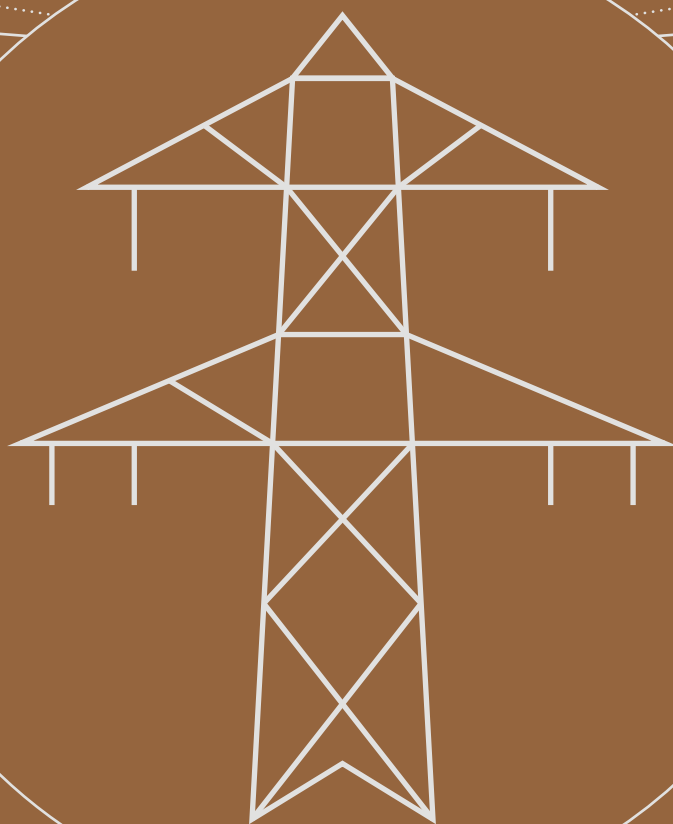


STROM NETZ FLUSS

Herausgegeben von Markus Graebig, Georg Erdmann,
Niko Rogler, Ingo Uhlig & Ellery Studio



Ein Atlas unserer Stromwelt
und ihres Wandels

Gewidmet unseren Kindern, Enkelinnen und Enkeln, stellvertretend für alle Kinder dieser Welt, denen wir den Übergang zu einer klimaneutralen Energieversorgung schulden.

STROM NETZ FLUSS

Ein Atlas unserer Stromwelt
und ihres Wandels

Inhaltsverzeichnis

5 Vorwort

7 Stromversorgung im Heute:
ein Atlas unseres elektrischen Energiesystems

11 Akteurs-Layer-Modell

13 Physik

15 Markt

17 Daten

19 Spielregeln

21 Zoom-ins: Einblicke in die Stromwelt

23 Strom und Spannung. Zwei Grundgrößen der Elektrotechnik

25 Messen, Zählen, Wägen – Kennzahlen der Stromerzeugung

29 Netzbetriebsmittel

35 Systemführung

37 Frequenz

40 Systemdienstleistungen

45 Netzengpassmanagement

49 Die Kupferplatte

51 Dezentralisierung

56 Der Bilanzkreis

59 Regelenergie

61 Merit Order – oder: Was ist der richtige Preis für Strom?

65 Smart Meter

68 Wie setzt sich meine Stromrechnung zusammen?

71 Das Zieldreieck der Energiewirtschaft

75 Das EEG – Funktion, Entwicklung und Ausblick

79 Rolle der EU im Energierecht am Beispiel des Unbundling

83 Die 2. Phase der Energiewende: 100 % Erneuerbare ins System integrieren

89 Flexibilität

- 93 Smart-Building und Power-to-Heat im konventionellen (Gebäude-)Gewand
 - 97 Flexibler Einsatz von Energie in der Industrie
 - 101 Klärwerke für die Energiewende
 - 105 Die Flexibilitätsplattform
-

109 Sektorkopplung

- 113 CO₂-neutrale Versorgung von Neu- und Bestandsbauten mitten in Berlin
 - 117 Windenergie im Wärmenetz
 - 120 Fernsteuerung für Wärmepumpe und Nachtspeicher
 - 123 Hochtemperaturspeicher
-

127 Digitalisierung

- 131 Das Betriebssystem der Energiewende
 - 134 Künstliche Intelligenz und digitale Stromzähler
 - 137 Die „Gelben Seiten“ der Energiewende
-

141 Gesellschaft

- 145 Im Sandkasten der Energiewende
 - 149 Serious Gaming Energiewende
 - 153 In den Dörfern. Energien erzählen in den 2010er-Jahren
-

159 Schlusswort

161 Autor:innen

163 Abkürzungen

165 Impressum

Vorwort

Wir wären gewiss eine Nation von Astronaut:innen, Lokomotivführer:innen und Ärztinnen und Ärzten – wenn nur mehr Menschen sich bei ihrer Berufswahl gefragt hätten: „Wie kann ich meinen Job eines Tages einem Kind erklären?“ Die Energiewirtschaft hätte einen vergleichsweise schwereren Stand, da komplexe Aufgaben wie „Bilanzkreismanager:in“, „Messstellenbetreiber:in“ oder „System-Operator:in“ ohne tiefere Erläuterungen kaum Resonanz auf Schulhöfen und Cocktailpartys versprechen. Wer nicht selbst in der Branche tätig ist oder ein besonderes Interesse dafür aufbringt, kann in der Einsicht ruhen, dass Strom aus der Steckdose kommt. Die komplexen technischen und organisatorischen Leistungen, um die Elektrizitätsversorgung von Gesellschaft und Wirtschaft rund um die Uhr, 365 Tage des Jahres und fast immer ungestört zu gewährleisten, sind nicht einfach zu verstehen. Ins öffentliche Bewusstsein gerückt wurde die Elektrizitätswirtschaft eigentlich erst durch die Debatten um Klimawandel, Kernschmelzen und Kohlegruben – allesamt Themen, die eher für Dystopien als für Faszination taugen. Und trotzdem oder gerade deshalb genießt die deutsche Energiewende große Unterstützung in der Bevölkerung, weil die Einsicht in die Notwendigkeit eines ökologisch nachhaltigen Systemumbaus besteht. Zustimmung aus dem Kopf, nicht aus dem Herzen.

Dieses Buch ist geschrieben von Menschen, deren berufliche Leidenschaft der Energieversorgung gilt. Die Energiewende ist für uns so etwas wie der erste Flug zum Mond – eine unglaublich spannende Herausforderung, ein Quantensprung unserer Innovationskraft und eines der größten Menschheitsprojekte unseres Jahrhunderts. Wir haben dieses Buch geschrieben in der Hoffnung, ein Stück unserer Leidenschaft mit Ihnen zu teilen und Ihnen einen Einblick in die sonst verborgene Welt der Stromversorgung zu geben. Im ersten Teil des Buches zeigen wir, wie die Stromversorgung heute funktioniert. Dazu haben wir, eigens für

dieses Buch, ein bislang noch nie veröffentlichtes Modell der Stromwirtschaft entwickelt, in dem wir anschaulich machen wollen, wie und auf welche Weise die Akteur:innen des Stromsystems in komplexen Netzwerken auf technischer, wirtschaftlicher und rechtlicher Ebene zusammenwirken. Im zweiten Teil des Buches werfen wir dann einen Blick in die Zukunft und zeigen anhand von Beispielen, was es neben dem essenziell wichtigen Ausbau von Windkraft- und Solaranlagen braucht, um eine 100-prozentig erneuerbare Stromversorgung möglich zu machen.

