

Energie

von Ulrich Platt, Werner Aeschbach und Wolfgang Kahl

Dieser Text ist die herausgeberisch und redaktionell bearbeitete, aber noch nicht abschließend lektorierte und ungesetzte **Vorabveröffentlichung** eines Kapitels, das im Band

**Umwelt interdisziplinär
Grundlagen – Konzepte – Handlungsfelder**

**herausgegeben von Thomas Meier, Frank Keppler, Ute Mager,
Ulrich Platt und Friederike Reents**

bei Heidelberg University Publishing (heiUP; <https://heiup.uni-heidelberg.de/>) Open Access und in gedruckter Form erscheinen wird.

Text © die Autoren 2022



Dieser Text ist unter der Creative-Commons-Lizenz CC BY-SA 4.0 veröffentlicht.

DOI: [https://doi.org/ 10.11588/heidok.00031287](https://doi.org/10.11588/heidok.00031287)

Energie

Ulrich Platt^{1, 2}, Werner Aeschbach^{1, 2} und Wolfgang Kahl^{3, 2}

¹ Institut für Umweltphysik, Universität Heidelberg

² Heidelberg Center for the Environment (HCE), Universität Heidelberg

³ Institut für deutsches und europäisches Verwaltungsrecht – Forschungsstelle für Nachhaltigkeitsrecht, Universität Heidelberg

Zusammenfassung: Energie ist eine Erhaltungsgröße und kann weder erzeugt noch zerstört werden, allerdings kann Energie mehr- oder weniger „wertvolle“ Formen annehmen, etwa elektrische Energie (wertvoll) oder Wärmeenergie (weniger wertvoll). Die Verfügbarkeit von Energie prägt unser modernes Leben, ihre Bereitstellung durch Verbrennung fossiler Brennstoffe erzeugt jedoch enorme Umweltprobleme, insbesondere durch das bei Verbrennung freiwerdende Kohlendioxid, das ein starkes Klimagas ist. Diskutiert werden gegenwärtige Energieträger und die in naher Zukunft erforderliche Umstellung auf Kohlendioxid-freie Energiebereitstellung, die „Energiewende“. Im Beitrag wird auch der rechtliche Rahmen der Energiewende auf internationaler, europäischer und nationaler Ebene diskutiert.

Schlüsselbegriffe: Energieversorgung, Klima, Energiepolitik, Energierecht

Naturwissenschaftlicher Hintergrund

Der Energiebegriff in der Physik

Der Begriff Energie hat in der Umgangssprache etwa die Bedeutung von Kraft oder Ausdauer, in der Physik ist Energie genauer definiert als das Vermögen, Arbeit zu leisten (siehe z. B. Meschede 2015 oder jedes andere Lehrbuch der Physik). Energie ermöglicht somit Prozesse, beispielsweise ein Objekt auf der Erde hochzuheben (potentielle Energie), eine Lampe eine bestimmte Zeit mit bestimmter Helligkeit leuchten zu lassen (Strahlungsenergie), ein Auto von 0 auf 100 km/h zu beschleunigen (kinetische Energie) oder die Temperatur eines Gegenstandes um einen bestimmten Betrag zu erhöhen (thermische Energie). Damit ist die Energie (wie etwa Impuls, Temperatur oder Kraft) ein zentraler Begriff in der Physik (siehe z. B. Meschede 2015).

Die Energie, die pro Zeiteinheit aufgebracht wird, heißt Leistung. Um also zum Beispiel ein Auto in fünf Sekunden auf 100 km/h zu beschleunigen, wird mehr Leistung benötigt als um das Gleiche (mit dem gleichen Energieaufwand) in zehn Sekunden zu bewerkstelligen. Die Einheit der Energie (im heute international gebräuchlichen SI Einheitensystem) ist das Joule (kurz J, benannt nach James Prescott Joule, britischer Physiker, 1818–1889), während die Leistung in Watt (kurz W, benannt nach James Watt, dem schottischen Erfinder der Dampfmaschine, 1736–1819) angegeben wird; ein Watt entspricht gerade einem Joule pro Sekunde. Im täglichen Leben begegnen uns die Einheiten Kilojoule (kJ) etwa für die chemische Energie von Nahrungsmitteln, die Kilowattstunde (die Energie, die einer Leistung von einem Kilowatt für 3.600 Sekunden entspricht, also 3.600.000 Joule oder 3,6 MJ) oder die „Pferdestärke“ (PS, 1 PS entspricht einer Leistung von etwa 735,5 W).

Energie als Erhaltungsgröße

Obwohl Energie scheinbar „verbraucht“ wird – zum Beispiel misst der Elektrizitätszähler den „Verbrauch“ elektrischer Energie – ist Energie eine Erhaltungsgröße (siehe Planck 1887). Sie kann in einem abgeschlossenen System weder erzeugt noch zerstört werden. In der Tat wird Energie in unserer Umwelt nur umgewandelt. Die Energie, die der Elektrizitätszähler zählt, wird ja nicht vernichtet, sondern in andere Energieformen umgewandelt (mechanische Arbeit, Licht, vor allem aber in Wärme).

Aus dem Prinzip der Energieerhaltung (auch als „Erster Hauptsatz der mik“ bekannt) folgt notwendig die Unmöglichkeit des „Perpetuum Mobile“, also einer hypothetischen Maschine, die Energie aus Nichts erzeugt. Im direkten Zusammenhang mit dem Energiebegriff stehen weitere wichtige Größen in der Physik wie Wärme und Entropie sowie Information.

Wenngleich der Erste Hauptsatz keine Aussage über die Richtung der Energieflüsse macht, so wissen wir doch, dass sich nicht spontan ein Tisch von selbst abkühlt, um den darauf stehenden Kaffee zu erwärmen. Also ist nicht nur eine von selbst arbeitende Maschine unmöglich, sondern die Wärme fließt auch nur von selbst in eine Richtung von warm nach kalt (was wir als den Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik kennen). Am meisten ist aber überraschend, dass in thermodynamischen Systemen das Verhältnis einer nutzbaren Wärmemenge zur Temperatur des Wärmespeichers erhalten ist oder immer zunimmt, so wie die Zeit in mechanischen Bewegungen die Richtung vorgibt. Diese Größe nennen wir ein Maß der Unordnung oder Entropie. Selbst wenn wir durch das Nutzen von Informationen Ordnung schaffen (etwa Legobausteine zusammensetzen), müssen wir so viel Energie aufbringen, um die Informationen zu sammeln und die Steine zu setzen, dass insgesamt die Entropie zunimmt. Dieser seltsame Zusammenhang bedeutet, dass es keine Maschine geben kann, die Wärme vollständig in Arbeit umwandelt.

Letzterer Zusammenhang wird durch das Gedankenexperiment des „Maxwell’schen Dämons“ illustriert. Bekanntlich ist Wärmeenergie (z. B. eines Gases) im Prinzip eine spezielle Form der kinetischen Energie (zu der ggf. noch die Rotationsenergie von Molekülen dazukommt und bei kondensierter Materie auch Spannungsenergie). Das Besondere ist dabei, dass die einzelnen Gasteilchen völlig ungeordnet und auch mit verschiedenen Geschwindigkeiten durcheinander wimmeln. In jedem Falle aber ist der Mittelwert der kinetischen Energie der Gasteilchen proportional zur Temperatur. Nun könnte man auf die Idee kommen eine Vorrichtung zu bauen, die die Gasteilchen nach ihrer Geschwindigkeit sortiert.

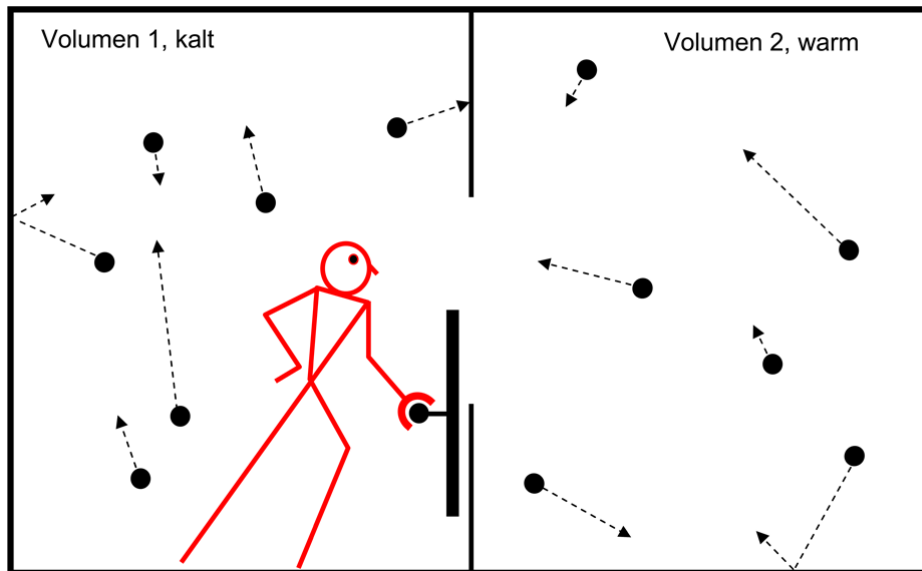


Abb. 1: Zwei Gasvolumina sind durch eine Klappe (Schieber) getrennt. Der „Dämon“ öffnet die Klappe zwischen den zwei Volumina immer dann, wenn ein schnelles Molekül von links nach rechts fliegt oder ein langsames von rechts nach links. Nach einer Weile sollten überwiegend schnelle Moleküle im rechten Teilvolumen, langsame im linken Teilvolumen versammelt sein →links kalt, rechts warm

Abb. 1 zeigt eine der Ideen, ein von Maxwell vorgeschlagenes Szenario: Zwei Gasreservoirs sind durch eine Tür getrennt, an der ein „Dämon“ wacht (es kann auch eine automatische Vorrichtung sein) und die Tür immer dann öffnet, wenn ein schnelles Gasteilchen (also eines mit hoher Energie) von links nach rechts fliegt, ansonsten bleibt die Tür geschlossen. Umgekehrt öffnet der Dämon die Tür, wenn ein langsames Teilchen von rechts nach links fliegt. Nach einiger Zeit sollten dann alle schnellen Teilchen im rechten und alle langsamen Teilchen im linken Reservoir sein. Mit anderen Worten, das Gas im linken Volumen ist kalt, das im rechten heiß. Aus dieser Temperaturdifferenz ließe sich Energie jeder Form gewinnen, und zwar aus „Nichts“. Diese (und ähnliche) postulierte Vorrichtungen wurden heiß diskutiert und erst vor einigen Jahrzehnten wurde die Lösung für diesen scheinbaren Widerspruch zur Unmöglichkeit eines Perpetuum Mobile gefunden. Die Erklärung liegt in der Tatsache, dass der „Dämon“ (oder die Vorrichtung) Information über Ort und Geschwindigkeit der Gasteilchen benötigt, die Übertragung von Information benötigt aber auch Energie und zwar – wie sich herausstellt – gerade so viel (in der Praxis natürlich etwas mehr) wie in der beschriebenen Vorrichtung gewonnen werden kann (siehe z. B. Baeyer 1998).

Eine weitere Konsequenz dieser Zusammenhänge ist, dass der absolute Nullpunkt der Temperatur ($-273,15^{\circ}\text{C}$, vollständige Ruhe eines thermodynamischen Systems) nicht erreicht werden kann (Dritter Hauptsatz der Thermodynamik).

Energieumwandlung

Die Umwandlung von mechanischer Energie in Wärme wurde von Benjamin Thompson (später Graf Rumford) im Jahre 1798 demonstriert (siehe Abb. 2). Pferde „erzeugen“ mechanische Energie, ein stumpfer Kanonenbohrer (rechts) wandelt sie in Wärme um. Ergebnis: Unbe-

grenzte Menge von Wärme kann aus mechanischer Arbeit produziert werden, Wärme kann folglich nichts Materielles sein.

Ein weiteres Beispiel für Energieumwandlung ist die chemische Energie in Kohle oder Gas, die – etwa beim Elektrizitäts„erzeuger“ – durch Verbrennung in Wärme umgewandelt wird und diese dann in mechanische Energie (der Turbine) und schließlich in elektrische Energie. Beim „Verbraucher“ kann die elektrische Energie dann in zahlreiche Energieformen (Licht, Bewegung, chemische Energie, Wärme) umgewandelt werden, sie endet zuletzt in der Regel überwiegend in Wärmeenergie.

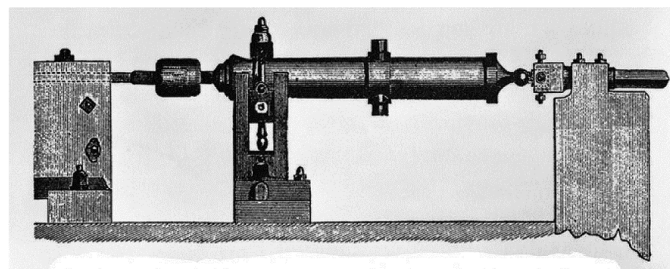
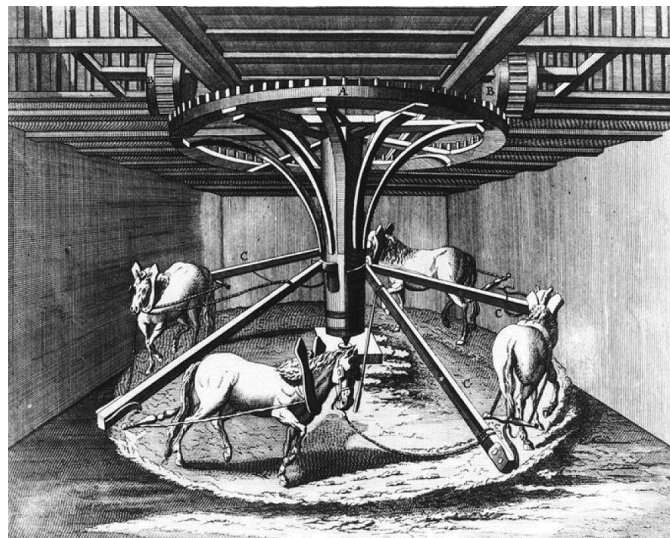


Abb. 2: Modell des Rumfordschen Experiments zum Kanonenbohren (durchgeführt 1798 von Benjamin Thompson später Graf Rumford, 1753–1814) das die Umwandlung von mechanischer Energie in Wärme demonstriert. Pferde (oben) „erzeugen“ mechanische Energie, ein stumpfer Kanonenbohrer (unten) wandelt sie in Wärme um. Ergebnis: Unbegrenzte Menge von Wärme kann aus mechanischer Arbeit produziert werden, Wärme kann nichts Materielles sein

Man könnte nun denken, dass dann die Wärmeenergie beliebig weiter genutzt werden kann, dies ist aber nur in geringem Maße möglich. Der Grund ist, dass – obwohl jede der Energieformen gleich viele Joule enthält – sich Wärmeenergie nur zum Teil wieder in andere Energieformen zurückverwandeln lässt. Die allgemeine Formulierung dieser zunächst – ebenso wie die Energieerhaltung – überraschenden Erkenntnis geht vermutlich auf Julius Robert von Mayer (deutscher Arzt und Naturforscher, 1814–1878) zurück. Der Zusammenhang wurde allerdings bereits von Nicolas Carnot (Nicolas Léonard Sadi Carnot, 1796–1832, siehe auch Carnot 1892) quantitativ beschrieben (siehe auch Planck 1887). Vereinfacht ausgedrückt gibt es (je nach Temperatur des Reservoirs, siehe oben) „gut“ und „schlecht“ nutzbare Formen von Energie, besonders schlecht in diesem Sinne ist Wärmeenergie von niedriger Temperatur (im

Vergleich zur Temperatur unserer Umgebung). Gut sind zum Beispiel mechanische und elektrische Energie, ziemlich gut ist Licht. Die Erklärung hängt damit zusammen, dass beispielsweise mechanische Energie (etwa eines fahrenden Autos) eine geordnete Bewegung aller Atome des Objekts darstellt, daher ist die Entropie sehr niedrig. Im Falle der Elektrizität kann man umgekehrt argumentieren: Aus elektrischer Energie kann man sofort sehr hohe Temperaturen herstellen; wir tun das täglich, wenn wir eine Glühbirne einschalten, deren Glühfaden fast 3.000°C heiß ist.

In der Tat ist die Kernaussage der Carnot'schen Betrachtung, dass Wärmeenergie nur dann in mechanische beziehungsweise elektrische Energie umgewandelt werden kann, wenn wenigstens zwei Wärmereservoirs mit verschiedener Temperatur zur Verfügung stehen. Selbst dann ist keine vollständige Umwandlung möglich, aber die Umwandlung gelingt umso vollständiger, je größer die Temperaturdifferenz (bezogen auf die höhere Temperatur) ist.

