zeigt die umgesetzte hydraulische Schaltung des Systems. In Abb. 11.3 ist exemplarisch eine Anlage des RVK-Feldtests dokumentiert.

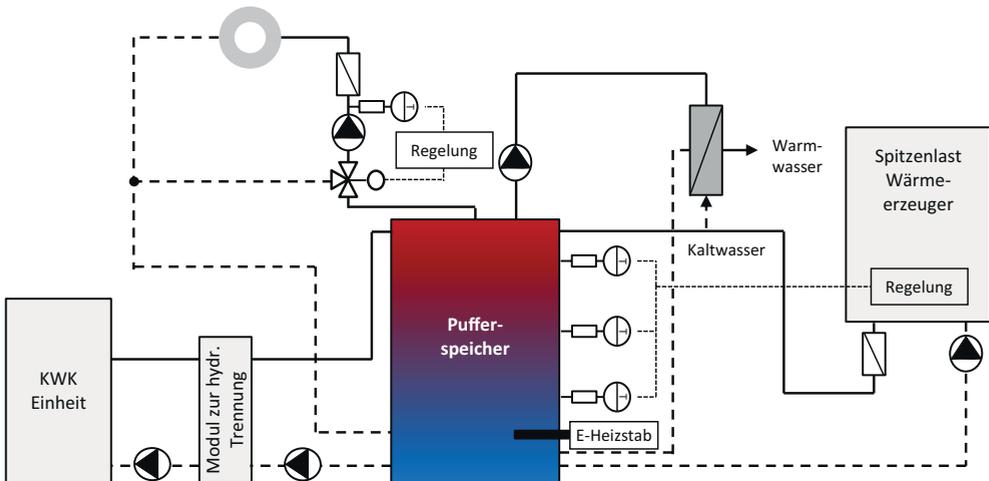


Abb. 11.2: Hydraulische Schaltung der RVK-Anlage

⁶³ Temperatursensoren, Volumenstromsensoren, Sensoren zur elektrischen Leistungsaufnahme und -abgabe