Das Buch ist im Rahmen des Projekts „WindNODE – Das Schaufenster für intelligente Energie aus dem Nordosten Deutschlands“ entstanden. An diesem Forschungsvorhaben haben sich über 70 institutionelle Partner aus Wirtschaft und Wissenschaft beteiligt. Ziel von WindNODE ist es, Technologien und Musterlösungen für ein komplett erneuerbares Energiesystem zu entwickeln. Einige Ergebnisse davon zeigen wir im zweiten Teil des Buches.

Für die Förderung von WindNODE im Rahmen des SINTEG-Programms danken wir dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Für die Mitarbeit an diesem Buch bedanken wir uns bei all den Kolleginnen und Kollegen, die ihre Expertise und Leidenschaft eingebracht haben – allen voran Andreas Corusa für viel guten Rat und zupackende Tat sowie Maud Roßdeutscher für ihr Lektorat. Ein ganz besonders herzlicher Dank geht an das Team von Ellery Studio, welches dieses Buch zu etwas ganz Besonderem gemacht hat – zu einem infografischen Sachbuch, inspiriert nicht zuletzt von der in unserer Jugend geliebten „Was ist was“-Serie und getragen von unserem Wunsch, das Eintauchen in die Energiewende auch zu einem ästhetischen Erlebnis zu machen. Wir wünschen Ihnen eine anregende, erkenntnisreiche Lektüre.

Die Herausgeber, im März 2021



Wir befürworten die Idee einer gerechten Sprache und versuchen sie in diesem Buch wie folgt umzusetzen: Wir sprechen von Ingenieurinnen und Ingenieuren, von Expert:innen oder von Studierenden. Darüber hinaus verhält es sich so, dass Wörter wie Produzent, Erzeuger oder Verbraucher oftmals weniger Personen, sondern technische Anlagen oder Institutionen, z. B. ein Blockheizkraftwerk, einen Windpark, Stadtwerke oder den Fuhrpark eines Unternehmens bezeichnen. Diese Konventionen behalten wir bei.

Stromversorgung im Heute: ein Atlas unseres elektrischen Energiesystems

Markus Graebig

Bevor wir einsteigen in das Akteurs-Layer-Modell und bevor wir die vier Ebenen (Layer) unserer Stromwelt – Physik, Markt, Spielregeln, Daten – mit Bild und Text bespielen, ist hier der Ort für eine kurze Einführung. Eine Einführung in Sachen Energie, die sich dem Phänomen mit leichten Schritten nähert und dabei helfen soll, bei den späteren Erkundungsrunden im Takt zu bleiben.

Was ist Energie?

Energie ist die Fähigkeit, Arbeit zu verrichten. Das ist ein ziemlich abstraktes physikalisches Konzept. Besser greifbar wird Energie anhand ihrer Erscheinungsformen:

- **Bewegungsenergie** (kinetische Energie), die ein jeder bewegter Körper in sich trägt,
- **Lageenergie** (potenzielle Energie), die ein Körper gewinnt, wenn man ihn hochhebt – sodass er anschließend wieder hinunterfallen, -rollen oder -fließen kann,
- **Wärmeenergie** (thermische Energie), beispielsweise das beheizte Wohnzimmer oder das warme Frühstücksei,
- **Strahlungsenergie**, insbesondere von der Sonne als unserer wichtigsten Energiequelle,
- **chemische Energie**, die beispielsweise in Verbrennungsprozessen als Wärme frei werden kann, wenn Atome und Moleküle exotherme Reaktionen eingehen,
- **Kernenergie** (nukleare Energie), die in den Atomkernen steckt und bei deren Spaltung in Wärme- und Strahlungsenergie umgewandelt werden kann,
- **elektrische Energie** (Strom), die in vielfältiger Form in der Natur vorkommt, etwa als Blitze in Gewittern, und die in der modernen Technik eine herausragende, geradewegs universelle Rolle spielt.

Energie kann nicht erzeugt und nicht vernichtet werden. Das ist ein Naturgesetz, welches als Erster Hauptsatz der Thermodynamik bekannt ist. Etwas formaler ausgedrückt: Die gesamte Energiemenge in einem geschlossenen System bleibt konstant. Aber Energie kann von einer Form in eine andere umgewandelt werden. Bei der Verbrennung eines Holzscheits wird chemische Energie in Wärme umgewandelt. In der Turbine eines konventionellen Kraftwerks wird Wärme (heißer Wasserdampf) in Bewegung (Rotation der Turbine) umgewandelt, welche dann den angeschlossenen Generator antreibt und dort in elektrische Energie umgewandelt wird. Und in einer Lampe wird elektrischer Strom in Strahlungsenergie (Licht) umgewandelt. Die meisten Energieumwandlungen sind mit Umwandlungsverlusten verbunden, meist in Form von unerwünschter Abwärme. So wandelt beispielsweise eine konventionelle Glühlampe nur einen sehr geringen Teil der eingesetzten elektrischen Energie in die gewünschte Energieform, das Licht, um; der größte Teil wird in eigentlich unerwünschte Wärme umgewandelt. In einem Kohlekraftwerk wird längst nicht die gesamte chemische Energie aus der Verbrennung der Kohle in elektrischen Strom umgewandelt; ein guter Teil endet als Abwärme, die über den Kühlturm oder einen nahegelegenen Fluss abgeführt wird.

Tatsächlich steht Wärme, ob gewollt oder nicht, am Ende fast aller Energieumwandlungsketten. Der umgekehrte Weg ist wesentlich mühsamer. Wärme lässt sich nur unvollständig

in andere, „höherwertige“ Energieformen wie Bewegung oder elektrischen Strom umwandeln. Auch das basiert auf einem Naturgesetz, dem Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik. Er hat wichtige Konsequenzen überall dort, wo Wärmekraftmaschinen – also beispielsweise konventionelle Kraftwerke oder Verbrennungsmotoren von Autos – im Einsatz sind: Ein gewisser Teil der eingesetzten Energie geht unvermeidlich immer als Abwärme verloren, selbst wenn die Ingenieur:innen eine perfekt optimierte Maschine gebaut haben. Elektrischer Strom hingegen ist aus technischer Sicht eine Art Alleskönner, gewissermaßen die Königsform der Energie, da er sich fast vollständig und sauber in alle anderen gewünschten Energieformen umwandeln und sich außerdem sehr gut über lange Distanzen an seinen Einsatzort übertragen lässt.

Wie misst man Energie?

Es gibt verschiedene Einheiten, in denen Energiemengen gemessen werden. Die offizielle physikalische Energieeinheit ist das Joule (Formelzeichen: J). Rund 4,2 Joule sind diejenige Wärmemenge, die benötigt wird, um 1 g Wasser um 1 °C (oder physikalisch präziser: um 1 Kelvin) zu erwärmen. Eine andere (veraltete) Einheit ist die von Nahrungsmittelangaben her bekannte Kalorie, wobei 1 Kalorie ungefähr 4,2 Joule entspricht.

In der Technik, speziell in der Elektrotechnik, wird häufig die Kilowattstunde (kurz: kWh) als Energieeinheit verwendet, und das wollen wir auch in diesem Buch tun. Eine Kilowattstunde entspricht 3,6 Millionen Joule (Megajoule, abgekürzt MJ), oder als Formel ausgedrückt: 1 kWh = 3,6 MJ. Wer sich schon einmal seine Stromrechnung angeschaut hat, ist mit der Kilowattstunde vertraut; wenn sie aus der Steckdose kommt, kostet sie aktuell gut 30 Cent. Aber wie kann man sich den Energiegehalt von einer Kilowattstunde vorstellen?