Die Notwendigkeit einer Temperaturdifferenz verbietet (leider) auch ein „Perpetuum Mobile Zweiter Art“, also eine Maschine, die fortlaufend die Umgebung abkühlt (ihr also Wärmeenergie entzieht) und diese Energie in mechanische Arbeit umwandelt.

In den Verbrennungskraftmaschinen, die wir alle kennen wie zum Beispiel der Automobilmotor, wird die höhere Temperatur durch Verbrennung von Benzin oder Dieselöl hergestellt, die niedrige Temperatur ist die der Umwelt. Der nicht umwandelbare Teil (beim Automobil sind das typischerweise 75 %) der bei der Verbrennung freiwerdenden Wärmeenergie wird über den Kühler beziehungsweise das heiße Auspuffgas an die Umwelt abgegeben. Diese Umwandlungsverluste sind von großer Bedeutung für das Verständnis von Energieversorgungssystemen auf nationaler oder globaler Ebene, die weiter unten diskutiert werden.

Eine praktisch sehr nützliche Umkehrung der Carnot'schen Erkenntnisse ist die Wärmepumpe. In einer derartigen Maschine wird „hochwertige“ mechanische (oder elektrische) Energie genutzt, um eine Temperaturdifferenz zwischen zwei Reservoirs herzustellen. In Umkehrung des Prinzips, dass aus einer geringen Temperaturdifferenz (bezogen auf die umgesetzte Wärmemenge) nur wenig mechanische Energie gewonnen werden kann, genügt auch relativ wenig mechanische (oder elektrische) Energie, um aus einem Reservoir eine vergleichsweise große Wärmemenge auf eine etwas höhere Temperatur anzuheben. Beispiele aus dem täglichen Leben sind Kühlschrank, Klimaanlage und Wärmepumpen-Heizung. Hier beträgt das Verhältnis zwischen gepumpter Wärmeenergie und zugeführter mechanischer (bzw. elektrischer) Energie etwa drei bis fünf.

Die Bedeutung der Energie

Wie oben schon beschrieben, ist Energie ein fundamentaler physikalischer Begriff, der in sämtlichen Teilgebieten der Physik, in der Technik, der Chemie, ebenso wie in der Biologie und auch der Wirtschaft eine zentrale Rolle spielt. Jedes Lebewesen ist auf die Zufuhr von Energie (bei Pflanzen in der Regel durch Sonnenenergie, bei Tieren durch die Nahrung) angewiesen.

Für die menschliche Gesellschaft spielt Energie eine zentrale Rolle: Die Entdeckung des Feuers als Energiequelle ist vermutlich mit der Entstehung des modernen Menschen eng ver-

knüpft (siehe z. B. Harari 2014). Allerdings kann Feuer zunächst nur Wärmeenergie liefern, Vorrichtungen zur systematischen Umwandlung von Wärmeenergie in andere Energieformen (vor allem mechanische Energie) wurden erst in der Neuzeit mit der Erfindung der Dampfmaschine entwickelt (siehe unten). Über Jahrtausende waren daher die Quellen für mechanische Energie überwiegend die Muskelkraft von Menschen und Nutztieren und nur im geringen Umfang Wasser- und Windenergie (Wasser- bzw. Windmühlen, Segelschiffe).

Mit dem Beginn der industriellen Revolution wurden die bis dahin vorherrschenden Energiequellen durch die Dampfmaschine und weitere thermodynamische Maschinen weitgehend ersetzt (siehe Abschnitt „Energieumwandlung“). Zwar wurden auch Wasserkraftwerke leistungsfähiger, aber der Löwenanteil der Energie kam aus der Verbrennung (überwiegend fossiler) Materialien. Damit wurde der Menschheit eine um mehrere Größenordnungen leistungsfähigere Energiequelle verfügbar gemacht (siehe auch Löschel et al. 2020).

Die Energiebilanz unserer Erde

Die Erde ist ein gutes Beispiel für die Wirkung der physikalischen Gesetze zur Energieerhaltung. Die Erde bekommt praktisch alle Energie in Form von kurzwelliger Strahlung (hauptsächlich im sichtbaren, dem nahen ultravioletten und dem nahen infraroten Spektralbereich) von der Sonne und strahlt diese empfangene Sonnenenergie in das Weltall ab (siehe Abb. 3 und 4). Im Gleichgewicht wird die Erdtemperatur gerade so hoch, dass die aufgenommene Energie von der Erde beziehungsweise von ihrer Atmosphäre wieder abgestrahlt werden kann. Im Vergleich zur Gesamt-Sonneneinstrahlung kommen nur ca. 0,02 % als Erdwärme aus dem Erdinneren und noch etwa eine Größenordnung geringere Anteile stammen aus Gezeitenenergie und technischer Energieumwandlung (fossile Brennstoffe und Kernenergie).

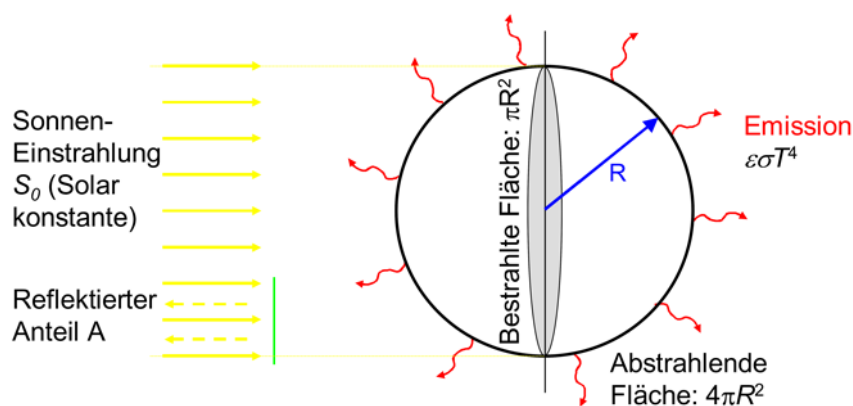


Abb. 3: Die Energiebilanz der Erde: Von der Sonne eingestrahlte Leistung (gelbe Pfeile links) abzüglich des reflektierten Anteils erwärmen die Erde, bis die mit der Temperatur proportional zu T^4 zunehmende Abstrahlung (rote, gewellte Pfeile) gerade der eingestrahnten Leistung entspricht. R =Erdradius. Während die Einstrahlung nur die Querschnittsfläche der Erde betrifft (πR^2) strahlt die gesamte Erdoberfläche ($4\pi R^2$) ab

Innerhalb des Erdsystems verteilt sich die eingestrahlte Sonnenenergie dann auf die Subsysteme der Erde (Atmosphäre, Ozean, Landoberfläche usw.), wie in Abb. 4 skizziert.

In der Tat ist das Potential der Solarenergie gewaltig: Mit über 100.000 TW (global, siehe Abb. 4) liegt es etwa vier Größenordnungen über dem derzeitigen Energiebedarf der Menschheit.

Die Windenergie nutzt die Atmosphäre als thermodynamische Maschine, die – aufgrund der relativ geringen Temperaturdifferenzen auf der Erde – nur etwa ein Prozent der Solarenergie in kinetische Energie (also Wind) umsetzt (siehe Abb. 4 und Abschnitt 3). Selbst dieser kleine Bruchteil würde ausreichen, um den Energiebedarf der Menschheit zu decken (Kleidon 2012; Jacobson und Archer 2012). Ebenso treibt die Sonnenenergie den Wasserkreislauf der Erde (überwiegend durch Verdunstung) an, dabei wird ein kleiner Teil der Sonnenenergie in potenzielle Energie von Wasser umgewandelt, von dem wiederum ein Bruchteil in Wasserkraftwerken in elektrische Energie umgewandelt wird.

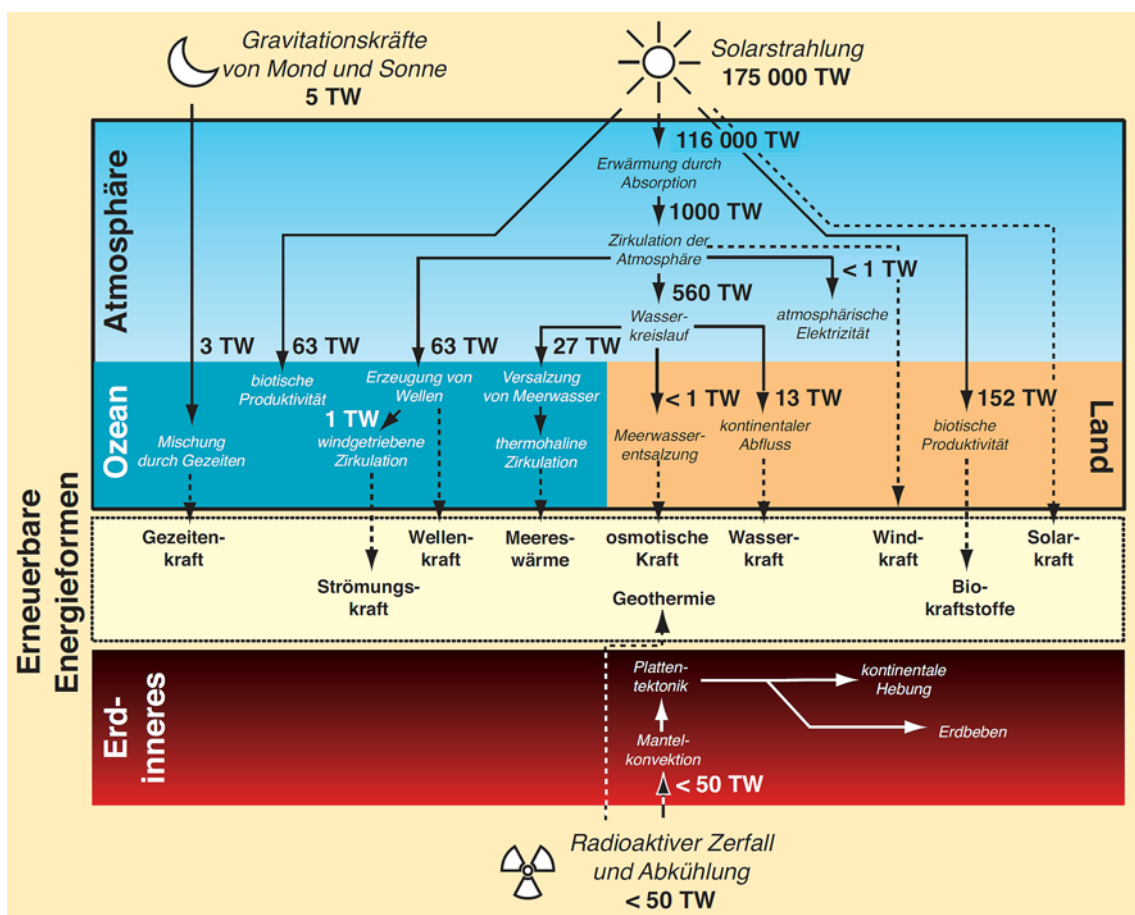


Abb. 4: Abschätzung der planetaren Erzeugungs- und Übertragungsraten von freier Energie und deren Bezug zu verschiedenen Formen erneuerbarer Energie. Angaben sind in Einheiten von Terawatt (1 TW = 10^{12} W). Zum Vergleich: Der Primärenergieverbrauch der Menschheit entsprach 2018 einer Leistung von etwa 18 TW, und die Nutzung von biotischer Produktivität überwiegend in Form von Landwirtschaft liegt zwischen 8 und 42 TW

Energieversorgung

Die heutige globale Energieversorgung

Bei der technischen Energienutzung ist zwischen verschiedenen Energieformen zu unterscheiden, die ausgehend von primären Energiequellen durch Umwandlungsprozesse (siehe Abschnitt 3) erzeugt werden. Die Energieform, die ursprünglich zur Verfügung steht (etwa die chemische Energie von Kohle) und ggf. in andere Energieformen umgewandelt werden kann, wird „Primärenergie“ genannt. Der Primärenergieverbrauch der Welt steigt kontinuierlich. Der Grafik in Abb. 5 ist zu entnehmen, dass die dominierenden Energieträger nach wie vor Öl, Gas und Kohle sind. Allerdings steigt der Anteil erneuerbarer Energie in letzter Zeit deutlich an.

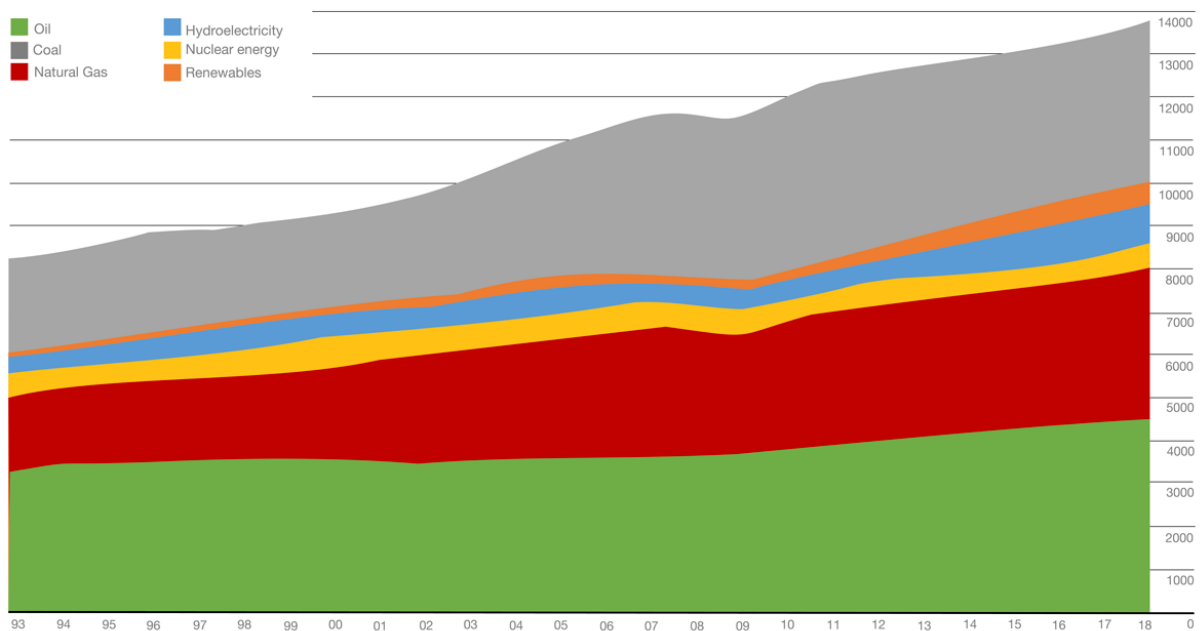


Abb. 5: Welt-Primärenergieverbrauch, Angaben in Millionen Tonnen Öl-Äquivalent (1 t Öl-Äquivalent entspricht 41,868 GJ). Der Verbrauch wuchs von 2017 bis 2018 um 2,9 %, dies war der stärkste Anstieg seit 2010

Aus den oben diskutierten physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Energieumwandlung und der Dominanz der fossilen Brennstoffe als Energieträger ergeben sich erhebliche Anteile von Umwandlungsverlusten wenn „Primärenergie“ in „Endenergie“ umgewandelt wird. Endenergie ist dabei die Energieform, die in den einzelnen Verbrauchssektoren unmittelbar zur Erzeugung von Nutzenergie oder für Energiedienstleistungen eingesetzt wird (siehe Abschnitt 3 und Kasten „Primärenergie – Endenergie – Nutzenergie“). Die Endenergie steht dem Verbraucher zur Verfügung, ist aber meist noch nicht die Energieform, die von ihm wirklich benötigt wird (etwa mechanische Energie oder Licht). Letztere wird als Nutzenergie bezeichnet.

Primärenergie – Endenergie – Nutzenergie

Primärenergie bezeichnet die Energie, die in den ursprünglich vorkommenden Energieformen („Energiequellen“) gespeichert ist, zum Beispiel als chemische Energie eines Brennstoffs wie Kohle, Öl, Biomasse oder Erdgas, oder durch Umwandlung aus anderen Energieträgern wie Sonne, Wind oder Kernbrennstoffe frei werden kann. Primärenergie kann durch einen mit Verlusten behafteten Umwandlungsprozess in *Sekundärenergie* umgewandelt werden, also etwa in Elektrizität oder Treibstoff (z. B. Benzin). Primär- oder Sekundärenergie wird nach „Übertragung“, die ggf. mit Übertragungsverlusten behaftet ist, zu vom Verbraucher nutzbarer *Endenergie*. Die tatsächlich genutzte Energie, also die Endenergie abzüglich der Verluste, die bei der Umwandlung (z. B. von Strom in Licht oder Treibstoff in Bewegung) durch den Verbraucher entstehen, ist dann die *Nutzenergie*.