- Mit 1 kWh kann man ca. 10 Liter Teewasser zum Kochen bringen.
- Mit 1 kWh kann man, je nach Modell, bis zu 100 Male ein Smartphone komplett aufladen.
- Mit 1 kWh kann eine 100-Watt-Glühlampe 10 Stunden lang leuchten.
- Ein 1,5 Tonnen schweres Auto, beschleunigt auf die Spitzengeschwindigkeit von 250 km/h, trägt eine kinetische Energie von 1 kWh in sich.
- Ein 120 kg schwerer Wanderer, der Deutschlands höchsten Berg, die rund 3.000 m hohe Zugspitze, erklommen hat, besitzt gegenüber dem Meeresniveau eine potenzielle Energie von 1 kWh.

Mit der elektrischen Energie, die in Kilowattstunden (kWh) gemessen wird, korrespondiert die elektrische Leistung, gemessen in Kilowatt (kW). Wenn man beispielsweise eine Glühlampe mit einer Leistung von 100 Watt (0,1 kW) zwei

Thermische Energie

$$E = m \cdot c \cdot \Delta T$$



10 Liter
Teewasser kochen

Elektrische Energie

$$E = U \cdot I \cdot t$$



Bis zu 100-mal
Smartphone aufladen

Bewegungsenergie

$$E = 1/2 \cdot m \cdot v^2$$



Ein Auto (1,5 t),
das 250 km/h fährt

Potenzielle Energie

$$E = m \cdot g \cdot h$$



Wanderer (120 kg), der auf Zugspitze
mit 3.000 m Höhe geklettert ist

E = Energie
m = Masse

g = Erdbeschleunigung
h = Höhe

v = Geschwindigkeit
c = spezifische Wärmekapazität

ΔT = Temperaturdifferenz
U = Spannung

I = Stromstärke
t = Zeit

Wie kann man sich den Energiegehalt einer Kilowattstunde (kWh) vorstellen?

Quelle: Eigene Darstellung

Stunden (2 h) lang betreibt, bedeutet dies eine elektrische Energieaufnahme von $0,1 \text{ kW} \cdot 2 \text{ h} = 0,2 \text{ kWh}$. Wenn ein Kraftwerk mit einer installierten Leistung von 100 MW (Megawatt) eine halbe Stunde auf voller Leistung läuft, hat es $100 \text{ MW} \cdot 0,5 \text{ h} = 50 \text{ MWh}$ (Megawattstunden) elektrische Energie geliefert.

Energie und Leistung auseinanderhalten zu können, den Unterschied zwischen kWh und kW zu kennen, ist eine sprichwörtliche Mindestanforderung für jeden, der an energiewirtschaftlichen Debatten teilnehmen möchte.

Ein Energieflussbild für Deutschland

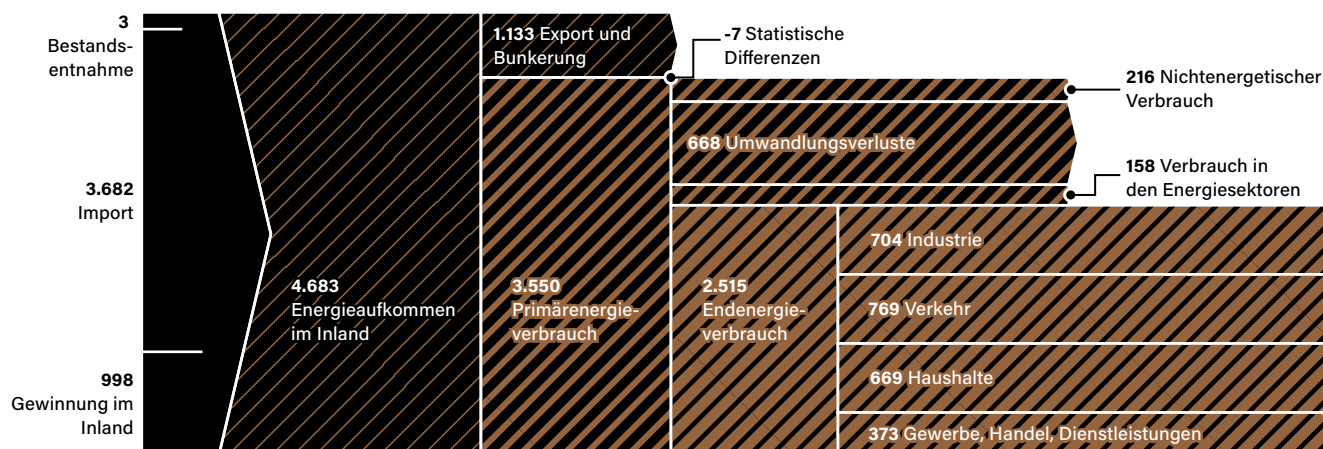
Unsere Energienutzung und Energieumwandlung lässt sich in Energieflussbildern darstellen, welche für Deutschland von der AG Energiebilanzen regelmäßig veröffentlicht werden. Überhaupt ist die Website der AG Energiebilanzen (ag-energiebilanzen.de/) eine wahre Fundgrube und offizielle Referenz für alle, die Daten zum deutschen Energiesystem suchen. Ein Energieflussbild zeigt, wie viel von welcher Energieform eingesetzt und für welche Anwendungen genutzt wird. Eine vereinfachte Form des Energieflussbildes für die Bundesrepublik Deutschland (Stand 2019) ist in der Abbildung oben zu sehen. Die Zahlen sind in Terawattstunden (TWh) angegeben. Der Vorsatz „Tera“ bedeutet „Billion“ (10^{12}), also entspricht eine Terawattstunde (10^{12} Wh) einer Milliarde Kilowattstunden ($10^9 \times 10^3 \text{ Wh}$).

Mit Primärenergie bezeichnet man Energieformen, die wir in der Natur antreffen. Das können fossile Energie (Kohle, Erdöl, Erdgas), Kernenergie (Uran) und erneuerbare Energie (Sonnenstrahlung, Wind, Wasserkraft sowie Biomasse wie beispielsweise Holz) sein. In manchen Fällen setzen wir die Primärenergieträger direkt für unsere technischen Bedarfe ein, beispielsweise dann, wenn wir mit Holz heizen

oder wenn wir den Wind zum Antrieb eines Segelschiffs nutzen. Oftmals aber benötigen wir umgewandelte Energieträger, wobei die Energieumwandlung dazu dient, aus dem Primärenergieträger diejenige Endenergie zu gewinnen, die für den technischen Einsatz gewünscht ist. So wird beispielsweise Kohle (Primärenergie) in Kraftwerken verbrannt, um Strom (Endenergie) zu erzeugen. Bei der Umwandlung von Primär- in Endenergie entstehen Umwandlungsverluste in Form von Wärme. Der nichtenergetische Verbrauch, der ebenfalls im Energieflussbild eingezeichnet ist, beruht vor allem auf der stofflichen Nutzung von Energieträgern, insbesondere Erdölprodukte und Erdgas, in der chemischen Industrie (Herstellung von Kunststoffen, Düngemitteln etc.).

Das Energieflussbild zeigt auch an, welche Anteile der Endenergie in den jeweiligen Verbrauchssektoren – Industrie, Verkehr, Haushalte sowie GHD (Gewerbe, Handel, Dienstleistungen) – zum Einsatz kommen. In diesem vereinfachten Bild ist nicht eingetragen, welche Formen von Endenergie (Strom, Benzin, Diesel etc.) für welcherlei Anwendungen (Antriebe, Wärme, Beleuchtung etc.) genutzt werden. Aber die ausführlichen Tabellen der AG Energiebilanzen geben darüber Auskunft.

Fast immer wird Endenergie noch ein weiteres Mal umgewandelt, um die eigentlich gewünschte Energiedienstleistung zu erhalten. Niemand braucht elektrischen Strom um seiner selbst willen, sondern er wird eingesetzt, um ein Zimmer zu beleuchten, einen Computer zu betreiben, warmes Wasser herzustellen oder die Speisen im Kühlschrank zu kühlen. Die Energie, die den eigentlich gewünschten Nutzen stiftet – Licht beispielsweise oder Wärme – bezeichnet man als Nutzenergie. Was genau „Nutzenergie“ ist, unterliegt jedoch subjektiven Wertungen und ist daher schwer messbar. Dieselbe Lampe, die gerade noch meinen Arbeitsplatz beleuchtet, kann diese nützliche Eigenschaft im nächsten Moment verlieren, wenn ich den Raum verlasse und das Licht eigentlich gar nicht mehr benötige.



Der Anteil der erneuerbaren Energieträger am Primärenergieverbrauch liegt bei 14,8 %.

Energieflussbild 2019 für die Bundesrepublik Deutschland in Terawattstunden (TWh)

Quelle: AG Energiebilanzen (2020)

In diesem Buch konzentrieren wir uns auf den Strom

Ziemlich genau ein Drittel der in Deutschland eingesetzten Primärenergie fließt in die Stromerzeugung. Die restlichen zwei Drittel dienen der Energieversorgung vor allem im Verkehrs- und Wärmesektor sowie in der Industrie. In diesem Buch geht es um die Stromversorgung, die aufgrund der Besonderheiten des elektrischen Stroms – gute Übertragbarkeit, schlechte Speicherbarkeit, vielfältigste und saubere Einsatz- und Umwandlungsmöglichkeiten – eine herausragende Bedeutung für unser Energiesystem hat. Dennoch darf die Energiewende nicht als Stromwende stehen bleiben. Auf dem Weg zur klimaneutralen Energieversorgung werden wir mit 100 Prozent erneuerbarem Strom erst 33 Prozent der Herausforderung bewältigt haben. In dieses sehr spezielle Drittel tauchen wir auf den nächsten Seiten ein und wollen im ersten Hauptteil dieses Buches zunächst verstehen, wie die Stromversorgung im Status quo funktioniert.

Akteurs-Layer-Modell

Wer sich mit Energiewirtschaft befasst, begegnet schnell der klassischen energiewirtschaftlichen Wertschöpfungskette: Strom wird in Kraftwerken erzeugt, über die Börse oder andere Märkte gehandelt, durch Netze übertragen und verteilt, schließlich wird er von Einzelhändlern (Vertriebe) an Endkunden verkauft. In Wirklichkeit ist die Welt viel weniger linear, und sie spielt sich auf mehreren Ebenen (Layer) ab: Elektrische Energieversorgung ist Physik, sie ist aber auch Marktwirtschaft, zu ihr gehören Daten- und Geldflüsse sowie ein rechtlicher bzw. regulatorischer Rahmen. Die enge Verflechtung dieser verschiedenen Ebenen kann verwirrend sein. Deshalb haben wir die zugrunde liegenden Strukturen herausgearbeitet: Die zentralen Akteure der elektrischen Energieversorgung wurden in eine Übersicht eingetragen und deren Beziehungen untereinander dargestellt – und zwar jeweils in getrennten Bildern für die physikalischen, marktlichen, datengetriebenen und rechtlichen Beziehungen. Das Ergebnis ist das Akteurs-Layer-Modell, welches wir auf den folgenden Seiten präsentieren.

Stromerzeuger

(Einspeisung)

Kraftwerke, die Elektrizität erzeugen und ins Netz einspeisen. Konventionelle Großkraftwerke (Kern- und Kohlekraftwerke) werden zunehmend durch erneuerbare Erzeuger (Windkraft, Photovoltaik, Biomasse) abgelöst. Das sind größtenteils kleine, dezentrale Anlagen – insgesamt knapp 2 Millionen in ganz Deutschland.

Prosumer

(Ein- und Ausspeisung)

Ein Prosumer ist beides in einem – Produzent und Konsument von Strom. Das sind typischerweise Privathaushalte mit eigenen Solaranlagen (Photovoltaik), die zeitweise ihren eigenen Strombedarf decken, ja sogar Strom ins Netz einspeisen. Wenn die Sonne nicht scheint, beziehen sie Strom aus dem Netz.

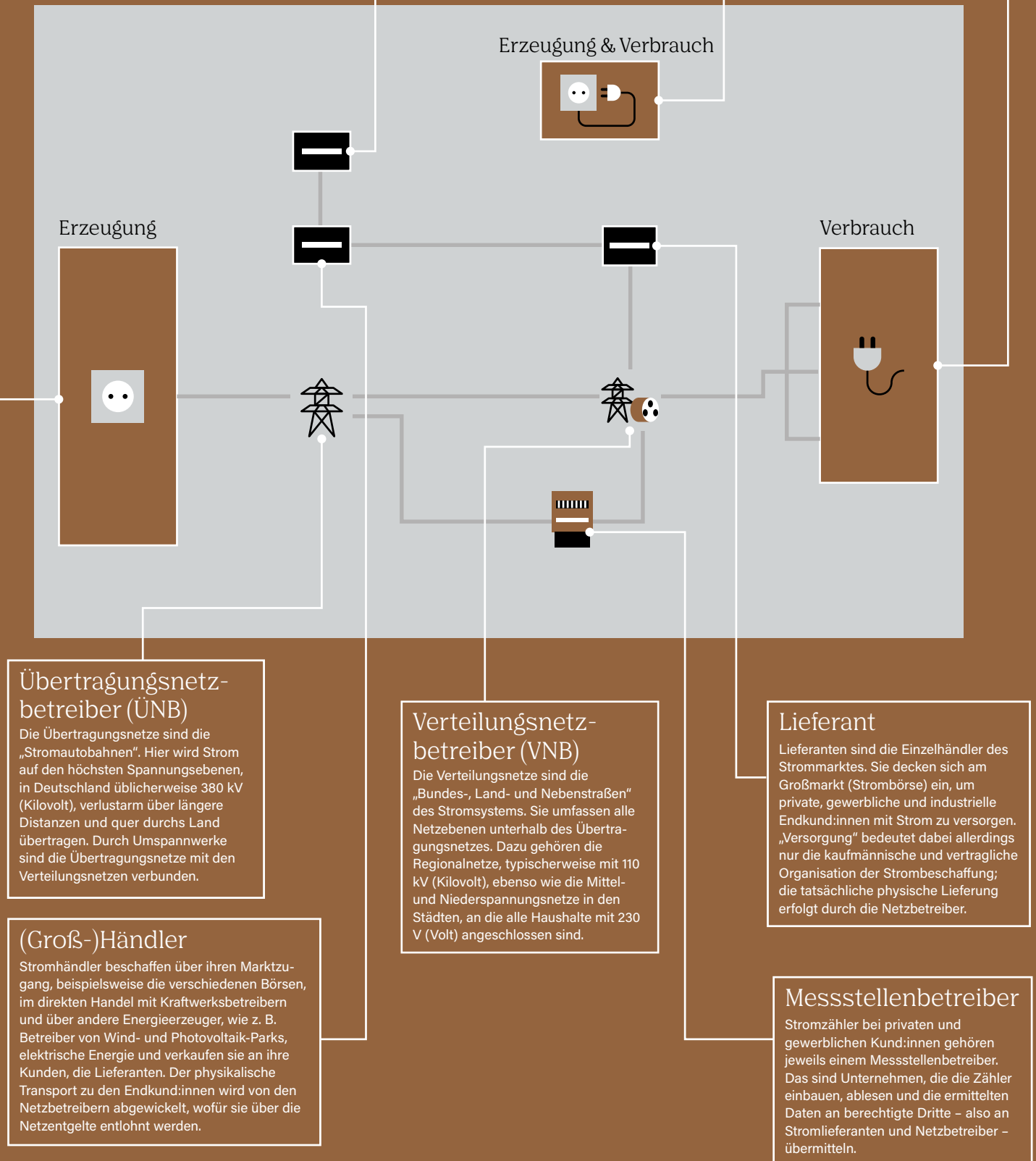
Strombörsen

Die Strombörsen sind die wichtigsten Großhandelsplätze, an denen Erzeuger ihren Strom anbieten und Großhändler und -verbraucher den Strom nachfragen. Strombörsen für den deutschen Markt sind vor allem die EEX (European Energy Exchange) in Leipzig und die EPEX Spot (European Power Exchange) in Paris.