Bei der Umwandlung von Endenergie in Nutzenergie treten weitere, teilweise (z. B. bei Verbrennungsmotoren) erhebliche, Verluste auf. In manchen Sektoren (Verkehr, Heizung) würde eine konsequent auf erneuerbaren Quellen basierende Elektrifizierung dank besseren Wirkungsgraden den Primärenergiebedarf für gegebenen Nutzenergieverbrauch erheblich reduzieren.

Eine weitere Methode, Energieverluste zu vermindern, ist die Sektorkopplung, zum Beispiel kann die bei der Elektrizitätserzeugung aus Brennstoffen entstehende Verlustwärme (siehe Abschnitt 3) zur Gebäudeheizung (Stichwort Fernwärme) verwendet werden.

Klimafolgen der Energienutzung und zukünftige Energiequellen

Das heute dominierende Energieversorgungssystem der Menschheit, das auf der Verbrennung kohlenstoffhaltiger, fossiler Brennstoffe (also Kohle, Erdöl, Erdgas) beruht, bewirkt die Emission von Treibhausgasen, die das Klima unserer Erde verändern und die Erdtemperatur erhöhen (→Klimawandel). Unter den durch die Energiewirtschaft bedingten Treibhausgasen ist in erster Linie Kohlendioxid (CO₂, Verbrennungsprodukt von Kohlenstoff) zu nennen, aber auch Methan (CH₄), das beim Kohlebergbau (als „Grubengas“) sowie bei der Gewinnung und Verteilung von Erdgas (das im Wesentlichen aus CH₄ besteht) freigesetzt wird.

Derzeit (Stand 2019) beträgt die jährliche Emission der Menschheit ca. 10 Gt (also Milliarden Tonnen) Kohlenstoff (entsprechend ca. 37 Gt CO₂) pro Jahr (siehe z. B. Friedlingstein et al. 2019). Seit Beginn der Industrialisierung hat sich dadurch der CO₂-Gehalt der Atmosphäre um fast 50 % erhöht (von ca. 280 ppm vorindustriell auf 410 ppm im Jahr 2019). Die CH₄-Konzentration hat sich sogar weit mehr als verdoppelt (von ca. 0.7 auf ca. 1.8 ppm) (siehe z. B. NOAA 2020).

Allerdings sind diese Treibhausgasemissionen und die damit einhergehenden Veränderungen der Erdatmosphäre und des Klimas nicht zwangsläufig mit der Energiewandlung verknüpft. Einerseits kann das bei der Verbrennung freigesetzte CO₂ abgetrennt und dann (etwa durch Einpressen in geeignete geologische Formationen) „endgelagert“ werden. Das CO₂ entsteht dann zwar, gelangt aber nicht (oder überwiegend nicht) in die Atmosphäre. Andererseits

wurden Formen der (weitgehend) treibhausgasfreien Energieumwandlung entwickelt, etwa die Kernenergie und die „Erneuerbaren Energien“ wie Windenergie oder Solarenergie.

In Zukunft könnten weitere innovative Formen der Energieumwandlung hinzukommen: Seit Jahrzehnten diskutiert wird die Kernfusion (siehe z. B. EUROfusion 2020), bei der die Umwandlung der Atomkerne leichter Elemente in schwerere Elemente (auf die Stoffmenge bezogen) gewaltige Energiebeträge freisetzt. In der Sonne wird Wasserstoff in Helium umgewandelt, während die gegenwärtige Fusionsforschung sich auf die Verschmelzung von schwerem Wasserstoff (dem Wasserstoff-Isotop Deuterium) mit überschwerem Wasserstoff (dem Wasserstoff-Isotop Tritium) konzentriert. Tritium wiederum soll nach jetzigen Plänen aus Lithium hergestellt werden.

Zu weiteren Energiequellen zählt die Geothermie (Erdwärme), also die Nutzung von im Gestein gespeicherter Energie (siehe z. B. BMWi 2021). Vielversprechend sind auch Anlagen, die das osmotische Druckgefälle zwischen Süßwasser und Meerwasser ausnutzen, immerhin entspricht dieses einem Höhenunterschied von fast 300 m (Dinger et al. 2013; Helfer et al. 2014). Weitere unkonventionelle Formen der Energiekonversion beruhen auf der Nutzung der thermischen Ausstrahlung der Erde (siehe Abb. 3), aufgrund der hohen Temperaturdifferenz zwischen Erde (ca. 285 K) und dem Weltraum (ca. 2,7 K) könnten derartige IR-Photozellen Tag und Nacht Energie liefern (Deppe and Munday 2019).

Mittlerweile scheint sich die Ära des Feuers als Energiequelle ihrem Ende zuzuneigen. Während Kernenergie (mit heute etwa vier Prozent Anteil am Primärenergieaufkommen der Welt, siehe Abb. 6) eine geringe Rolle spielt, werden Windenergie- und Solarenergienutzung immer wichtiger. Moderne Nutzung der Windenergie beruht auf den bereits jahrhundertalten Prinzipien (Windmühlen), die lediglich technisch erheblich verbessert wurden. Dagegen nutzt der Großteil der Solarenergieanlagen mit der Photovoltaik neuartige, auf direkter Umwandlung von Licht in Elektrizität basierende physikalische Prinzipien, im Vergleich dazu spielt die „Solarthermie“, also Nutzung der Sonnenenergie über Wärme, die dann ggf. in andere Energieformen umgewandelt wird, heute eine geringe Rolle.

Beim Vergleich der Anteile verschiedener Energieträger am Primärenergieverbrauch (Abb. 6) ist auf einen häufig zu beobachtenden Denkfehler hinzuweisen: Für die CO₂-Emission interessant ist der Primärenergieverbrauch des Systems (siehe Abschnitt 3). Hinsichtlich der daraus gewonnenen End- beziehungsweise Nutzenergie ist jedoch der Umwandlungswirkungsgrad zu betrachten: Fossile Energieträger werden zunächst verbrannt, die Wärmeenergie dann (außer bei Heizung) in die gewünschte Energieform umgewandelt. Bei Elektrizität (etwa im Kohle-, Kern- oder Gaskraftwerk) geschieht dies mit einem Wirkungsgrad von 30–50 % (im Mittel wohl eher unter 40 %), beim Verkehr eher mit 20–25 % Wirkungsgrad. Bei den erneuerbaren Energien wird aber in der Regel Primär- und Endenergie gleichgesetzt, da zum Beispiel bei einer Windturbine nicht angegeben wird, welchen Anteil der an sich verfügbaren Windenergie die Anlage in Elektrizität umsetzt. Damit müssen diese – je nach Anwendung – etwa zweieinhalb bis fünffach gewichtet werden. Daher kann mit verhältnismäßig geringen Anteilen erneuerbarer Primärenergie ein substanzieller Beitrag zur elektrischen Endenergie erzeugt werden.

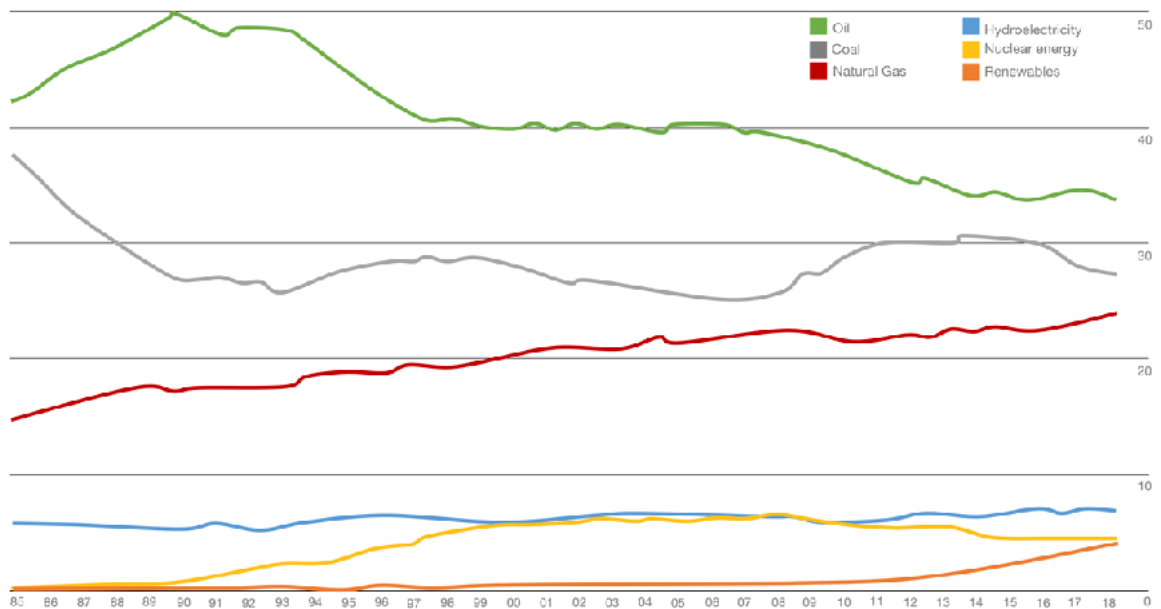


Abb. 6: Anteile der einzelnen Energieträger (in Prozent) am Welt-Primärenergieverbrauch. Öl hat den größten Anteil (34 %), gefolgt von Kohle (27 %), Wasserkraft und Kernenergie tragen mit ca. 7 % bzw. 4 % bei. Es ist zu beachten, dass fossile Energieträger und Kernenergie nur mit ca. 1/3 Wirkungsgrad in Endenergie (z. B. Elektrizität, siehe Text) umgewandelt werden können, erneuerbare Energien fallen dagegen in der Regel bereits als Endenergie (Elektrizität) an und tragen damit zu etwa 12 % zur Welt-Endenergieversorgung bei, Kernenergie dagegen nur mit ca. 1.3 %

Energieverteilung und Energiespeicherung

Energiespeicherung ist bei fossilen Energieträgern kein wesentliches Thema; sie läuft auf die Lagerung von Energieträgern hinaus, die bei Kohle oder Öl wenig problematisch ist. Bei Gas werden zum Beispiel Druckspeicher in Salzstöcken genutzt (siehe nationale Gasreserve Deutschlands).

Vor allem bei elektrischer Energie wird Speicherung derzeit thematisiert. Grundsätzlich muss elektrische Energie erzeugt werden, wenn sie benötigt wird. Speicherung elektrischer Energie findet traditionell in Pumpspeicherkraftwerken statt, die potenzielle Energie von Wasser speichern.

Im Zusammenhang mit erneuerbarer Energie, bei der das Angebot stark schwankt, werden Speicher für Elektrizität zunehmend wichtiger. Diskutiert werden neben Pumpspeichern Pressluftspeicher, Batterien und diverse „unkonventionelle“ Speicher (etwa *Power-to-Gas*-Speicher, Betonkugelspeicher oder Speicher, die Konzentrationsgradienten von Salzlösungen ausnutzen). Abb. 7 gibt die notwendige Speichergröße als Funktion des Anteils erneuerbarer Energie am Gesamtenergiemix für Europa an. Sie wäre bereits heute für einen 70 %-Anteil an erneuerbarer Energie ausreichend. Ihr genauer Wert hängt auch stark von der Überkapazität an installierter Leistung ab, d. h. um welchen Faktor die mittlere Leistung den mittleren Verbrauch übersteigt (siehe z. B. Tröndle et al. 2012; Wagner 2016).

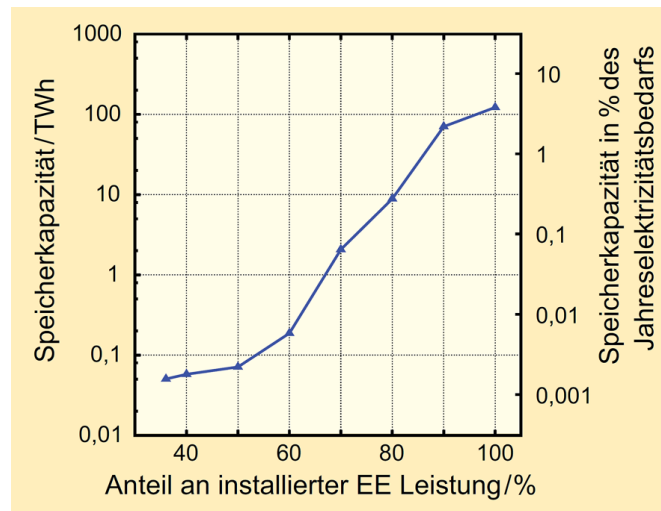


Abb. 7: Erforderliche Speichergröße für ein europäisches Elektrizitätsverbundnetz in TWh (linke Ordinatenachse) beziehungsweise als Prozentsatz des Jahresenergiebedarfs (rechte Ordinatenachse) als Funktion des Anteils erneuerbarer Energie am Gesamtenergiemix. Die derzeitige Speicherkapazität der europäischen Pumpspeicherkraftwerke liegt bei ca. 2,5 TWh (ca. 0.1 % des Jahresbedarfes), wäre also heute schon für einen Anteil erneuerbarer Energie im Elektrizitätssektor von ca. 70 % ausreichend. Dagegen wäre für eine zu 100 % auf erneuerbaren Energien beruhende Versorgung ca. 3 % des Jahresbedarfes an Speicherkapazität notwendig

Insgesamt gibt es mittlerweile zahlreiche Studien, die vollständig emissionsfreie Energieszenarien beschreiben und deren Machbarkeit analysieren (siehe z. B. Ram et al. 2019; Bogdanov et al. 2019; Hansen et al. 2019). Einige Maßnahmen hierzu werden im Abschnitt 2.5 Energiewende unten näher beschrieben.

Die Energieversorgung Deutschlands

Deutschland hat vergleichsweise früh damit begonnen, die Energieversorgung von den traditionellen fossilen Brennstoffen hin zu erneuerbaren Energien umzustellen (Stichwort Energiewende, siehe unten). Dennoch trägt weiterhin die Wärmeerzeugung durch Verbrennung, oftmals gefolgt von einer Umwandlung der Wärmeenergie in mechanische oder elektrische Energie, den Hauptteil der Energieversorgung. Der „Verbrauch“ von Primärenergie in Deutschland verteilt sich wie folgt auf die verschiedenen Energieträger:

Primärenergieverbrauch Deutschland: 13.106 PJ (Petajoule 10^{15} J oder Trillionen Joule) (Quelle: AGEB 2019)

Davon Erneuerbare:	13,8 %
Kernenergie:	6,3 %
Steinkohle:	10,9 %
Braunkohle:	11,3 %
Erdöl:	34,0 %
Erdgas	23,4 %
Sonstige:	0,3 %

Ganz grob gerechnet entfällt je ein Viertel des Primärenergiebedarfs auf die Sektoren:

- - Elektrizitätserzeugung
- - Verkehr
- - Heizung
- - Industrie

Genauer betrachtet ergibt sich der Primärenergieeinsatz für:

(Angaben in Peta Joule = 10^{15} J oder Trillionen Joule)

Stromerzeugung:	4.642 PJ (35,4 %)
Verkehr:	2.541 PJ (19,4 %)
Private Haushalte (ohne Elektrizität):	1.825 PJ (13,9 %)
Industrie, Bergbau, Gewerbe, Handel (o. Elektr.):	2.663 PJ (20,3 %)
Nicht ohne Weiteres zuordenbar:	1442 PJ (11,0 %)
<i>Summe</i>	<i>13.106 PJ (100 %)</i>

Infolge der Dominanz der fossilen Brennstoffe als Energieträger ergeben sich für das gesamte Energiesystem Deutschlands (siehe Abb. 8) erhebliche Anteile von Umwandlungsverlusten wenn „Primärenergie“ in „Endenergie“ umgewandelt wird. Die exakte Quantifizierung des Nutzenergieverbrauchs ist schwierig, diese letzte Stufe der Umwandlung ist daher in Abb. 9 nicht dargestellt. Während die Endenergie im derzeitigen deutschen Energiesystem etwa zwei Dritteln der Primärenergie entspricht, ist die Nutzenergie jedoch noch einmal deutlich geringer und liegt bei weniger als der Hälfte der Primärenergie.