Stromkund:innen

(Ausspeisung)

Private, gewerbliche und auch viele industrielle Kund:innen sind die Endabnehmer von Strom und beziehen ihn über einen Lieferanten ihrer Wahl. Manche Großverbraucher, speziell in der Industrie, beziehen ihren Strom direkt und ohne zwischengeschalteten Lieferanten am Großmarkt.



Physik

Wie kommt der Strom in die Steckdose? Wir betreten das Feld der elektrischen Energietechnik. Sie fußt auf Naturgesetzen, die so berühmte Physiker:innen wie James Clerk Maxwell und Gustav Robert Kirchhoff beschrieben haben. Stellvertretend für die Ingenieur:innen, die darauf aufbauend die moderne Elektrotechnik geschaffen haben, sei hier Werner von Siemens genannt. Noch heute wird Strom in Kraftwerken erzeugt, deren Generatoren nach dem dynamoelektrischen Prinzip arbeiten, das Siemens im Jahr 1867 entdeckt hat. Der Strom wird durch Netze transportiert, bis hin zu den Verbraucher:innen, die ihn in sogenannte Nutzenergie umwandeln: Wärme, Kälte, Bewegung, Licht, Rechenleistung. Wie der Strom vom Kraftwerk zu den Verbraucher:innen kommt, zeigt unser erster Layer „Physik“.

↓ Ein **Speicher** kann nach Bedarf bzw. Füllstand Energie aus dem Netz entnehmen (Auspeisung) oder Energie ins Netz geben (Einspeisung).

↑ Der **Prosument** kann, durch beispielsweise eine Photovoltaik-Anlage auf dem Dach, für die Selbstnutzung Energie erzeugen. Wird zu wenig erzeugt, wird Strom aus dem Netz bezogen. Wird zu viel erzeugt, speist der Prosument ins Netz ein.

Erzeugung



Konventionelle Stromerzeuger

(aus denen Deutschland zeitnah aussteigt)

- Nuklear
- Kohle



Vermarktung

Nicht-gefordert

- Gas
- Öl

(zur Aufrechterhaltung von Versorgungssicherheit)

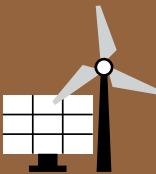


Gefördert (KWKG)

Wird Strom und Wärme gleichzeitig erzeugt, wird dies mit einem besonderen Zuschlag belohnt.

Fluktuierende erneuerbare Stromerzeuger

- Wind
- Photovoltaik



Gefördert (EEG)

Strom aus erneuerbaren Energien wird finanziell besonders gefördert und genießt im Stromnetz einen Einspeisevorrang.

Steuerbare erneuerbare Stromerzeuger

- Biomasse
- Wasserkraftwerk (Laufwasser- und Speicherkraftwerk)



← Anschluss ÜNB nach Erzeugungsleistung und Spannungsebene:

ÜNB – große konventionelle Kraftwerke, Wasserkraft, Offshore-Wind

ÜNB

ÜNB = ÜBERTRAGUNGSNETZBETREIBER

Die „Autobahn“ des Stromnetzes. Bei Überlastung der Netze führt der ÜNB in Koordination mit dem VNB Maßnahmen für das Netzengpassmanagement aus.

← Anschluss VNB je nach Erzeugungsleistung und Spannungsebene:

VNB – kleine konventionelle Kraftwerke (z. B. Kraft-Wärme-Kopplung (KWKG)), kleine Laufwasserkraftwerke, Onshore-Wind, Photovoltaik, Biomasse.

380-kV-Leitung

Freileitung und Mast, in Ausnahmefällen Kabeltunnel.

1

Umspannwerk

Transformiert von einer Spannungsebene zu einer anderen z.B. von Höchstspannung (380 kV) auf Hochspannung (110 kV).

Höchstspannung = 380 kV

4

Freileitungen auf großen Masten, nur in Ausnahmefällen: Erdkabel.

Alle Einspeiser ab 7 kW bekommen ein intelligentes Messsystem.

Bezeichnung der Spannungsebenen und Phänomenologie

Höchstspannung (HöS) = 220–380 kV

Hochspannung (HS) = 110 kV

Mittelspannung (MS) = 10–30 kV

Niederspannung (NS) = 1 kV

Erzeugung & Verbrauch

(Ein- und Ausspeisung)

Speicher

z. B. Batterien, Schwungmasse, Pumpspeicherwerk

Prosumer

Produzent und Konsument

Vermarktung

Individuelle Fördermechanismen.

Anschluss mit Zähler
zur bidirektionalen Messung (Bezug und Einspeisung).

↓ Einige Industriekunden mit sehr hohem Strombedarf sind direkt ans Übertragungsnetz angeschlossen.

Höchstspannung
= 380 kV

↓ Viele Industriekunden sind über das Hochspannungsnetz am VNB angeschlossen.

110-kV-Leitung
auf dem Land:
Freileitung und Mast, in
der Stadt: Erdkabel.

Hochspannung
= 110 kV

2

VNB

**VNB = VERTEILUNGS-
NETZBETREIBER**
Die „Landstraßen“ des Stromnetzes.

Niederspannung
= 1 kV

Mittelspannung
= 10 kV

10-kV-Leitung
Kabel.

(Orts-)Netzstation
Im Trafo-Häuschen wird
Spannung von Mittelspannung auf
Niederspannung umgewandelt.

Kabelverteiler-
schrank

↓ Z. B. Straßenleitungen werden
in Hausleitungen aufgeteilt.

Verbrauch

Kunde Industrie

Beispielsweise Metall-
oder Chemie-Industrie
Hoher Stromverbrauch



Kunde Gewerbe

Beispielsweise Schreiner:in,
Hotels, Restaurants,
Einzelhandel



Kunde Haushalt

Haus, Wohnung. Alles Weitere
hinter dem Hausanschluss
machen Elektriker:innen,
Vermieter:innen,
Eigentümer:innen



Sektorkopplung

Power-to-X, Schnittstelle aus
dem Stromsektor zu Wärme,
Kälte, Mobilität, Wasserstoff

Zoom-ins auf Seite:



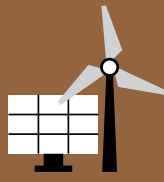

- 23 Strom und Spannung.
- 25 Messen, Zählen, Wägen – Kennzahlen der Stromerzeugung
- 29 Netzbetriebsmittel (1 bis 5)
- 35 Systemführung
- 37 Frequenz
- 40 Systemdienstleistungen
- 45 Netzengpassmanagement
- 49 Die Kupferplatte
- 51 Dezentralisierung

Markt

Märkte kennen wir von Lebensmitteln und Autos genauso wie von Hunderten anderen Produkten und Dienstleistungen. Auch Strom wird auf Märkten gehandelt, mit einem Großhandel, insbesondere der Strombörse, und einem Einzelhandel, der als Lieferant die Endkunden versorgt. Genau genommen kümmert sich der Lieferant nur um die kaufmännische und vertragliche Organisation der Strombeschaffung; die tatsächliche Lieferung erfolgt durch die Netzbetreiber. Und noch eine prägende Besonderheit hat der Strommarkt gegenüber fast allen anderen Märkten: Strom ist kaum speicherbar und muss im Wesentlichen zeitgleich mit seinem Verbrauch erzeugt werden. In jeder Sekunde muss eine ausgeglichene Bilanz sichergestellt sein. Wer bei wem Strom einkauft, zeigt der Layer „Markt“.