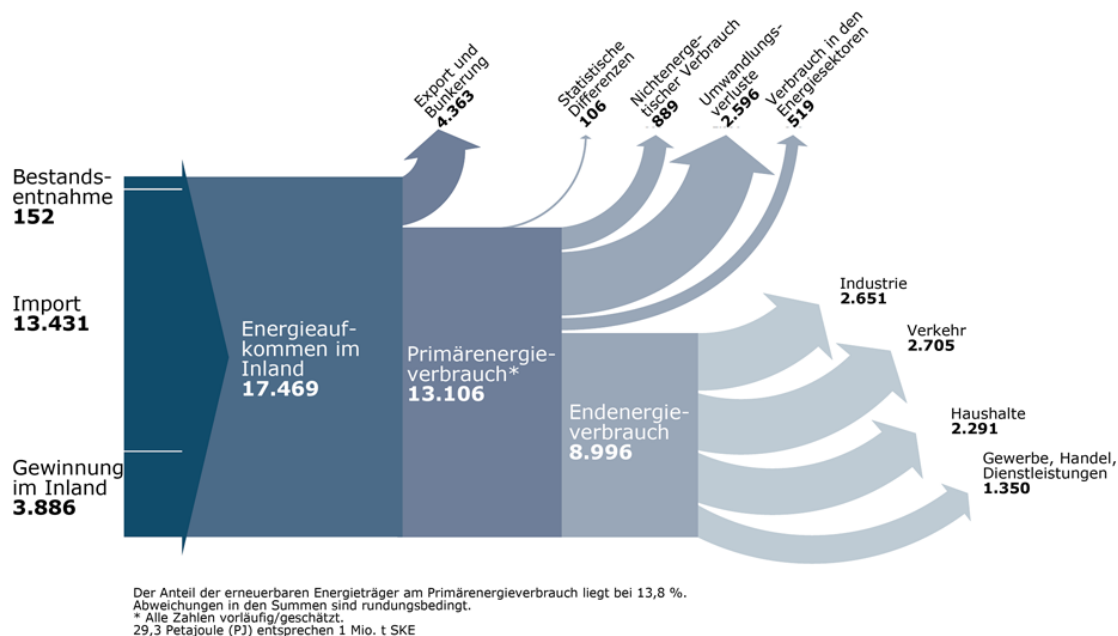


Abb. 8: Energieflussbild 2018 (vorläufige Zahlen) für die Bundesrepublik Deutschland Angaben in Petajoule, 1 PJ = 10^{15} Joule)

Der nach wie vor hohe Anteil der fossilen Brennstoffe als Energieträger bedingt trotz abnehmendem Trend weiterhin hohe CO₂-Emissionen. Während in den Sektoren Elektrizität, Hei-

zung und Industrie gewisse Einsparungen erreicht wurden, ist treibhausgasfreie Technologie in nennenswertem Umfang nur im Elektrizitätssektor eingeführt worden. In Deutschland wurden im Jahr 2019 ca. 60 % des Stroms durch emissionsfreie Technologien hergestellt, der Großteil davon (ca. 46 % der erzeugten Elektrizität) durch erneuerbare Energie (Wind, Solar, Wasserkraft, Biomasse; siehe Fraunhofer ISE 2019).

Tatsächlich hatten Wind, Wasser und Sonne im Jahr 2017 in Deutschland nur einen Anteil von 4,4 % am Primärenergieverbrauch (über die Hälfte des oben aufgeführten Anteils von 13,8 % erneuerbarer Energie stammen aus Biomasse), was gerne irreführend als vergleichsweise wenig dargestellt wird, etwa im Vergleich zu über 20 % Primärenergieanteil von Kohle. Hier werden natürlich Äpfel (Primärenergieverbrauch bei der Elektrizitätserzeugung aus fossilen Energieträgern) mit Birnen (Primärenergie = Endenergie bei erneuerbarer Energie) verglichen. Mit 4,4 % erneuerbarer Primärenergie wurden 2017 30 % der elektrischen Endenergie erzeugt und somit – soweit dadurch Stromproduktion aus Kohle oder Kernenergie ersetzt wurde – über 10 % des deutschen Primärenergieverbrauchs eingespart. Die vollständige Ersetzung von Kohlestrom durch erneuerbare Energien würde sowohl den Primärenergieverbrauch als auch die CO₂-Emissionen erheblich reduzieren. Nur zwei Jahre später, in 2019, betrug der Anteil des Stroms aus Wind, Wasser und Sonne an der gesamten Elektrizitätserzeugung bereits 37 %, dazu 9 % aus Biomasse (Fraunhofer ISE 2019). Dies zeigt eindrucksvoll, dass Primärenergieverbrauch und CO₂-Emissionen auch kurzfristig stark vermindert werden können.

Ähnliches gilt für den Verkehrssektor: Die vorgesehene Umstellung des Kraftfahrzeugverkehrs auf elektrischen Antrieb ginge mit einer enormen Steigerung des Wirkungsgrades einher: verbrennungsmotorgetriebene Fahrzeuge setzen die Energie des Brennstoffs mit einem Wirkungsgrad im Bereich von 20 % (PKW) bis knapp 40 % (LKW) in mechanische Arbeit an den Rädern um. Dagegen werden bei batterieelektrischen Antrieben ca. 70 % der elektrischen Energie in Vortrieb des Fahrzeuges umgesetzt. Eine Umstellung auf Elektroantrieb mit erneuerbar erzeugter Elektrizität würde also den Primärenergiebedarf des Kraftfahrzeugsektors (der den überwiegenden Anteil der knapp 20 % des Primärenergiebedarfs des Verkehrs ausmacht) auf etwa ein Drittel senken.

Die Energiewende

Technische Maßnahmen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen (→Klimawandel) sind in Deutschland unter dem Schlagwort „Energiewende“ bekannt geworden. Bisher sind wesentliche Fortschritte bei der Einführung der erneuerbaren Energie (ebenso wie im globalen Maßstab) vor allem in der Elektrizitätsbereitstellung erzielt worden, also etwa der Einführung der Solar- und Windenergie. Die erneuerbare Energie trägt derzeit (2019) mit 46 % zur Elektrizitätsbereitstellung in Deutschland bei (siehe Fraunhofer ISE 2019; Umweltbundesamt 2019).

Zudem ist die Energieproduktivität, also die gesellschaftliche Leistung pro Energieeinsatz, in den letzten Jahrzehnten erheblich gestiegen. Berechnungen des Umweltbundesamtes (siehe Abb. 9) zeigen, dass ohne höhere Energieproduktivität und ohne erneuerbare Energie der Energieverbrauch der Bundesrepublik Deutschland heute (2019) gegenüber 1990 um ca. 66 % höher läge.

Zur Einhaltung der Klimaziele (→Klimawandel) sind aber noch weit größere Anstrengungen nötig: Einerseits muss der Anteil der treibhausgasfreien Elektrizität gegen 100 % gehen, andererseits müssen die Treibhausgasemissionen der übrigen Sektoren radikal gesenkt werden.

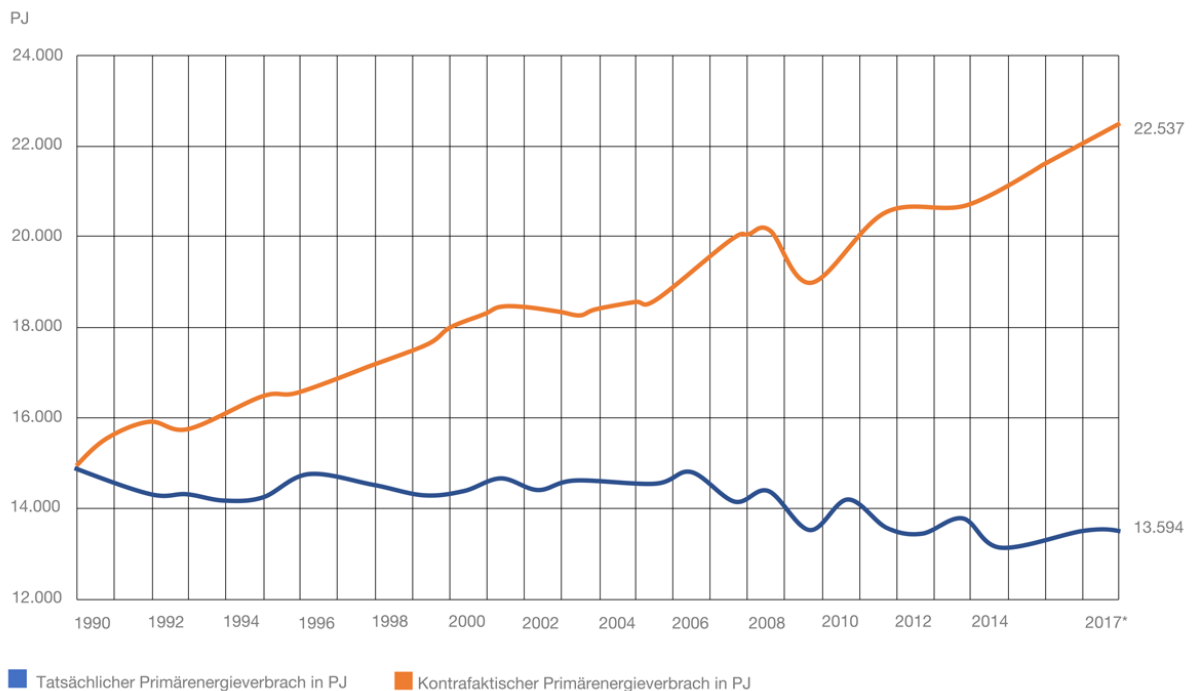


Abb. 9: Hypothetischer Primärenergieverbrauch in Deutschland bei gleichbleibender Energieproduktivität

Die technischen Voraussetzungen dafür sind im Prinzip gegeben (siehe z. B. MacKay 2009; Klaus et al. 2010; Düren 2017; Holler und Gaukel 2017; Ram et al. 2019; Bogdanov et al. 2019; Hansen et al. 2019) und sollen hier nur kurz skizziert werden:

- - Die Elektrizitätserzeugung kann auf erneuerbare Energie umgestellt werden (siehe oben).
- - Der Straßenverkehr kann elektrifiziert werden (de facto verlangen die jetzt gültigen EU-Richtlinien bereits ca. 50 % Elektrofahrzeuge bis 2030) beziehungsweise Straßenverkehr kann auf die Schiene verlagert werden, die bereits heute weitgehend elektrifiziert ist. Zudem kann (Kurzstrecken-)Autoverkehr teilweise auf Fahrrad oder andere Kleinfahrzeuge verlagert werden. Der zusätzliche Elektrizitätsbedarf für diese Umstellung liegt aufgrund der geringen Effizienz des bisher dominierenden Verbrennungsmotors bei nur 20–25 % des heutigen Verbrauchs.

- - Eine weitere interessante Option ist die Reduktion des Transportbedarfs durch Zurückfahren der Zentralisierung der Produktion, dies sollte auch durch neue Produktionsverfahren wie zum Beispiel 3D-Druck erleichtert werden.
- - Problematisch bleibt der Luftverkehr, elektrische Flugzeuge scheinen nur auf Kurzstrecken möglich zu sein (die in der Regel besser mit der Bahn bedient würden). Hier könnten Kraftstoffe (Kohlenwasserstoffe), die aus der Atmosphäre entzogenem CO₂ und durch Wasser-Elektrolyse gewonnenem Wasserstoff synthetisiert werden (Schlagwort „*Power-to-X*“), oder direkter Wasserstoffantrieb eine Lösung sein.
- - Gebäudeheizung kann langfristig durch bessere Isolation vermutlich völlig eliminiert werden (Nullenergiehaus) beziehungsweise kurz- und mittelfristig auf Elektro-Wärmepumpen, Fernheizung oder neuartige Speichersysteme, die zum Beispiel Kühlung im Sommer mit Heizung im Winter kombinieren, umgestellt werden.
- - Bei der Industrie ist eine Kombination vieler Maßnahmen erforderlich. Der industrielle Elektrizitätsbedarf kann natürlich genauso wie der private durch erneuerbare Energie (plus Speichersysteme) ersetzt werden. Prozesswärme ist zum Teil schwieriger CO₂-neutral herzustellen.
- - Eine CO₂-neutrale Wirtschaft wäre bereits heute technisch möglich, indem CO₂ aus den Abgasen von stationären Quellen wie Kraftwerken oder Industrieanlagen entfernt und in geologische Formationen eingelagert wird. Nach der englischen Bezeichnung „*Carbon Capture and Storage*“ spricht man von CCS. Allerdings sind die meisten anderen Methoden der CO₂-Emissionsvermeidung ökonomischer. Zudem sind mit der sicheren Langzeitspeicherung von CO₂ möglicherweise erhebliche Probleme und Risiken verbunden.
- - Intrinsische CO₂-Emissionen etwa der Zement- und Stahlindustrie können durch CCS-Maßnahmen (Zementindustrie) beziehungsweise durch Umstellung auf Wasserstoffreduktion beziehungsweise elektrochemische Verfahren (Stahlindustrie) eliminiert werden.
- - Eine wichtige Maßnahme zur Reduktion der CO₂-Emissionen ist natürlich die Energieeinsparung (s. o.). Wenn weniger fossile Energie benötigt wird, sinken automatisch die CO₂-Emissionen, zudem wird die Umstellung auf erneuerbare Energie günstiger, wenn weniger davon bereitgestellt werden muss.

Energiepolitik und Energierecht

Internationale Ebene

Energiewirtschaft und -regulierung

Das Energievölkerrecht ist keine geschlossene Ordnung, stattdessen existiert eine Reihe völkerrechtlicher Regelungen, die die verschiedenen Facetten von Energie behandeln. Die Rechtsquellen des Energievölkerrechts sind verstreut über die allgemeinen Rechtsquellen des Völkerrechts, das heißt über völkerrechtliche Verträge, Gewohnheitsrecht und allgemeine Rechtsgrundsätze (Redgwell 2007, 23). Aus dem Bereich des Völkergewohnheitsrechts sind

vier Regeln besonders relevant: das Prinzip der staatlichen Souveränität über natürliche Ressourcen, das Verbot grenzüberschreitender schädlicher Beeinträchtigungen, die Notifizierungs- und Kooperationspflicht mit anderen Staaten im Falle von Risiken oder Unfällen aus gefährlichen Aktivitäten sowie die Pflicht zur Kooperation hinsichtlich geteilter natürlicher Ressourcen (dazu ausführlich Gemmer 2017, 552ff.).

Im Völkervertragsrecht zentral ist der Energiecharta-Vertrag (BGBl. 1997 II 4), ein internationaler Vertrag, der nach dem Ende des Kalten Kriegs die Integration der Energiesektoren der Nachfolgestaaten der Sowjetunion und Osteuropas in die europäischen und globalen Märkte zur Aufgabe hatte und durch eine Erleichterung des internationalen Energiehandels die Versorgungssicherheit der von Energieimporten abhängigen Industrienationen erhöhen sollte (dazu Gundel 2018, Kap. 1 D Rn. 1). Der Energiecharta-Vertrag wurde im Dezember 1994 in Lissabon unterzeichnet und trat im April 1998 in Kraft. Nach seinem Art. 2 verfolgt der Energiecharta-Vertrag den Zweck, einen rechtlichen Rahmen für die Förderung langfristiger Zusammenarbeit im Energiebereich auf der Grundlage der gegenseitigen Ergänzung und des gegenseitigen Nutzens zu schaffen. Hierzu werden Regelungen zu den vier Pfeilern des Vertrags, namentlich Handel, Investitionen, Transit und Streitbeilegung, getroffen. Gemäß Art. 34 Energiecharta-Vertrag findet in regelmäßigen Abständen eine Energiecharta-Konferenz statt, die durch die Verabschiedung von Protokollen und Erklärungen die Vervollständigung des Vertrags und seine Anpassung an die weitere Entwicklung gewährleisten soll (Gundel 2018, Kap. 1 D Rn. 15). Allerdings bindet der Energiecharta-Vertrag derzeit „nur“ 49 Vertragsparteien, darunter 48 Staaten und die EU. Obwohl der Beitritt allen Staaten offensteht, weist der Kreis der Vertragsparteien einen „eurasischen“ Schwerpunkt auf, insbesondere haben Kanada und die USA, obwohl sie an den Verhandlungen teilgenommen haben, den Vertrag nicht unterzeichnet. Stattdessen wurde 2009 zur Förderung der transatlantischen Zusammenarbeit im Energiebereich der Energierat EU-USA gegründet. Auch das aufgrund seines Rohstoffreichtums und seiner Stellung als Transitstaat energiepolitisch wichtige Russland wird durch den Energiecharta-Vertrag nicht gebunden. Russland hatte den Vertrag zwar unterzeichnet, aber nicht ratifiziert. Zwischen der EU und Russland gilt daher das Partnerschafts- und Kooperationsabkommen von 1997 bis zum Abschluss eines neuen Abkommens weiter fort. Auch mit zahlreichen anderen Ländern hat die EU weltweit Abkommen über den Handel mit Energie geschlossen oder gemeinsame Erklärungen abgegeben, beispielsweise die Afrika-EU-Energiepartnerschaft vom 8./9. Dezember 2007 oder die Östliche Partnerschaft vom 7. Mai 2009.