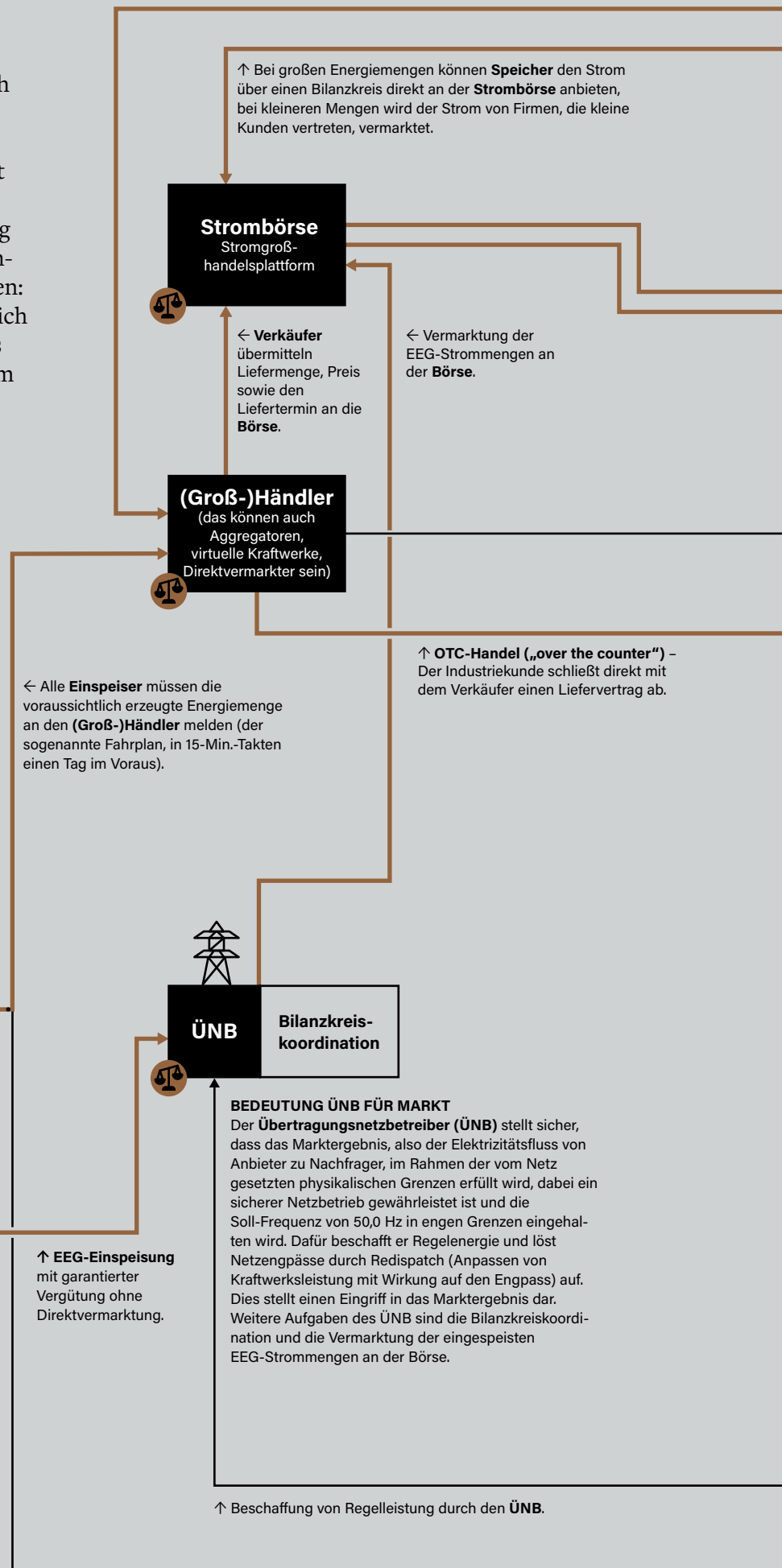
Erzeugung



Konventionelle Stromerzeuger (aus denen Deutschland zeitnah aussteigt) <ul style="list-style-type: none"> · Nuklear · Kohle 	Vermarktung Nicht-gefördert
<ul style="list-style-type: none"> · Gas · Öl (zur Aufrechterhaltung von Versorgungssicherheit) 	Gefördert (KWKG) Wird Strom und Wärme gleichzeitig erzeugt, wird dies mit einem besonderen Zuschlag belohnt.
Fluktuierende erneuerbare Stromerzeuger <ul style="list-style-type: none"> · Wind · Photovoltaik 	Gefördert (EEG) Strom aus erneuerbaren Energien wird finanziell besonders gefördert und genießt im Stromnetz einen Einspeisevorrang.
Steuerbare erneuerbare Stromerzeuger <ul style="list-style-type: none"> · Biomasse · Wasserkraftwerk (Laufwasser- und Speicherkraftwerk) 	

Alle Einspeiser ab 7 kW bekommen ein intelligentes Messsystem.

↓ Der **Speicher** meldet die eingespeiste Energiemenge an den (Groß-)Händler.



Erzeugung & Verbrauch

(Ein- und Ausspeisung)

Speicher

z. B. Batterien, Schwungmasse, Pumpspeicherwerk



Prosumer

Produzent und Konsument



Vermarktung

Individuelle Fördermechanismen.

Zoom-ins auf Seite:

- 35 Systemführung
- 37 Frequenz
- 40 Systemdienstleistungen
- 45 Netzengpassmanagement
- 49 Die Kupferplatte
- 51 Dezentralisierung
- 56 Der Bilanzkreis
- 59 Regelenergie
- 61 Merit Order

↑ **Lieferant** beschafft benötigte Strommengen für seine Endkunden über Bilanzkreise an der **Börse**.

← Wenn **Prosumenten** ihren eigenen Strombedarf nicht zu 100% abdecken können, wird die Differenzenergie über den **Lieferanten** angefordert.

← **Industriekunde** kauft direkt bei der **Strombörse** oder schließt direkt mit dem Verkäufer einen Liefervertrag ab (siehe OTC-Handel).

Lieferant

Vertrieb eines Energieversorgungsunternehmens



Der **Lieferant** versorgt den Kunden mit Strom, indem er die kaufmännische und vertragliche Abwicklung der Stromlieferung übernimmt, ohne selbst für die physische Erfüllung (Stromerzeugung oder Netzbetrieb) verantwortlich zu sein. Der Kunde schließt einen Stromliefervertrag mit einem Lieferanten seiner Wahl.



VNB

Ab Oktober 2021 übernimmt der **VNB** die Aufgaben im Redispatch 2.0, wie z. B. die Steuerung von Letztverbrauchern, die auf Hoch-, Mittel- und Niederspannung angeschlossen sind.

Regelleistung.net

Internetplattform zur Vergabe von Regelleistung.