Durch das Abkommen über ein internationales Energieprogramm wurde 1974 die Internationale Energieagentur (IEA) als autonome Agentur der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) in Paris zum gemeinsamen Vorgehen der 16 unterzeichnenden Industrienationen gegen die damalige Ölkrise gegründet. Kernaufgabe der IEA ist nach wie vor die Energiesicherheit, sie konzentriert sich heute aber auf eine Vielzahl von Themen, die von der Sicherheit der Stromversorgung bis hin zu Investitionen, →Klimawandel sowie Energiezugang und -effizienz reichen. Die IEA erstellt Statistiken und Analysen, untersucht das gesamte Spektrum der Energiefragen und setzt sich für eine Politik

ein, die die Zuverlässigkeit und →Nachhaltigkeit der Energie in ihren heute 30 Mitgliedsländern und darüber hinaus verbessert (IEA 2021).

Umweltenergie

Das Umweltenergie recht ist ein Teilgebiet des Energierechts, das die Gesamtheit der Rechtsvorschriften umfasst, die unmittelbar die den Umweltschutz berührenden Merkmale der Energiegewinnung, der Energieversorgung und des Energieverbrauchs in den Sektoren Strom, Wärme und Energieversorgung regeln (dazu Kahl 2010, 599; Pritzsche und Vacha 2017, § 1 Rn. 1ff.). Kernelemente des Umweltenergie rechts sind der Emissionshandel, die Förderung erneuerbarer Energien sowie die Steigerung der Energieeffizienz (Kahl und Gärditz 2021, § 6 Rn. 7).

Akteure des internationalen Umweltenergie rechts sind insbesondere die Staaten der Welt, die sich mittels völkerrechtlicher Verträge zur Einhaltung gemeinsamer Standards verpflichten. Außerdem wurde 2009 die Internationale Agentur für Erneuerbare Energie (IRENA) gegründet, die Industrie- und Entwicklungsländer beim Ausbau erneuerbarer Energien unterstützen soll. Zum Umweltenergie völkerrecht gehören insbesondere Art. 9 Energiecharta-Vertrag und das Energiechartaprotokoll über die Energieeffizienz und damit verbundene Umweltaspekte (BGBl. 1997 II 102). Dieses Energiechartaprotokoll verfolgt die Ziele, die Energieeffizienzpolitik im Einklang mit nachhaltiger Entwicklung zu fördern, Rahmenbedingungen zu schaffen, die Produzenten und Verbraucher dazu zu bewegen, Energie so sparsam, effizient und umweltfreundlich wie möglich zu nutzen, sowie die Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Energieeffizienz zu fördern (Europäische Union 2020). Außerdem ist am 4. November 2016 das Übereinkommen der UN-Klimakonferenz vom Dezember 2015 in Paris (sog. Pariser Übereinkommen / *Paris Agreement*) in Kraft getreten. Völkerrechtlich verbindlich festgelegtes Ziel ist die Begrenzung der globalen Erderwärmung auf deutlich unter 2°C, möglichst 1,5°C, im Vergleich zu vorindustriellen Levels (→Klimawandel). Die Umstellung auf erneuerbare Energien ist eine zentrale Säule zur Erreichung dieses Ziels.

Einige Länder haben, meist unter dem Eindruck der Nuklearkatastrophe von Fukushima (März 2011), einen Atomausstieg beschlossen, planen diesen derzeit oder haben zumindest einige Kernkraftwerke ausgeschaltet und planen keinen weiteren Ausbau. Vorreiter insoweit sind vor allem Italien, Irland, Belgien, Deutschland, die Schweiz und Spanien, die in Reaktion auf Fukushima einen Atomausstieg beschlossen haben oder weiter atomkraftfrei bleiben wollen. In Deutschland sind nur noch sechs der insgesamt 36 Reaktoren im Einsatz (IAEA-PRIS 2021). Dennoch werden weltweit aktuell noch 444 Reaktoren betrieben (IAEA-PRIS 2021). In einigen Ländern ist die Atomenergie sogar auf dem Vormarsch. Derzeit befinden sich 51 Kernkraftwerke in insgesamt 19 Ländern im Bau. Treibende Kraft ist vor allem China mit 13, gefolgt von Indien mit sechs und Korea mit vier geplanten Reaktoren (IAEA-PRIS 2021). Auch in Europa planen einige Länder neue Atomkraftwerke. Großbritannien, Frankreich, Polen und Tschechien forderten 2012 die EU-Kommission sogar zur Subventionierung der Atomenergie als emissionsarme Technologie auf (Gammelin 2012). Zwei Jahre später genehmigte die Kommission eine britische Beihilfe zugunsten des Kernkraftwerks *Hinkley Point C*. Eine hiergegen gerichtete Klage Österreichs wurde vor dem Europäischen Gerichts-

hof abgewiesen, der die Beihilfe für unionsrechtskonform hielt (EuGH, Rs. C-594/18 P, ECLI:EU:C:2020:742). Die Kommission hat überdies jüngst die Aufnahme der Atomenergie in die EU-Taxonomie beschlossen, sodass – sollten der Rat oder das Europäische Parlament nicht rechtzeitig die erforderlichen Mehrheiten finden, um Einwände hiergegen vorzubringen – die Erzeugung von Kernenergie künftig unter bestimmten Voraussetzungen als ökologisch nachhaltig klassifiziert werden kann. Der Kommissionsvorschlag ist zwischen den kernenergiefreundlichen und den der Atomkraft kritisch gegenüberstehenden Mitgliedstaaten politisch hoch umstritten, die rechtlichen Erfolgsaussichten einer Klage – wie von Österreich und Luxemburg angekündigt – sind aufgrund der Beurteilungsspielräume, über die die Kommission verfügt, jedoch ungewiss (näher dazu Lorenzen 2022).

Der Ausbau erneuerbarer Energien wird in vielen Staaten weltweit vorangetrieben, auch wenn ihr Anteil am weltweiten Endenergieverbrauch mit 4,4 % pro Jahr eher langsam steigt. 2017 lag der Anteil erneuerbarer Energien weltweit bei 18,1 % (Ren21 2019, 17).

EU-Ebene

Energiewirtschaft und -regulierung

Nach Art. 194 I Vertrag über die Arbeitsweise der EU (AEUV) verfolgt die Energiepolitik der Union die Ziele, das Funktionieren des Energiemarkts sicherzustellen, die Energieversorgungssicherheit in der Union zu gewährleisten, sowie die Energieeffizienz, Energieeinsparungen, die Entwicklung neuer und erneuerbarer Energiequellen, sowie die Interkonnektion der Energienetze zu fördern (näher dazu Kahl 2009; Ludwigs 2022, Einl. A. Rn. 39ff.). Art. 194 II 1 AEUV ermächtigt das Europäische Parlament und den Rat zum Erlass derjenigen Maßnahmen, die zur Verwirklichung dieser Ziele erforderlich sind. Allerdings bestimmt gemäß Art. 194 II UA 2 AEUV jeder Mitgliedstaat selbst die Bedingungen für die Nutzung seiner Energieressourcen, seine Wahl zwischen verschiedenen Energiequellen und die allgemeine Struktur seiner Energieversorgung (sog. energiepolitischer Souveränitätsvorbehalt). Dieser Souveränitätsvorbehalt verdeutlicht, dass die Energieversorgung für die Staaten aus Gründen des Funktionierens ihrer Wirtschaft und der Daseinsvorsorge für ihre Bevölkerung ein so wichtiges und sensibles Thema ist, dass man zwar zu internationaler Kooperation bereit ist, dass aber die Letztentscheidung über die Kernfragen der eigenen Energieversorgung auf nationalstaatlicher Ebene und damit in nationalstaatlicher Autonomie politisch verbleiben soll und auch nach den Rechtsgrundlagen der EU tatsächlich verbleibt (näher zum Souveränitätsvorbehalt Winkler et. al. 2021, 50ff.).

Das Energiewirtschafts- und Regulierungsrecht der EU ist erst in den letzten 25 Jahren europäisiert worden und damit ein Nachzügler bei der Errichtung des EU-Binnenmarkts. Der Grund dafür dürfte vor allem darin liegen, dass die Energieversorgung in den Mitgliedstaaten häufig als staatliches Monopol ausgestaltet oder mit einer wettbewerbsrechtlichen Sonderstellung versehen war, die die Mitgliedstaaten zunächst nicht aufgeben wollten (zur Entwicklung des nationalen Energierechts in den Mitgliedstaaten siehe Roggenkamp et al. 2016).

Die Etablierung eines Energie-Binnenmarkts begann nach langen Verhandlungen mit der ersten Generation der Binnenmarkt-Richtlinien für Strom 1996 (RL 96/92/EG vom

19.12.1996, ABl. L 27/20) und Gas 1998 (RL 98/30/EG vom 22.6.1998, ABl. L 204/1). Sie enthielten Vorgaben für das materielle Energierecht der Mitgliedstaaten und sorgten für eine Lockerung der staatlichen Versorgungsmonopole, wobei den Mitgliedstaaten aber ein breiter Handlungsspielraum blieb (siehe zu den ersten europäischen Energierichtlinien Pritzsche und Vacha 2017, § 2 Rn. 5ff.).

2003 löste das zweite Binnenmarkt-Paket, bestehend aus einer neu gefassten Elektrizitätsbinnenmarkt-RL (RL 2003/54/EG vom 26.6.2003, ABl. L 176/37), einer neu gefassten Erdgasbinnenmarkt-RL (RL 2003/55/EG vom 26.6.2003, ABl. L 176/57) sowie der Stromhandels-VO (VO (EG) Nr. 1228/2003 vom 26.6.2003, ABl. L 176/1), die erste Richtliniengeneration ab. Danach mussten die Mitgliedstaaten ihre Märkte bis zum 1. Juli 2007 vollständig liberalisieren. Außerdem wurden Vorgaben für Aufgaben und Struktur der nationalen Regulierungsbehörden gemacht. Die Kommission erhielt durch die Stromhandels-VO Regelungszuständigkeiten für den grenzüberschreitenden Stromhandel, die 2005 durch die Erdgasfernleitungs-VO (VO (EG) Nr. 1775/2005 vom 28. September 2005, ABl. L 289/1) auf Erdgasfernleitungsnetze ausgeweitet wurden.

Das dritte Binnenmarkt-Paket von 2009 bestand aus fünf Rechtsakten, namentlich einer Strom-RL (RL 2009/72/EG vom 13. Juli 2009, ABl. L 211/55) sowie einer Strom-VO (VO (EG) Nr. 714/2009 vom 13. Juli 2009, ABl. L 211/15), einer Gas-RL (RL 2009/73/EG vom 13. Juli 2009, ABl. L 211/94), einer Gas-VO (VO (EG) Nr. 715/2009 vom 13. Juli 2009, ABl. L 211/36) und der für beide Bereiche geltenden Agentur-VO (VO (EG) Nr. 713/2009 vom 13. Juli 2009, ABl. L 211/1), durch die die Agentur für die Zusammenarbeit der Energie-regulierungsbehörden (*Agency for the Cooperation of Energy Regulators* – ACER) gegründet wurde. Das dritte Binnenmarkt-Paket sorgte für eine weitere Etablierung des Wettbewerbs, indem es die Vorgaben für die nationalen Verwaltungsstrukturen und -verfahren verschärft und ein komplexes Zusammenspiel von Netzbetreibern, Kommission und ACER bei der Regulierung des grenzüberschreitenden Netzbetriebs vorschreibt (zum dritten Binnenmarkt-Paket siehe Schreiber 2009, 154ff.; Däuper 2009, 214ff.; Gundel und Lange 2011).

Schließlich beinhaltet das sogenannte „Winterpaket „Saubere Energie für alle er““ (dazu Pause 2019, 387ff.; Scholtka und Keller-Herder 2019, 897ff.; Gundel und Buckler 2020, 41ff.) mit seinen Neufassungen der Elektrizitätsbinnenmarkt-RL (RL [EU] 2019/944 vom 5. Juni 2019, ABl. L 158/125), der Elektrizitätsbinnenmarkt-VO (VO [EU] 2019/943 vom 5. Juni 2019, ABl. L 158/54), der neuen Risikovorsorge-VO (VO [EU] 2019/941 vom 5. Juni 2019, ABl. L 158/1) und der neuen ACER-VO (VO [EU] 2019/942 vom 5. Juni 2019, ABl. L 158/22) ein viertes Energiebinnenmarkt-Paket. Die Neuerungen der Elektrizitätsbinnenmarkt-RL führen vor allem zu einer Stärkung der Stellung von Verbrauchern. Künftig muss der Versorgerwechsel gemäß Art. 12 I Elektrizitätsbinnenmarkt-RL innerhalb von drei Wochen ab Antragstellung und ab 2026 sogar innerhalb von 24 Stunden an jedem Werktag möglich sein. Haushaltskunden und Kleinunternehmen dürfen dabei keine Wechselgebühren auferlegt werden, Art. 12 II Elektrizitätsbinnenmarkt-RL. Endkunden mit einem intelligenten Stromzähler haben künftig gemäß Art. 11 I Elektrizitätsbinnenmarkt-RL einen Anspruch auf dynamische Stromverträge. Außerdem soll der Verbraucher künftig selbst aktiv am Markt teilnehmen können, Art. 14 Elektrizitätsbinnenmarkt-RL (dazu Scholtka und Keller-Herder

2020, 890). Die Elektrizitätsbinnenmarkt-VO stellt Grundsätze für die funktionsfähigen integrierten Elektrizitätsmärkte auf. Künftig wird der *Day-Ahead*- und *Intraday*-Stromhandel gemäß Art. 8 IV Elektrizitätsbinnenmarkt-VO EU-weit in 15-Minuten-Einheiten erfolgen. Die neugeschaffene Risikovorsorge-VO soll gemäß ihrem Art. 1 sicherstellen, dass die Mitgliedstaaten bei der Vorsorge für Stromversorgungskrisen sowie bei deren Prävention und Bewältigung zusammenarbeiten und die Anforderungen eines wettbewerbsorientierten Elektrizitätsbinnenmarktes in vollem Umfang berücksichtigen. Art. 5, 6 Risikovorsorge-VO verpflichten den Verband Europäischer Übertragungsnetzbetreiber (*European Network of Transmission System Operators for Electricity*, ENTSO-E) zur Bestimmung von Szenarien für Stromversorgungskrisen auf regionaler Ebene, Art. 7 Risikovorsorge-VO die Mitgliedstaaten zur Bestimmung der relevantesten Szenarien auf nationaler Ebene. Aufbauend auf diesen Szenarien werden gemäß Art. 10b Risikovorsorge-VO Risikovorsorgepläne erstellt (zur Risikovorsorge-VO Ludwigs 2020, § 5 Rn. 275).

Umweltenergie

Die energierechtliche Kompetenznorm des Art. 194 I AEUV ist auch für den Bereich der EU-Umweltenergiepolitik von erheblicher Bedeutung. Daneben ermächtigt Art. 192 AEUV i. V. m. Art. 191 AEUV die EU zum Erlass von Vorschriften zur Umweltpolitik. Diese verfolgt gemäß Art. 191 I AEUV die Ziele, die Umwelt zu erhalten und zu schützen sowie ihre Qualität zu verbessern, die menschliche Gesundheit zu schützen, natürliche Ressourcen umsichtig und rationell zu verwenden sowie Maßnahmen auf internationaler Ebene zur Bewältigung regionaler oder globaler Umweltprobleme und insbesondere zur Bekämpfung des Klimawandels zu fördern (näher dazu Ludwigs 2022, Einl. A. Rn. 21ff.). Die Mitgliedstaaten dürfen gegenüber unionsrechtlichen Schutzmaßnahmen, die aufgrund des Art. 192 AEUV getroffen werden, verstärkte Schutzmaßnahmen beibehalten oder ergreifen, Art. 193 AEUV (sog. Schutzverstärkungsklausel; dazu Ludwigs 2022, Einl. A. Rn. 37). Diese Möglichkeit besteht im Falle europäischer Rechtsakte nach Art. 194 AEUV nicht. Nicht zuletzt deshalb stellt sich die Frage nach einem Rangverhältnis beider Kompetenztitel, die in der Rechtswissenschaft nicht einheitlich beurteilt wird. Mit Blick auf die Förderung der Energieeffizienz und von Energieeinsparungen sowie die Entwicklung neuer und erneuerbarer Energiequellen sprechen gute Gründe für eine Spezialität des Art. 194 AEUV (Kahl 2018, Art. 192 AEUV Rn. 91; Gundel und Buckler 2020, 42; a. A. Ludwigs 2020, § 5 Rn. 86; 2022, Einl. A. Rn. 45). Schließlich ermächtigen auch die Kompetenztitel zur gemeinsamen Handelspolitik (Art. 206 f. AEUV) sowie zu internationalen Übereinkünften (Art. 216 ff. AEUV) zum Erlass von Unionsrechtsakten mit umweltenergierechtlichem Bezug.