Regelleistung ist die Versicherung für die Frequenzhaltung, die Regelleistungsmarktplattform Regelleistung.net wird durch die vier deutschen **ÜNB** betrieben.

Kraftwerke, Speicher und flexible Lasten können einen Teil ihrer elektrischen Leistung über Bilanzkreise als Reserve auf der Regelleistungsplattform anbieten. Die Beschaffung von **Regelleistung** durch den **ÜNB** ist die **Voraussetzung** dafür, dass die **ÜNB** einem **BKV** bei Bedarf Ausgleichsenergie zur Verfügung stellen können.

Der **Bilanzkreisverantwortliche (BKV)** trägt die Verantwortung für einen ausgeglichenen Bilanzkreis. Entsteht zum Erfüllungszeitpunkt ein Ungleichgewicht (Unter- oder Überdeckung), muss der BKV die wirtschaftlichen Folgen tragen, diese können negativ (Kosten) oder positiv (Erlöse) sein. Grundsätzlich sollen das Marktdesign und die finanziellen Anreize aber so gesetzt werden, dass alle BKV bestmöglich einen ausgeglichenen Bilanzkreis gewährleisten.

Verbrauch



Kunde Industrie

Beispielsweise Metall- oder Chemie-Industrie
Hoher Stromverbrauch



Kunde Gewerbe

Beispielsweise Schreiner:in, Hotels, Restaurants, Einzelhandel



Kunde Haushalt

Haus, Wohnung. Alles Weitere hinter dem Hausanschluss machen Elektriker:innen, Vermieter:innen, Eigentümer:innen



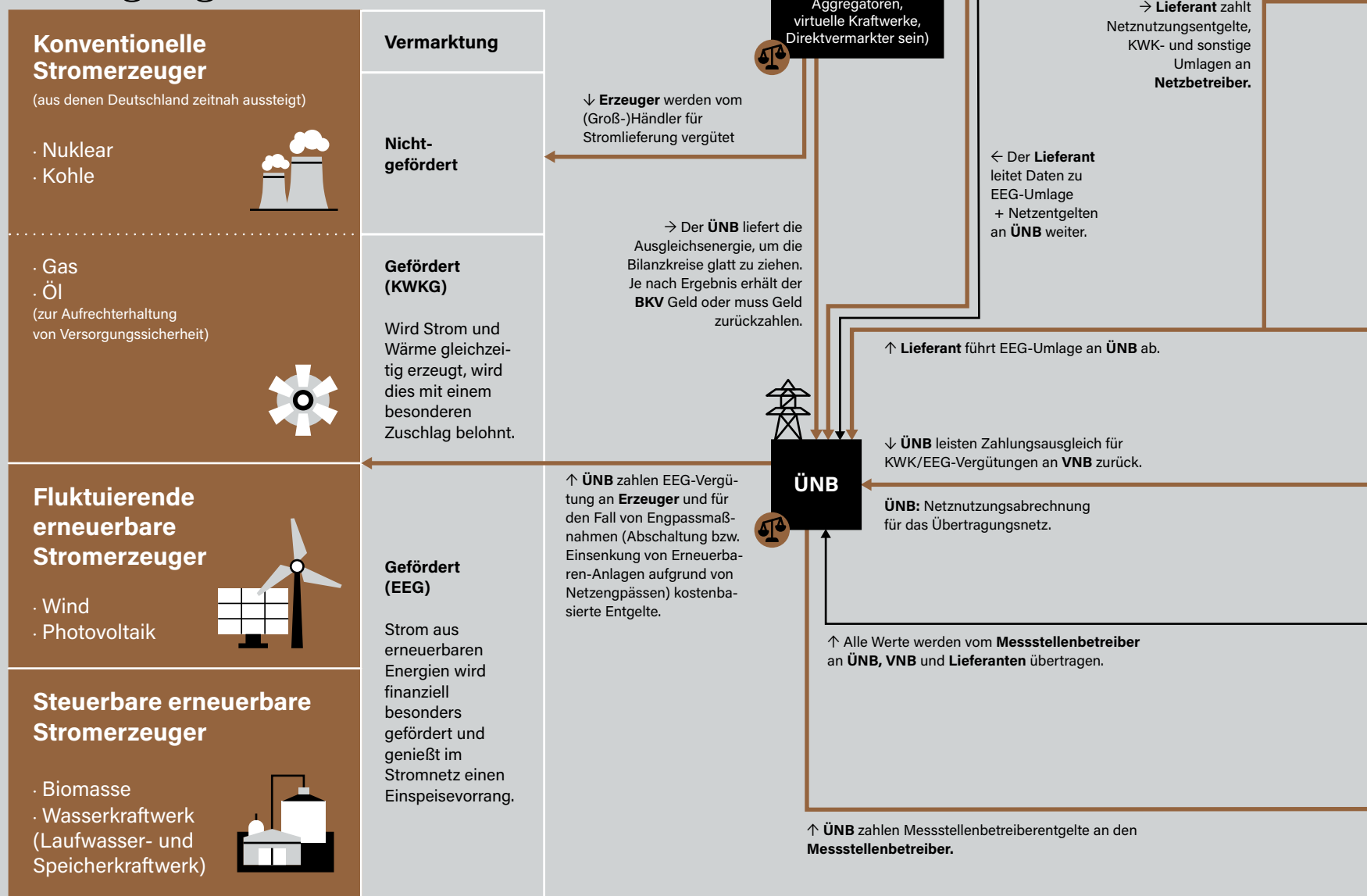
Sektorkopplung

Power-to-X, Schnittstelle aus dem Stromsektor zu Wärme, Kälte, Mobilität, Wasserstoff

Daten

Datenflüsse sind das Rückgrat der Elektrizitätsversorgung um Kraftwerkseinsätze und Kundenbedarf zu planen, Betriebszustände zu überwachen, Erzeugungsanlagen zu steuern, Verbrauchsmengen zu erfassen und Abrechnungen zu erstellen. Die ohnehin schon atemberaubende Vielfalt von energiewirtschaftlichen Daten wird mit digitalen Innovationen wie Smart Metering und Smart Home noch weiter zunehmen. Wir haben gar nicht erst den Versuch unternommen, alle Datenflüsse auf einem Blatt aufzuzeichnen. Im Layer „Daten“ richten wir den Blick allein auf diejenigen abrechnungsrelevanten Daten, die erforderlich sind, damit eine Stromkundin oder ein Stromkunde eine korrekte Rechnung erhalten und schließlich den bezogenen Strom bezahlen kann. Und selbst dies ist natürlich nur eine vereinfachte Sicht auf die Datenflüsse in der Elektrizitätswirtschaft.

Erzeugung



Alle Einspeiser ab 7 kW bekommen ein intelligentes Messsystem.

↑ Der erzeugte Strom wird in der Regel alle 15 Min. gemessen und die Mengen an den **Messstellenbetreiber** übermittelt.