Auf Grundlage der Ermächtigungen in Art. 194 AEUV und Art. 192 AEUV sowie teilweise anderer Normen hat die EU eine Reihe von Sekundärrechtsakten auf dem Gebiet des Umweltenergierechts erlassen. Dazu gehören vor allem die Emissionshandels-Richtlinie (RL 2009/29/EG), die Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RL 2009/28/EG [EE-RL 2009], neugefasst durch RL [EU] 2018/2001 [EE-RL 2018]) sowie die Energieeffizienz-Richtlinie (RL [EU] 2012/27 [EnEff-RL 2012], neugefasst durch RL [EU] 2018/2002 [EnEff-RL 2018]). Die

beiden letztgenannten wurden 2018 als Teil des sogenannten „Winterpakets ‚Saubere Energie für alle Europäer““ neugefasst.

Die Emissionshandels-RL etabliert in der EU ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten, um auf kosteneffiziente und wirtschaftlich effiziente Weise auf eine Verringerung der Treibhausgasemissionen hinzuwirken, Art. 1 I Emissionshandels-RL. Dieses Ziel soll erreicht werden, indem EU-weit nur eine begrenzte Zahl an Emissionsrechten ausgegeben und anschließend auf einem Markt gehandelt wird (ausführlich zum System des Emissionshandels Kühling et. al. 2018, Kap. 9 Rn. 70ff.; König 2019, 264ff.). Durch die Begrenzung der Gesamtemissionsmenge soll sich ein Preis bilden, der Ausdruck der Knappheit der Emissionsberechtigungen sein soll. Anlagenbetreiber, deren Tätigkeit vom Anwendungsbereich der Richtlinie erfasst wird, müssen für jede Tonne emittiertes CO₂ ein gültiges Zertifikat vorlegen. Diese Zertifikate werden teilweise kostenlos verteilt, teilweise versteigert. Überschüssige Zertifikate können von den Betreibern verkauft werden – umgekehrt müssen die Betreiber auch zusätzlich benötigte Zertifikate nachkaufen. In der Vergangenheit litt das Handelssystem allerdings an einem Überangebot an Zertifikaten, das die Wirksamkeit des Systems gefährdete. Der Zertifikatpreis im Markt war derart gering, dass die bezweckte Anreizfunktion für Betreiber, ihre Emissionen zu verringern, nicht eintreten konnte. In zahlreichen Novellen der Emissionshandels-Richtlinie wurden daher beispielsweise die Vorschriften über die kostenlose Zuteilung von Zertifikaten verschärft und die Gesamtmenge der Zertifikate reduziert (zum Ganzen Kahl und Gärditz 2021, § 6 Rn. 27ff.; Ludwigs 2020, § 5 Rn. 223ff.). Die EE-RL 2018 enthält einen Rahmen für nationale Systeme zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen. Gemäß Art. 3 I EE-RL 2018 stellen die Mitgliedstaaten sicher, dass der Anteil der Energie aus erneuerbaren Quellen am Bruttoendenergieverbrauch der Union im Jahr 2030 mindestens 32 % beträgt, das 2020-Ziel betrug gemäß Art. 3 I EE-RL 2009 20 %. Die Festlegung der nationalen Ziele in integrierten Energie- und Klimaplänen obliegt den Mitgliedstaaten, Art. 3 II 1 EE-RL 2018 (zu dieser und anderen Lockerungen im Rahmen der Novelle 2018 siehe Ludwigs 2020, § 5 Rn. 239ff.). Auch bei der Ausgestaltung ihrer Fördersysteme kommt den Mitgliedstaaten ein weiter Spielraum zu. Hinsichtlich der Förderung von Elektrizität aus erneuerbaren Quellen schreibt Art. 4 IV-VIII EE-RL 2018 eine Förderung offener, transparenter, wettbewerbsfördernder, nichtdiskriminierender und kosteneffizienter Mechanismen wie dem Ausschreibungsverfahren vor. Ein einheitliches Fördersystem gibt die EE-RL 2018 aber weiterhin nicht vor. Auch nach der Novelle 2018 bleibt es also bei einem Nebeneinander nationaler Fördersysteme. Für Brennstoffemissionen aus den Sektoren Wärme und Verkehr, die bisher nicht vom EU-Emissionshandel erfasst werden, gibt es in Deutschland seit 2021 ein nationales Zertifikatehandelssystem (hierzu Kahl und Gärditz 2021, § 6 Rn. 27; Ludwigs 2022, Einl. A. Rn. 138f.).

Die Energieeffizienz ist Gegenstand vieler verschiedener Unionsrechtsakte. Wichtigstes sektorübergreifendes Regelwerk ist die EnEff-RL (dazu Winkler et. al. 2021, 126ff.). Gemäß Art. 1 I EnEff-RL 2018 beträgt das Energieeffizienzziel für 2020 20 %, für 2030 mindestens 32,5 %. Art. 3 I, V EnEff-RL 2018 verpflichtet die Mitgliedstaaten, ein „indikatives nationales Energieeffizienzziel“ für das Jahr 2020 sowie „indikative nationale Energieeffizienzbeiträge“ zur Erreichung des 2030-Ziels festzulegen. Außerdem müssen die Mitgliedstaaten ge-

mäß Art. 7 I EnEff-RL 2018 für den Zeitraum von 2014 bis 2020 jährliche Endenergieeinsparungen in Höhe von 1,5 % des jährlichen Energieabsatzes an Endkunden erreichen, für den Zeitraum von 2021 bis 2030 in Höhe von 0,8 %. Dieses Ziel kann entweder durch Einrichtung eines Energieeffizienzverpflichtungssystems i. S. d. Art. 7a EnEff-EL 2018 oder durch die Annahme alternativer strategischer Maßnahmen i. S. d. Art. 7b EnEff-EL 2018 erzielt werden, Art. 7 X EnEff 2018. Außerdem enthält die EnEff-RL 2018 Vorgaben für die Energieeffizienz der öffentlichen Hand, etwa Art. 5 I EnEff-RL 2018 zur Sanierung beheizter und/oder gekühlter Gebäude im Eigentum der Zentralregierungen oder Art. 6 I EnEff-RL 2018 zur Beschaffung energieeffizienter Produkte, Dienstleistungen und Gebäude durch die Zentralregierungen. Weitere wichtige Regelwerke zur EU-Energieeffizienz sind die Energie-Label-VO (VO 2017/1369) und die Ökodesign-RL (RL 2009/125). Die Energie-Label-VO verpflichtet Lieferanten und Händler zu Produktinformationen über den Energie- und Ressourcenverbrauch energieverbrauchsrelevanter Produkte durch Anbringung normierter Etiketten und Beifügung von Produktdatenblättern, Art. 3, 5 Energie-Label-VO. Als Verordnung gelten die Regelungen unmittelbar in jedem Mitgliedstaat und müssen, anders als Richtlinien, nicht in nationales Recht umgesetzt werden. Art. 16, 11 IV, V Energie-Label-VO sehen den Erlass delegierter Rechtsakte durch die Kommission vor, in denen detaillierte Anforderungen an die Etiketten für spezifische Produktgruppen, beispielsweise für Fernsehgeräte oder Waschmaschinen, festgelegt werden. Materielle Effizienzvorgaben für die umweltgerechte Produktgestaltung enthält die Ökodesign-RL. Wie die Energie-Label-VO ermächtigt auch die Ökodesign-RL die Kommission zum Erlass tertiärer Rechtsakte zu einzelnen Produktgruppen, Art. 15 I 2, 19 III Ökodesign-RL.

Nationale Ebene (Deutschland)

Energiewirtschaft und -regulierung

Das deutsche Energiewirtschafts- und -regulierungsrecht wird von der Umsetzung europäischer Vorgaben geprägt. Zentrales Regelwerk ist das Energiewirtschaftsgesetz (Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung vom 7. Juli 2005, BGBl. I S. 1970, 3621, zuletzt geändert durch Art. 84 G vom 10. August 2021, BGBl. I S. 3436 [EnWG]). Zweck des Gesetzes ist gemäß § 1 I EnWG eine möglichst sichere, preisgünstige, verbraucherfreundliche, effiziente und umweltverträgliche leitungsgebundene Versorgung der Allgemeinheit mit Elektrizität und Gas, die zunehmend auf erneuerbaren Energien beruht. Um diesen Zweck zu erreichen, verfolgt das EnWG gemäß § 1 IV EnWG die Ziele, die freie Preisbildung für Elektrizität durch wettbewerbliche Marktmechanismen zu stärken, den Ausgleich von Angebot und Nachfrage nach Elektrizität an den Strommärkten jederzeit zu ermöglichen, Erzeugungsanlagen und Speicherungsanlagen umweltverträglich, netzverträglich, effizient und flexibel einzusetzen sowie den Elektrizitätsbinnenmarkt zu stärken und die Zusammenarbeit mit den angrenzenden Staaten sowie Norwegen und Schweden zu intensivieren.

Zur Sicherstellung eines wirksamen und unverfälschten Wettbewerbs bei der Versorgung mit Elektrizität und Gas und der Sicherung eines langfristig angelegten leistungsfähigen und zuverlässigen Betriebs von Energieversorgungsnetzen werden die Elektrizitäts- und Gasversorgungsnetze reguliert, § 1 II EnWG (zur Regulierung Theobald 2021, § 1 Rn. 33ff.). Bei der

Regulierung übernimmt der Staat nicht die Erfüllungsverantwortung, sondern sorgt durch seine Regulierungsrechtsetzung, eine Regulierungsverwaltung und die Regulierungsstreitbeilegung für die Gewährleistung einer funktionsfähigen Grundversorgung mit Gütern und Dienstleistungen, im EnWG mit Elektrizität und Gas (Stober und Eisenmenger 2019, § 50 Rn. 466).

Ein zentrales Regulierungsinstrument für den Netzbetrieb ist das Genehmigungserfordernis nach § 4 EnWG. Außerdem enthält das EnWG in den §§ 11ff. EnWG zahlreiche Vorgaben für den Netzbetrieb selbst (dazu näher Kühling et. al. 2018, Kap. 2 Rn. 29ff.). Nach § 11 I 1 EnWG sind die Betreiber von Energieversorgungsnetzen verpflichtet, ein sicheres, zuverlässiges und leistungsfähiges Energieversorgungsnetz diskriminierungsfrei zu betreiben, zu warten und bedarfsgerecht zu optimieren, zu verstärken und auszubauen, soweit es wirtschaftlich zumutbar ist. Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) und Fernleitungsnetzbetreiber trifft darüber hinaus die Pflicht, die Energieübertragung durch das Netz unter Berücksichtigung des Austauschs mit anderen Verbundnetzen zu regeln und mit der Bereitstellung und dem Betrieb ihrer Übertragungsnetze im nationalen und internationalen Verbund zu einem sicheren und zuverlässigen Elektrizitäts- und Gasversorgungssystem und damit zu einer sicheren Energieversorgung beizutragen, §§ 12 I, 15 I EnWG. § 17 I EnWG sieht eine allgemeine Anschlusspflicht für Energieversorgungsnetzbetreiber vor, wodurch die Netznutzer einen gesetzlichen Anspruch auf Netzanschluss erhalten, der von den Energieversorgungsnetzbetreibern nur dann verweigert werden darf, wenn ihnen der Anschluss nicht möglich oder nicht zumutbar ist, § 17 II 1 EnWG. § 20 EnWG sichert den diskriminierungsfreien Netzzugang für jedermann (dazu ausführlich Kment 2019, § 13 Rn. 40ff.). Die §§ 36ff. EnWG enthalten Vorgaben für die Energielieferung an Letztverbraucher. Nach § 36 I EnWG müssen Energieversorgungsunternehmen für Netzgebiete, in denen sie die Grundversorgung von Haushaltskunden durchführen, allgemeine Bedingungen und allgemeine Preise für die Versorgung in Niederspannung oder Niederdruck öffentlich bekannt geben und im Internet veröffentlichen. Zu diesen Bedingungen und Preisen müssen sie jeden Haushaltskunden versorgen, sofern das nicht aus wirtschaftlichen Gründen unzumutbar ist, § 36 I 1, 2 EnWG.

Ein wichtiger Akteur der Netzregulierung sind die Regulierungsbehörden von Bund (Bundesnetzagentur, BNetzA) und Ländern. Ihnen kommt die Aufgabe zu, das Agieren der Marktteilnehmer vorausschauend zu steuern (Kment 2019, § 13 Rn. 60). Die BNetzA ist eine selbstständige Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundeswirtschaftsministeriums, § 1 S. 2 BNetzAG (Gesetz über die Bundesagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen vom 7. Juli 2005, BGBl. I S. 1970, 2009, zuletzt geändert durch Art. 3 G vom 16. Juli 2021, BGBl. I S. 3026). Ihre Organisationsstruktur entspricht der einer hochspezialisierten Fachbehörde, die marktbezogenes Wissen generiert und speichert (BVerwGE 130, 39 [49]). Im Energieregulierungsrecht bestehen neben der BNetzA Landesregulierungsbehörden, § 54 f. EnWG. Zur Koordinierung zwischen diesen Regulierungsbehörden wurde nach § 8 BNetzAG bei der BNetzA ein Länderausschuss gebildet, der sich aus Vertretern der für die Wahrnehmung der Aufgaben nach § 54 EnWG zuständigen Landesregulierungsbehörden zusammensetzt (dazu Gärditz 2019, § 4 Rn. 44; Zeidler 2016, Kap. 39 Rn. 36ff.). Die Regulierungsbehörden nehmen unterschiedlichste Aufgaben wahr. So muss

ihnen beispielsweise gemäß § 5 EnWG die erstmalige Aufnahme und Beendigung der Belieferung von Haushaltskunden mit Energie angezeigt werden, sie genehmigen die Entgelte für den Netzzugang nach § 23a EnWG, sie überwachen die Einhaltung zahlreicher Vorschriften, etwa zur Entflechtung nach § 6 I EnWG oder den technischen Vorgaben nach § 19 EnWG. Außerdem obliegt ihnen die Missbrauchsaufsicht nach den §§ 30 f. EnWG.

Auch der Ausbau des Stromleitungsnetzes wird im EnWG geregelt. Nach Maßgabe der §§ 12a ff. EnWG erfolgt eine staatliche Bedarfsplanung. Danach erarbeiten die ÜNB alle zwei Jahre einen Szenariorahmen für die Entwicklung von Stromerzeugung und -bedarf, aus dem ein Netzentwicklungsplan und ein Offshore-Netzentwicklungsplan mit den notwendigen Ausbaumaßnahmen erstellt werden. Daraufhin wird ein Bundesbedarfsplan als Gesetz verabschiedet, durch den die erforderlichen Ausbauprojekte mit Anfangs- und Endpunkten verbindlich festgelegt werden. Die konkrete Trassenfestlegung erfolgt im nach § 43 I Nr. 1 EnWG vorgeschriebenen Planfeststellungsverfahren (zur Bedarfsplanung und dem Planfeststellungsverfahren siehe überblicksartig Kahl und Gärditz 2021, § 6 Rn. 88ff.). Für länderübergreifende und grenzüberschreitende Ausbauprojekte sowie Offshore-Anschlussvorhaben, die im Bundesbedarfsplan besonders ausgewiesen sind, enthält das NABEG (Netzausbaubeschleunigungsgesetz Übertragungsnetz vom 28. Juli 2011, BGBl. I S. 1690, zuletzt geändert durch Art. 4 G vom 25. Februar 2021, BGBl. I S. 298) ein eigenes Planungs- und Genehmigungsregime. Danach werden die bisherigen Raumordnungs- und Planfeststellungsverfahren der Länderbehörden bei der BNetzA zentralisiert, die gemäß § 4 ff. NABEG eine eigene Bundesfachplanung und gemäß §§ 18 ff. NABEG die anschließenden Planfeststellungsverfahren durchführt (zum NABEG siehe Kahl und Gärditz 2021, § 6 Rn. 91ff.).