Erzeugung & Verbrauch

(Ein- und Ausspeisung)

Speicher

z. B. Batterien, Schwungmasse, Pumpspeicherwerk

Prosumer

Produzent und Konsument

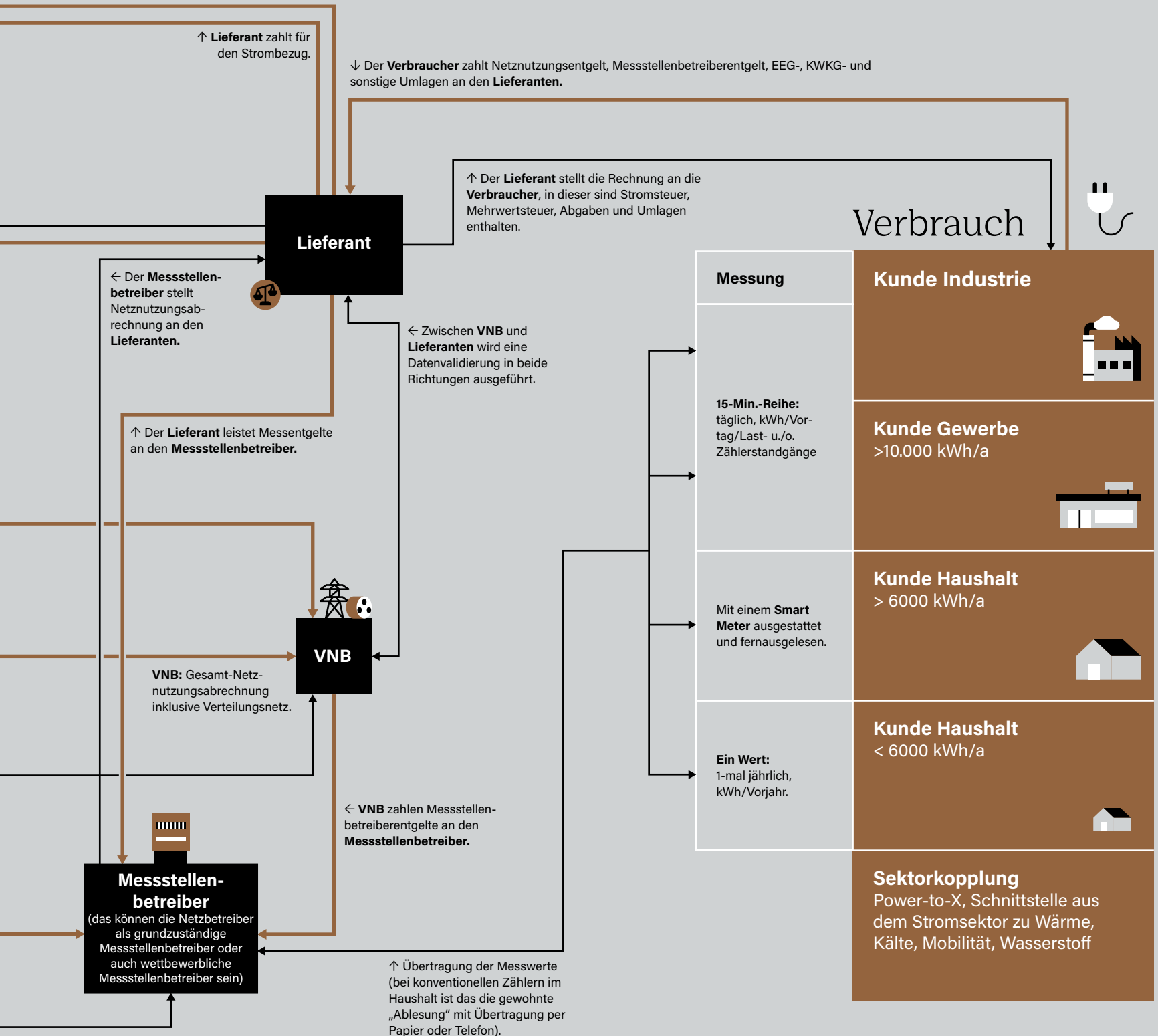
Vermarktung

Individuelle Fördermechanismen.

Zoom-ins auf Seite:

65 Smart Meter

68 Stromrechnung



Der **Bilanzkreisverantwortliche (BKV)** trägt die Verantwortung für einen ausgeglichenen Bilanzkreis. Entsteht zum Erfüllungszeitpunkt ein Ungleichgewicht (Unter- oder Überdeckung), muss der BKV die wirtschaftlichen Folgen tragen, diese können negativ (Kosten) oder positiv (Erlöse) sein. Grundsätzlich sollen das Marktdesign und die finanziellen Anreize aber so gesetzt werden, dass alle BKV bestmöglich einen ausgeglichenen Bilanzkreis gewährleisten.

Spielregeln

Die Energiewirtschaft ist eine hochgradig regulierte Branche. Sie unterliegt zahlreichen gesetzlichen Vorgaben und intensiver staatlicher Kontrolle. Das hat einerseits damit zu tun, dass sie Teil der sogenannten „Daseinsvorsorge“, oder moderner ausgedrückt, der „kritischen Infrastruktur“ ist. Hinzu kommt, dass es sich bei den Stromnetzen um „natürliche Monopole“ handelt, die allen Marktteilnehmern diskriminierungsfrei zur Verfügung stehen müssen und zugleich keine unangemessenen Monopolrenditen erwirtschaften dürfen. Im Layer „Spielregeln“ geben wir einen Überblick der Vertragsverhältnisse, mit denen sich die Strommarkt-Akteure untereinander organisieren, und der Gesetze und Verordnungen, denen sie unterliegen.

Erzeugung

Konventionelle Stromerzeuger

(aus denen Deutschland zeitnah aussteigt)²

- Nuklear
- Kohle

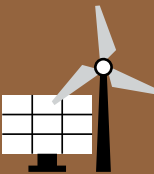


- Gas
 - Öl
- (zur Aufrechterhaltung von Versorgungssicherheit)



Fluktuierende erneuerbare Stromerzeuger

- Wind
- Photovoltaik



Steuerbare erneuerbare Stromerzeuger

- Biomasse
- Wasserkraftwerk (Laufwasser- und Speicherkraftwerk)



Vermarktung

Nicht-gefordert

Gefördert (KWKG)

Wird Strom und Wärme gleichzeitig erzeugt, wird dies mit einem besonderen Zuschlag belohnt.

Gefördert (EEG)

Strom aus erneuerbaren Energien wird finanziell besonders gefördert und genießt im Stromnetz einen Einspeisevorrang.

Bundesnetz-agentur

Aufsichtsbehörde,
Hüterin der
Spielregeln

Strombörse
Stromgroß-
handelsplattform

↓ Angebot zur
Stromlieferung

↑ Angebot zur
Stromlieferung

← Angebot zur
Stromlieferung

(Groß-)Händler
(das können auch
Aggregatoren,
virtuelle Kraftwerke,
Direktvermarkter sein)

↑ Stromlieferungsvertrag

↑ Stromlieferungsvertrag

↓ Stromlieferungsvertrag

← Präqualifizierung,
Anschlussrahmenvertrag
und Zugang zur Internet-
plattform Regelleistung.net



ÜNB

Transport¹

Netzengpass-
management

Regel-
energie

Bilanzkreis-
koordination

Systemstabilität

↓ Netzananschluss- und
Netznutzungsvertrag

↓ Netzananschluss- und Netznutzungsvertrag

↓ Messstellenbetriebsvertrag

Alle Einspeiser ab 7 kW bekommen ein intelligentes Messsystem.

¹ Große Industriekunden können direkt an ÜNB angeschlossen sein, mit deren Lieferanten werden gesonderte Lieferanten-Rahmenverträge vereinbart.

² Siehe auch Kohleausstiegs- und Strukturstärkungsgesetz. 2038 (spätestens).

- Reguliertes Stromnetz
- Wettbewerblicher (liberalisierter) Strommarkt
- ... Aufsicht und Regulierung

Gesetze & Verordnungen

Europa

Viele rechtliche Vorgaben basieren auf Europarecht, wie bspw. der EU-Elektrizitätsbinnenmarktlinie.

EnWG

Das Energiewirtschaftsgesetz enthält die Grundregeln für die Elektrizitäts- und Gasversorgung.

EEG

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz regelt die bevorzugte Netzeinspeisung und Förderung von erneuerbarem Strom.