Umweltenergie

Daneben bildete sich in Deutschland in den 1990er-Jahren eine eigenständige Umweltenergiepolitik beziehungsweise ein eigenständiges Umweltenergierecht als Teilgebiet von Umweltpolitik und -recht heraus. Die Umweltenergiepolitik war zunächst vor allem auf die *Förderung des Ausbaus Erneuerbarer Energien im Stromsektor* gerichtet (Stromeinspeisegesetz – StromEinspG – 1990; Erneuerbare Energien Gesetz – EEG – 2000, neugefasst zunächst als EEG 2017 vom 21. Juli 2014, BGBl. I S. 1066, mittlerweile neugefasst als EEG 2021, zuletzt geändert durch Art. 11 G vom 16. Juli 2021, BGBl. I S. 3026), seit 2011 ist sie geprägt von dem übergreifenden „Mega-Ziel“ der oben bereits erwähnten (Abschnitt 2.5.) *Energiewende* (BMWi 2011), deren Säulen neben der Förderung der „Erneuerbaren“ (ausführlich zu diesem Aspekt Steffens 2019, 157ff.) vor allem der *Atomausstieg* (13. Gesetz zur Änderung des Atomgesetzes – sog. 13. AtG-Novelle) und der *Kohleausstieg* (Kohleausstiegsgesetz vom 8. August 2020, BGBl. I S. 1818, zuletzt geändert durch Art. 13 G vom 16. Juli 2021, BGBl. I S. 3026) sind. Zu dem damit bezweckten Ziel der Reduktion der Treibhausgasemissionen gibt seit seinem Inkrafttreten im Jahr 2019 das Bundes-Klimaschutzgesetz (Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019, BGBl. I S. 2513, geändert durch Art. 1 G vom 18. August 2021, BGBl. I S. 3905) Ziele vor, die Deutschland zur Klimaneutralität führen sollen (siehe zu Zielen und Maßnahmen des Klimaschutzgesetzes Kahl und Gärditz 2021, § 6 Rn. 19ff.; Frenz 2021, 233ff.). In seiner wegweisenden und viel beachteten Entscheidung vom

24. März 2021 (BVerfG, Beschluss vom 24. März 2021 – 1 BvR 2656/18, BVerfGE 157, 30) stellte das Bundesverfassungsgericht jedoch fest, dass die im Bundes-Klimaschutzgesetz vorgesehenen Reduktionsziele für 2030 insofern nicht ausreichend seien, als dadurch nach 2030 erhebliche Reduktionen bevorstünden, um den Übergang zur aus Art. 20a GG folgenden Klimaneutralität noch zu gewährleisten. Durch die Verlagerung der wesentlichen Treibhausgasemissionsminderungslast auf den Zeitraum nach 2030 und der damit einhergehenden eingriffsähnlichen Vorwirkung seien im Ergebnis bereits jetzt die Freiheitsrechte künftiger Generationen gefährdet (Grundrechte als intertemporale Freiheitssicherung; vgl. dazu Kahl 2022, 2ff.; Lorenzen 2021, 485ff.).

Hinsichtlich des Atomausstiegs sieht § 7 Ia AtG seit 2011 ein gestaffeltes Erlöschen der Betriebsberechtigung aller deutschen Kernkraftwerke vor, sofern sie nicht zuvor die ihnen zugeteilte Reststrommenge erreicht haben. Danach waren acht Kernkraftwerke direkt mit Inkrafttreten der 13. AtG-Novelle (6. August 2011) abzuschalten. Für die übrigen neun Kraftwerke erlosch die Betriebserlaubnis gestaffelt in den darauffolgenden Jahren, die letzten drei Erlaubnisse erlöschen mit Ablauf des 31. Dezember 2022. Der beschleunigte Atomausstieg wurde vom Bundverfassungsgericht am 6. Dezember 2016 für im Wesentlichen verfassungsgemäß erklärt (BVerfGE 143, 246). Zwar wird durch das Gesetz mehrfach in das Eigentum der betroffenen Anlagenbetreiber eingegriffen, allerdings ist die Streichung der noch kurz zuvor durch die 11. AtG-Novelle zusätzlich gewährten Reststrommengen verhältnismäßig. Unverhältnismäßig ist nach dem Bundesverfassungsgericht lediglich das Fehlen einer Ausgleichsregelung für frustrierte Investitionen, die die Anlagenbetreiber in Vertrauen auf die zusätzlichen Reststrommengen getätigt haben. Sofern wegen der festen Abschalttermine einigen Konzernen ungenutzte Reststrommengen, die bereits 2002 gewährt wurden, verbleiben, ist auch diese Regelung unverhältnismäßig. Im Übrigen ist der Eingriff aber grundgesetzkonform (ausführlich Näser 2021, Vorbemerkungen Rn. 207ff.).

Neben dem Atomausstieg bis 2022 strebt Deutschland einen Kohleausstieg bis 2038 an (zum Ganzen Kahl und Gärditz 2021, § 6 Rn. 109ff.; Ludwigs 2022, Einf. A. Rn. 105, 160ff.). 2018 hatte die Bundesregierung die Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“ (sog. „Kohlekommission“) eingesetzt, die aus unterschiedlichen Akteuren aus Politik, Wirtschaft, Umweltverbänden, Gewerkschaften sowie Ländern und Regionen bestand und einen Plan zur schrittweisen Reduzierung und Beendigung der Kohleverstromung erarbeiten sollte. Die Kohlekommission empfahl in ihrem Abschlussbericht vom Januar 2019 das Ende der Kohleverstromung in Deutschland bis 2038 und zeigte auf, wie der wirtschaftliche Strukturwandel in den betroffenen Regionen gelingen kann (BMWi 2020a). Aufbauend auf den Empfehlungen der Kohlekommission erarbeitete die Bundesregierung einen Gesetzentwurf, der Regelungen zur Reduzierung und Beendigung der Stein- und Braunkohleverstromung, zur Löschung freiwerdender CO₂-Zertifikate, zur Kompensation für Stromverbraucher im Fall eines Strompreisanstiegs durch den Kohleausstieg, zur Zahlung eines Anpassungsgeldes an ältere Beschäftigte im Kohlesektor sowie Regelungen, um die Umrüstung von Kohle auf flexible und klimafreundlichere Stromerzeugung zu fördern, enthält (BMWi 2020b). Am 8. August 2020 wurde daraufhin das Kohleausstiegsgesetz verabschiedet (siehe zum Ganzen sowie insbesondere zum KVBG Stürmlinger und Fuchs 2021, 320ff.). Dessen Herzstück ist

das Kohleverstromungsbeendigungsgesetz (Gesetz zur Reduzierung und zur Beendigung der Kohleverstromung [KVBG] vom 8. August 2020, BGBl. I S. 1818, zuletzt geändert durch Art. 13 G vom 16. Juli 2021, BGBl. I S. 3026). Es sieht eine Reduktion der Kohleverstromung auf je 15 GW Stein- und Braunkohle bis 2022, auf 8 GW Steinkohle und 9 GW Braunkohle bis 2030 und auf je 0 GW bis spätestens 2038 vor, § 2 II Nr. 1-3 KVBG. Um diese Reduktionen zu erreichen, kennt das KVBG verschiedene Instrumente (dazu näher Stürmlinger und Fuchs 2021, 320ff.; Frenz 2021, 144ff.). Die Reduzierung der Steinkohle erfolgt über Ausschreibungen nach Teil 3 KVBG, in denen sich die Anlagenbetreiber um die Stilllegung ihrer Anlage gegen Zahlung eines Steinkohlezuschlags in von ihnen selbst festzulegender Höhe bewerben, sowie über die Anordnung der gesetzlichen Reduzierung nach Teil 4 KVBG. Die Reduktion der Braunkohleanlagen wird in Teil 5 KVBG geregelt. Die Stilllegungszeitpunkte der Braunkohleanlagen werden in Anlage 2 KVBG für jede einzelne Anlage festgelegt. Bis 2029 erhalten die Braunkohleanlagenbetreiber RWE Power AG und Lausitz Energie Kraftwerk AG gemäß § 44 I 1 KVBG für die Stilllegungen Entschädigungszahlungen in Höhe von 2,6 Milliarden Euro beziehungsweise 1,75 Milliarden Euro. Der Kohleausstieg wirft vielfältige Rechtsfragen auf. Die Vorgabe verbindlicher Stilllegungszeitpunkte stellt einen Eingriff in die Eigentumsfreiheit der Anlagenbetreiber aus Art. 14 I 2 GG dar, der aber aufgrund der Entschädigungszahlungen gerechtfertigt ist (dazu Kahl 2021, 471ff.). Aus unionsrechtlicher Sicht sind insbesondere die Vereinbarkeit der Entschädigungszahlungen an die Kraftwerksbetreiber und der Ausgleichsleistungen für steigende Stromkosten mit dem Beihilfenrecht problematisch (dazu Kahl 2020; Ludwigs 2022, Einl. A. Rn. 63).

Neben dem Atom- und dem Kohleausstieg ist der Ausbau der erneuerbaren Energien entscheidend für die Verwirklichung der Energiewende. Dieser basiert vor allem auf dem EEG 2017 (näher zu den Zielen des EEG Greb und Boewe 2018, § 1 Rn. 5ff.; Schneider 2013, § 21 Rn. 38ff.; Strauch 2020, § 1 Rn. 4ff., 11ff. Siehe zur Neufassung des EEG 2021 Scholtka und Fritzen 2021, 908), dem Gebäudeenergiegesetz (Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden [GEG] vom 8. August 2020, BGBl. I S. 1728) beziehungsweise dessen am 1. November 2020 außer Kraft getretenen Vorgängergesetz Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG 2005 vom 7. August 2008, BGBl. I S. 1658), sowie dem Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz (Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung [KWKG 2015] vom 21. Dezember 2015, BGBl. I S. 2498, zuletzt geändert durch Art. 88 G vom 10. August 2021, BGBl. I S. 3436. Siehe zu den Neuerungen im KWKG Ludwigs 2022, Einl. A. Rn. 127; Scholtka und Fritzen 2021, 908).

Daneben kann eine effiziente Energieverwendung durch Verminderung des Energiebedarfs einen wichtigen Beitrag zur Energiewende leisten. Dazu gehören hohe energetische Wirkungsgrade, die Einschränkung von Energieverlusten sowie die Nutzung der Energie als „Abfallprodukt“ (z. B. der Abwärme bei der Stromerzeugung). In Deutschland gibt es für das Energieeffizienzrecht kein eigenes Gesetz, stattdessen finden sich zahlreiche Regelungen in unterschiedlichen Gesetzen, etwa Ansätze zur Verbesserung der Effizienz im Bereich der Primärenergie nach dem KWKG (dazu Schneider 2013, § 21 Rn. 159ff.) oder gesetzliche Verbrauchskennzeichnungsvorschriften über die effiziente Nutzung der Endenergie nach dem

Energieverbrauchskennzeichnungsgesetz (Gesetz zur Kennzeichnung von energieverbrauchsrelevanten Produkten, Kraftfahrzeugen und Reifen mit Angaben über den Verbrauch an Energie und an anderen wichtigen Ressourcen [EnVKG] vom 10. Mai 2012, BGBl. I S. 1070, zuletzt geändert durch Art. 10a G. vom 16. Juli 2021, BGBl. I S. 3026). Maßgeblich ist daneben aber etwa auch das Subventionsrecht; so gibt es staatliche Beihilfen für sparsame oder effiziente Energietechnologie, wie zum Beispiel für Elektrofahrzeuge nach dem Elektromobilitätsgesetz (Gesetz zur Bevorrechtigung der Verwendung elektrisch betriebener Fahrzeuge [EmoG] vom 5. Juni 2015, BGBl. I S. 898, zuletzt geändert durch Art. 5 G vom 12. Juli 2021, BGBl. I S. 3091).

Auch die deutschen Bundesländer und Gemeinden können sich im Rahmen ihrer jeweiligen Kompetenzen vor allem durch ambitionierte Gesetzesprogramme (z. B. Landesklimaschutzgesetze, Gesetze zur Verwendung erneuerbarer Energien im Bestandsgebäudesektor) oder bei der Planung im Raumordnungs- und Baurecht (umwelt)energiepolitisch engagieren und tun dies erfreulicherweise auch in vielfältiger Form (näher dazu Kahl und Schmidtchen 2013, 141ff.).

Literaturverzeichnis

- AGEB (AG Energiebilanzen). 2019. „Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland: Daten für die Jahre von 1990 bis 2018.“ Zugriff am 5. Oktober 2021. https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=awt_2018_d.pdf.
- Baeyer, Hans Christian von. 1998. *Maxwell's Demon: Why Warmth Disperse and Time Passes*. New York: Random House.
- BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie). 2011. „Der Weg zur Energie der Zukunft: sicher, bezahlbar und umweltfreundlich.“ Zugriff am 24. Mai 2020. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiekonzept-2010-beschluesse-juni-2011.pdf?__blob=publicationFile&v=1.
- BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie). 2019. *Energieeffizienz in Zahlen: Entwicklungen und Trends in Deutschland 2019*. Zugriff am 24. Februar 2020. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen-2019.pdf?__blob=publicationFile&v=72.
- BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie). 2020a. „Kohleausstieg und Strukturwandel.“ Zugriff am 18. Mai 2020. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Wirtschaft/kohleausstieg-und-strukturwandel.html>.
- BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie). 2020b. „Kabinetts beschließt Kohleausstiegsgesetz.“ Zugriff am 18. Mai 2020. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2020/20200129-kabinetts-beschliesst-kohleausstiegsgesetz.html>.
- BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie). 2021. „Geothermie.“ Zugriff am 5. Oktober 2021. <https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Technologien/Geothermie/geothermie.html>.
- Bogdanov, Dimitrii, Javier Farfan, Kristina Sadovskaia, Arman Aghahosseini, Michael Child, Ashish Gulagi, Ayobami S. Oyewo, Larissa de Souza, Noel Simas Barbosa und Christian Breyer. 2019. „Radical Transformation Pathway Towards Sustainable Electricity via Evolutionary Steps.“ *Nature Communications* 10, Art. Nr. 1077. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08855-1>.
- BP (British Petroleum). 2019. *BP Statistical Review of World Energy 2019*. 68. Ausgabe. Zugriff am 5. Oktober 2021. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>.
- Carnot, Sadi. 1892. *Betrachtungen über die bewegende Kraft des Feuers und die zur Entwicklung dieser Kraft geeigneten Maschinen*. Übersetzt und herausgegeben von Wilhelm Ostwald. Leipzig: Wilhelm Engelmann Verlag. Französische Erstveröffentlichung 1824.
- Däuper, Olaf. 2009. „Aller guten Dinge sind drei? Die Weiterentwicklung des energiewirtschaftlichen Regulierungsrahmens durch das dritte EG-Energiepaket.“ *Netzwirtschaften & Recht (N & R)* 18, Nr. 4: 214–22.

- Deppe, Tristan, und Jeremy N. Munday. 2019. „Nighttime Photovoltaic Cells: Electrical Power Generation by Optically Coupling with Deep Space.“ *ACS Photonics* 7: 1–9. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.9b00679>.
- Dinger, Florian, Tobias Tröndle und Ulrich Platt. 2013. „Optimization of the Energy Output of Osmotic Power Plants.“ *Journal of Renewable Energy* 2013, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2013/496768>.
- Düren, Michael. 2017. *Understanding the Bigger Energy Picture: DESERTEC and Beyond*. Springer Briefs in Energy, Cham: Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-57966-5>.
- EUROfusion (Europäisches Konsortium zur Entwicklung der Fusionsenergie). 2020. Zugriff am 26. Februar 2020. <https://www.euro-fusion.org/de/>.
- Europäische Union. 2020. „Energiecharta und Protokoll.“ *EUR-Lex*. Zugriff am 11. Juli 2021. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=LEGISSUM%3A127028>.
- Fraunhofer ISE (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme). 2019. „Energy-Charts.“ Zugriff am 24. Februar 2020. https://energy-charts.de/energy_pie_de.htm?year=2019.
- Frenz, Walter (Hrsg.). 2021. *Klimaschutzrecht: Kommentar*. Berlin: Erich Schmidt Verlag.
- Friedlingstein, Pierre, Matthew W. Jones, Michael O’Sullivan, Robbie M. Andrew, Judith Hauck, Glen P. Peters, Wouter Peters, Julia Pongratz, Stephen Sitch, Corinne Le Quéré, Dorothee C. E. Bakker, Josep G. Canadell, Philippe Ciais, Robert B. Jackson, Peter Athoni, Leticia Barbero, Ana Bastos, Vladislav Bastrikov, Meike Becker, Laurent Bopp, Erik Buitenhuis, Naveen Chandra, Frédéric Chevallier, Louise P. Chini, Kim I. Currie, Richard A. Feely, Marion Gehlen, Dennis Gilfillan, Thanos Gkritzalis, Daniel S. Goll, Nicolas Gruber, Sören Gutekunst, Ian Harris, Vanessa Haverd, Richard A. Houghton, George Hurtt, Tatiana Ilyina, Atul K. Jain, Emilie Joetzjer, Jed O. Kaplan, Etsushi Kato, Kees Klein Goldewijk, Jan Ivar Korsbakken, Peter Landschützer, Siv K. Lauvset, Nathalie Lefèvre, Andrew Lenton, Sebastian Lienert, Danica Lombardozzi, Gregg Marland, Patrick C. McGuire, Joe R. Melton, Nicolas Metzl, David R. Munro, Julia E. M. S. Nabel, Shin-Ichiro Nakaoka, Craig Neill, Abdirahman M. Omar, Tsuneo Ono, Anna Peregón, Denis Pierrot, Benjamin Poulter, Gregor Rehder, Laure Resplandy, Eddy Robertson, Christian Rödenbeck, Roland Séférian, Jörg Schwinger, Naomi Smith, Pieter P. Tans, Hanqin Tian, Bronte Tilbrook, Francesco N. Tubiello, Guido R. van der Werf, Andrew J. Wiltshire und Sönke Zaehle. 2019. „Global Carbon Budget 2019.“ *Earth System Science Data* 11: 1783–1838. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1783-2019>.
- Gärditz, Klaus F. 2019. „Die Organisation der Wirtschaftsverwaltung.“ In *Kompendium Öffentliches Wirtschaftsrecht*, herausgegeben von Reiner Schmidt und Ferdinand Wolenschläger, 173–210. 5. Auflage, Berlin: Springer. Erstveröffentlichung 1998.
- Gammel, Cerstin. 2012. „EU-Staaten fordern Subventionen für Atomkraft.“ *Süddeutsche Zeitung*, 13. April. Zugriff am 1. Juli 2021. <https://www.sueddeutsche.de/politik/konkurrenz-zu-erneuerbaren-energien-eu-staaten-fordern-subventionen-fuer-atomkraft-1.1331385>.

- Gemmer, Christian. 2017. *Die Energieaußenhandelspolitik der Europäischen Union*. Augsburger Studien zum internationalen Recht, Band 19. Frankfurt am Main: PL Academic Research.
- Greb, Klaus, und Marius Boewe. 2018. „Kommentierung zu § 1 EEG.“ In *Erneuerbare-Energien-Gesetz*, herausgegeben von Klaus Greb und Marius Boewe. München 2018: C. H. Beck.
- Gundel, Jörg, und Knut Werner Lange (Hrsg.). 2011. *Die Umsetzung des 3. Energiebinnenmarktpakets: Tagungsband der 2. Bayreuther Energierechtstage 2011*. Tübingen: Mohr Siebeck.
- Gundel, Jörg. 2018. „Die Bedeutung des Energiecharta-Vertrages.“ In *Berliner Kommentar zum Energierecht Band 1: Energiewirtschaftsrecht, Energieplanungsrecht, Energiesicherungsgesetz*, herausgegeben von Franz J. Säcker, 138–65. 4. Auflage, Frankfurt am Main: Fachmedien Recht und Wirtschaft, dfv Mediengruppe. Erstveröffentlichung 2004.
- Gundel, Jörg, und Julius Buckler. 2020. „Das europäische Energierecht nach dem Erlass des Clean energy package: Eine gelungene Synthese von EU-Klimaschutz- und EU-Binnenmarktrecht?“ *Gewerbearchiv* 66: 41–48.
- Hansen Kenneth, Christian Breyer und Henrik Lund. 2019. „Status and Perspectives on 100 % Renewable Energy Systems.“ *Energy* 175: 471–80. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.092>.
- Harari, Yuval Noah. 2014. *Eine kurze Geschichte der Menschheit*. Übersetzt von Jürgen Neubauer. 3. Auflage, München: Deutsche Verlags-Anstalt. Hebräische Erstveröffentlichung 2011.
- Helfer, Fernanda, Charles Lemckert und Yuri Anissimov. 2014. „Osmotic Power with Pressure Retarded Osmosis: Theory, Performance and Trends; A Review.“ *Journal of Membrane Science* 453: 337–58. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.10.053>.
- Holler, Christian, und Joachim Gaukel. 2017. *Erneuerbare Energien: Ohne Heiße Luft*. Cambridge: UIT.
- IAEA-PRIS (International Atomic Energy Agency, Power Reactor Information System). 2020. „Germany.“ Zugriff am 7. Juli 2021. <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=DE>.
- IEA (International Energy Agency). 2021. „History: From Oil Security to Steering the World Toward Secure and Sustainable Energy Transitions.“ Zugriff am 11. Juli 2021. <https://www.iea.org/about/history>.
- Jacobson, Mark Z., und Christina L. Archer. 2012. „Saturation Wind Power Potential. And Its Implications for Wind Energy.“ *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 109, Nr. 39: 15679–84. <https://doi.org/10.1073/pnas.1208993109>.
- Kahl, Wolfgang. 2009. „Die Kompetenzen der EU in der Energiepolitik nach Lissabon.“ *Europarecht* 44, Nr. 9: 601–21.
- Kahl, Wolfgang. 2010. „Einführung in das Umweltenergie recht.“ *Juristische Schulung (JuS)* 50, Nr. 7: 599–604.

- Kahl, Wolfgang. 2018. „Kommentierung zu Art. 192 AEUV.“ In *EUV/AEUV: Vertrag über die Europäische Union, Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union, Charta der Grundrechte der Europäischen Union*, herausgegeben von Rudolf Streinz. Beck'sche Kurz-Kommentare, Band 57. 3. Auflage, München: C. H. Beck. Erstveröffentlichung 2003.
- Kahl, Wolfgang. 2020. „Kohleausstieg und EU-Recht.“ *Europäisches Umwelt- und Planungsrecht (EurUP)* 18, Nr. 3: 305–16.
- Kahl, Wolfgang. 2021. „Kohleausstieg und Eigentumsfreiheit.“ In *Festschrift für Werner F. Ebke zum 70. Geburtstag*, herausgegeben von Oliver Fehrenbacher, Boris Paal und Doerte Poelzig, 471–83. München: C. H. Beck.
- Kahl, Wolfgang. 2022. „Der Klimabeschluss des Bundesverfassungsgerichts. Zwischen tradierter Schutzpflichtendogmatik und innovativer Abwehrrechtsdogmatik.“ *Europäisches Umwelt- und Planungsrecht (EurUP)* 20, Nr. 1: 2–19.
- Kahl, Wolfgang, und Klaus F. Gärditz. 2021. *Umweltrecht*. JuS-Schriftenreihe, Band 98. 12. Auflage, München: C. H. Beck.
- Kahl, Wolfgang, und Marcus Schmidtchen. 2013. *Kommunaler Klimaschutz durch Erneuerbare Energien*. Tübingen: Mohr Siebeck.
- Klaus, Thomas, Carla Vollmer, Kathrin Werne, Harry Lehmann und Klaus Müschen. 2010. *Energieziel 2050: 100 % Strom aus erneuerbaren Quellen*, herausgegeben vom Umweltbundesamt. Zugriff am 6. Februar 2020. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/energieziel_2050.pdf.
- Kleidon, Axel. 2012. „Was leistet die Erde? Thermodynamik des Erdsystems.“ *Physik in unserer Zeit* 43.3: 136–44. <http://doi.org/10.1002/piuz.201201294>.
- Kment, Martin. 2019. „§ 13 Energierecht.“ In *Kompendium Öffentliches Wirtschaftsrecht*, herausgegeben von Reiner Schmidt und Ferdinand Wollenschläger, 641–96. 5. Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer. Erstveröffentlichung 1998.
- König, Carsten. 2019. „Völker- und EU-rechtliche Grundlagen des Emissionshandels.“ In *Berliner Kommentar zum Energierecht Band 2: Energieumweltrecht, Energieeffizienzrecht, Energieanlagenrecht*, herausgegeben von Franz Jürgen Säcker und Markus Ludwigs, 249–79. 4. Auflage, Frankfurt: dfv Mediengruppe. Erstveröffentlichung 2004.
- Kühling, Jürgen, Winfried Rasbach und Claudia Busch. 2018. *Energierecht*. 4. Auflage, Baden-Baden: Nomos. Erstveröffentlichung 2006.
- Lorenzen, Jacqueline. 2021. „Staatsziel Umweltschutz, grundrechtliche Schutzpflichten und intertemporaler Freiheitsschutz in Zeiten der Klimakrise. Zugleich eine Besprechung der Entscheidung des BVerfG vom 24.03.2021 – 1 BvR 2656/18, 1 BvR 78/20, 1 BvR 96/20, 1 BvR 288/20 –.“ *Verwaltungsblätter für Baden-Württemberg (VBIBW)* 42, Nr. 12: 485–94.
- Lorenzen, Jacqueline. 2022. „Nachhaltige Kernenergie? – Eine rechtliche Einordnung der Kommissionsinitiative zu ‚grünen‘ Investitionen in Kernkraft.“ *Rechtszeitschrift für nachhaltige Unternehmensführung (ESG)* 1, Nr. 1: 12–7.

- Löschel, Andreas, Dirk Rübberke, Wolfgang Ströbele, Wolfgang Pfaffenberger und Michael Heuterkes. 2020. *Energiewirtschaft, Einführung in Theorie und Politik*. 4. Auflage, Oldenburg: DeGruyter. Erstveröffentlichung 1998.
- Ludwigs, Markus. 2020. „§ 5 Europäisches Energierecht.“ In *Europäisches sektorales Wirtschaftsrecht*, herausgegeben von Matthias Ruffert, 219–362. Band 5 von *Enzyklopädie Europarecht*. 2. Auflage, Baden-Baden: Nomos. Erstveröffentlichung 2013.
- Ludwigs, Markus. 2022. „Grundstrukturen des Energieumweltrechts.“ In *Berliner Kommentar zum Energierecht Band 3: Energieumwelt- und Energieeffizienzrecht, Energieanlagenrecht*, herausgegeben von Franz Jürgen Säcker und Markus Ludwigs, 1–136. 5. Auflage (im Erscheinen), Frankfurt: dfv Mediengruppe.
- MacKay, David J.C. 2009. *Sustainable Energy: Without the Hot Air*. Cambridge: UIT Cambridge Ltd.
- Meschede, Dieter. 2015. *Gerthsen Physik*. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.
- Näser, Hanns. 2021. „Kommentierung zum Atomgesetz.“ In *Energierecht*, herausgegeben von Christian Theobald und Jürgen Kühling. 80–88. 112. EL Stand Juni 2021. München: C. H. Beck.
- NOAA (National Oceanic & Atmospheric Administration). 2020. „Trends in Atmospheric Carbon Dioxide.“ Zugriff am 30. August 2020. <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>.
- Pause, Fabian. 2019. „Saubere Energie für alle Europäer: Was bringt das Legislativpaket der EU?“ *Zeitschrift für Umweltrecht* 30, Nr. 7/8: 387–96.
- Planck, Max. 1887. *Das Princip von der Erhaltung der Energie*. Leipzig: B.G. Teubner.
- Pritzsche, Kai Uwe, und Vivien Vacha. 2017. *Energierecht*. München: C. H. Beck.
- Ram, Manish, Dimitrii Bogdanov, Arman Aghahosseini, Ashish Gulagi, Ayobami S. Oyewo, Michael Child, Upeksha Caldera, Kristina Sadovskaia, Francisco J. Farfan Orozco, Larissa De Souza Noel Simas Barbosa, Mahdi Fasihi, Siavash Khalili, Bernhard Dahlheimer, Georg Gruber, Thure Traber, Felix De Caluwe, Hans-Josef Fell und Christian Breyer. 2019. *Global Energy System Based on 100 % Renewable Energy: Power, Heat, Transport and Desalination Sectors*, herausgegeben von Lappeenranta University of Technology und Energy Watch Group. Zugriff am 31. März 2021. http://www.energywatchgroup.org/wp-content/uploads/EWG_LUT_100RE_All_Sectors_Global_Report_2019.pdf.
- Redgwell, Catherine. 2007. „International Regulation of Energy Activities.“ In *Energy Law in Europe: National, EU and International Regulation*, herausgegeben von Martha Roggenkamp et al. 13–144. 2. Auflage, Oxford: Oxford University Press. Erstauflage 2001.
- Ren 21 (Renewable Energy Policy Network). 2019. *Renewables 2019: Global Status Report*. Zugriff am 20. Mai 2020. https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2019_full_report_en.pdf.
- Roggenkamp, Martha, Anita Rønne, Catherine Redgwell und Iñigo del Guayo. 2016. *Energy Law in Europe: National, EU and International Regulation*. 3. Auflage, Oxford: Oxford University Press. Erstveröffentlichung 2001.

- Schneider, Jens-Peter. 2013. „§ 21. Energieumweltrecht: Erneuerbare Energien, Kraft-Wärme-Kopplung, Energieeinsparung.“ In *Recht der Energiewirtschaft*, herausgegeben von Jens-Peter Schneider und Christian Theobald. 4. Auflage, München: C. H. Beck. Erstveröffentlichung 2003.
- Scholtka, Boris, und Laurenz Keller-Herder. 2019. „Die Entwicklung des Energierechts im Jahr 2018.“ *Neue Juristische Wochenschrift (NJW)* 2019: 897–910.
- Scholtka, Boris, und Laurenz Keller-Herder. 2020. „Die Entwicklung des Energierechts im Jahr 2019.“ *Neue Juristische Wochenschrift (NJW)* 2020, 890–94.
- Scholtka, Boris, und Friederike Frizen. 2021. „Die Entwicklung des Energierechts im Jahr 2020.“ *Neue Juristische Wochenschrift (NJW)* 2021, 906–10.
- Schreiber, Kristina. 2009. „Die Änderungen des Gemeinschaftsrechtsrahmens für den Energiesektor im Überblick: Das dritte Legislativpaket.“ In *Netzwirtschaften & Recht (N & R)* 3/2009, 154–58.
- Steffens, Juliane. 2019. „Förderung erneuerbarer Energien.“ In *Berliner Kommentar zum Energierecht Band 2: Energieumweltrecht, Energieeffizienzrecht, Energieanlagenrecht*, herausgegeben von Franz Jürgen Säcker und Markus Ludwigs, 146–247. 4. Auflage, Frankfurt: dfv Mediengruppe. Erstveröffentlichung 2004.
- Stober, Rolf, und Sven Eisenmenger. 2019. *Öffentliches Wirtschaftsrecht – Besonderer Teil: gewerberechtliche Grundlagen, spezielles Branchenrecht und branchenübergreifende Querschnittsmaterien*. 17. Auflage, Stuttgart: Kohlhammer. Erstveröffentlichung 1976. (unter dem Titel „Wirtschaftsverwaltungsrecht“ von Rolf Stober)
- Strauch, Boris. 2020. „Kommentierung zu § 1 EEG.“ In *EEG Handkommentar*, herausgegeben von Toralf Baumann, Andreas Gabler und Reinald Günther. Baden-Baden: Nomos.
- Stürmlinger, Marie-Christin, und Severin Fuchs. 2021. „Der Kohleausstieg: Gesetzliche Ausgestaltung und Perspektiven.“ *Natur und Recht (NuR)* 43, Nr. 5: 320–27. <https://doi.org/10.1007/s10357-021-3826-2>.
- Theobald, Christian. 2021. „Kommentierung zu § 1 EnWG.“ In *Energierecht*, herausgegeben von Christian Theobald und Jürgen Kühling. 112. EL Juni 2021. München: C. H. Beck.
- Tröndle, Tobias, Ulrich Platt, Werner Aeschbach-Hertig und Klaus Pfeilsticker. 2012. „Erneuerbare Energie für Europa, Europas Stromversorgung mit Speicherbedarf bis 2050.“ *Physik in unserer Zeit* 6, Nr. 43: 300–6. <https://doi.org/10.1002/piuz.201201301>.
- Umweltbundesamt. 2019. „Bilanz 2019: Erstmals mehr Strom aus erneuerbaren Energien als aus Kohle.“ *Pressemitteilung*. Zugriff am 31. März 2021. <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/bilanz-2019-erstmal-mehr-strom-aus-erneuerbaren>.
- Wagner, Friedrich. 2016. „Surplus from and Storage of Electricity Generated by Intermittent Sources.“ *The European Physical Journal / Plus* 131, Nr. 445: 1–21. <https://doi.org/10.1140/epjp/i2016-16445-3>.

- Winkler, Daniela, Max Baumgart und Thomas Ackermann. 2021. *Europäisches Energierecht*. Baden-Baden: Nomos.
- Zeidler, Anne Christine. 2016. „Kapitel 39: Die Bundesnetzagentur.“ In *Regulierung in der Energiewirtschaft: Ein Praxishandbuch*, herausgegeben von Jürgen F. Baur, Peter Salje und Matthias Schmidt-Preuß, 501–9. 2. Auflage, Köln: Carl Heymanns. Erstveröffentlichung 2011.

Bildnachweis

Abb. 1: Autoren

Abb. 2: gemeinfrei

Abb. 3: Autoren

Abb. 4: Kleidon 2012

Abb. 5: BP 2019

Abb. 6: BP 2019

Abb. 7: Tröndle et al. 2012

Abb. 8: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen 09/2019

Abb. 9: BMWi 2019