

Erneuerbare Energien

Teil 1 und 2

Möglichkeit der dauerhaften Energieversorgung &
Erneuerbare Energien im Netz

Ausgabe 1.0, 24.03.2024
Autor: Stephan Rupp

Kontakt: stephan.rupp@srupp.de
Web: <https://www.srupp.de>

Veröffentlicht unter [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Inhaltsverzeichnis

1. Möglichkeiten der dauerhaften Energieversorgung.....	5
1.1. Energievorräte und Verfügbarkeit.....	5
1.2. Energiehaushalt der Erde.....	6
1.3. Kreislaufprozesse.....	7
1.4. Zeitraum der fossilen Industrialisierung.....	9
1.5. Energieträger weltweit.....	10
1.6. Primärenergie und Nutzenergie.....	11
1.7. Szenarien für die Energiewende.....	13
1.8. Konsequenzen für die Stromnetze.....	14
2. Klimawandel und Energiewende.....	16
2.1. Energiebedarf nach Energiequellen.....	16
2.2. Fahrplan für die Energiewende.....	18
2.3. Entwicklung der Elektrizität weltweit.....	20
2.4. Energiebilanz Mineralöl.....	22
2.5. Kraftstoffe für die Elektromobilität.....	24
2.6. Stahl, Beton und Aluminium.....	25
2.7. Kohle und Erdgas.....	28
2.8. Wasserstoff.....	28
3. Einführung in die Stromnetze.....	31
3.1. Stromnetze als Schlüssel zur Energiewende.....	31
3.2. Lastfluss im Netz.....	33
3.3. Gleichstrom und Wechselstrom.....	36
3.4. Qualität von Strom und Spannung.....	40
4. Netze zur elektrischen Energieversorgung.....	44
4.1. Aufbau der Netze.....	44
4.2. Leistungsbedarf im Tagesverlauf.....	45
4.3. Übertragungsnetz.....	46
4.4. Photovoltaik.....	47
4.5. Windkraft.....	48
4.6. Netzentwicklungsplan Strom.....	49
4.7. Anlagen am Netz.....	52
4.8. Leistungsregelung.....	55
4.9. Ausbau der Netze im Zuge der Energiewende.....	57
4.10. Inselnetz mit Stromspeicher.....	58
5. Speicherung elektrischer Energie.....	60
5.1. Pumpspeicher.....	60
5.2. Druckluftspeicher.....	61

5.3. Schwungmassen.....	61
5.4. Wärmespeicher.....	62
5.5. Batteriespeicher.....	62
5.6. Brennstoffzellen.....	63
6. Stoffkreisläufe.....	64
6.1. Fossile und nukleare Brennstoffe.....	64
6.2. CO ₂ -Kreislauf.....	65
6.3. Wirkungsgrade.....	67
6.4. Energiebilanzen.....	69
6.5. Photosynthese und Biomasse.....	70
6.6. Synthetische Kraftstoffe.....	71
7. Strommarkt.....	76
7.1. Investitionsrechnung.....	76
7.2. Stromgestehungskosten.....	77
7.3. Stromhandel.....	79
7.4. Kapazitäten und Flexibilitäten.....	81
8. Klausuraufgaben.....	83
8.1. Windenergie in Europa.....	83
8.2. Solarausbau weltweit.....	85
8.3. Windpark.....	88
8.4. Wasserstoffspeicher.....	90
8.5. Strommarkt.....	93
8.6. Brennstoffe.....	97
8.7. Flächenertrag erneuerbarer Erzeuger.....	99
8.8. Energiespeicher.....	100

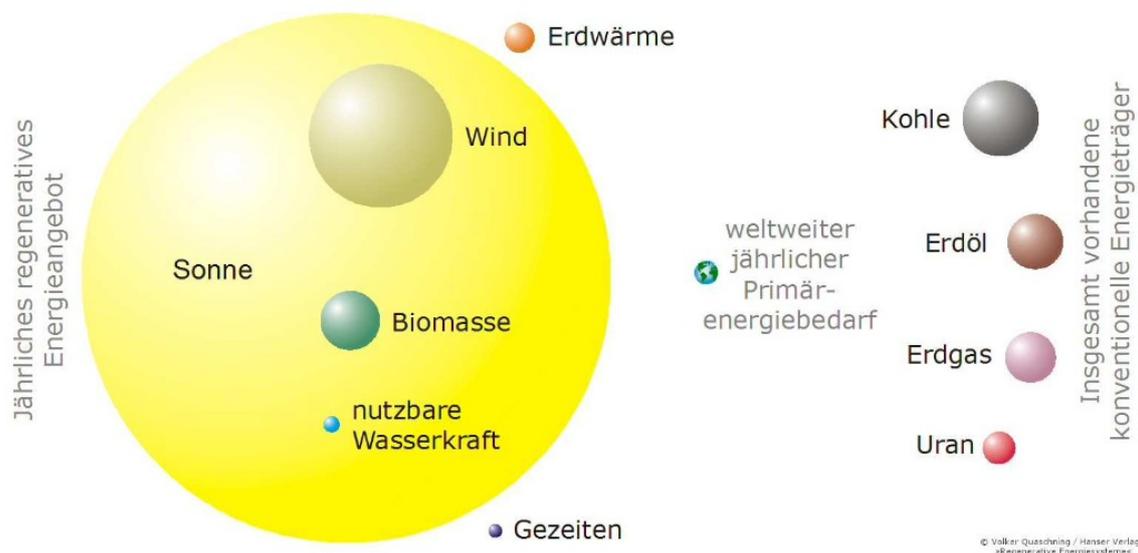
1. Möglichkeiten der dauerhaften Energieversorgung

Zu dem Möglichkeiten zur dauerhaften Energieversorgung einschließlich eines Überblicks über die Funktionsweise erneuerbarer Erzeuger und über die Organisation der Märkte sei auf die Bücher von Volker Quaschnig [2] und Christian Seynowldt [3] verwiesen. Diese Bücher sind zur Anschaffung und zum Durchlesen begleitend zur Vorlesung empfohlen. Schwerpunkt dieser Vorlesung sind die Zusammenhänge bei der Energieversorgung, sowie die Bewertung unterschiedlicher Möglichkeiten einschließlich der Realisierung.

1.1. Energievorräte und Verfügbarkeit

Interpretiert man den Begriff der Energie als die Fähigkeit, Arbeit zu verrichten, so lassen sich unterschiedliche Energieformen ineinander wandeln: Fährt man mit dem Fahrrad einen Berg hinauf, so wird die Bewegungsenergie, die man aufbringt, in Lageenergie (potenzielle Energie) gespeichert: Abwärts rollt es dann von alleine. Beim Kochen wird Verbrennungsenergie (chemisch gespeicherte Energie) oder elektrische Energie in Wärmeenergie gewandelt.

Sogenannte Wärmekraftmaschinen wandeln Verbrennungsenergie in Wärme und einen Teil mechanische Energie. Kernkraftwerke erzeugen Wärmeenergie aus Kernbrennstoffen, ein Teil der Wärmeenergie wird in mechanische Energie gewandelt. Bei Kraftwerken wird die mechanische Energie weiter in elektrische Energie gewandelt. Verbrennungsmotoren in Fahrzeugen, Schiffen und Flugzeugen sind ebenfalls Wärmekraftmaschinen, wandeln die Energie der Brennstoffe also in Wärme und Kraft (Antrieb, Bewegung). Beim Bremsen des Fahrzeugs wird Bewegungsenergie wieder in Wärme gewandelt.



Energiekugeln (Quelle: V. Quaschnig, [2])

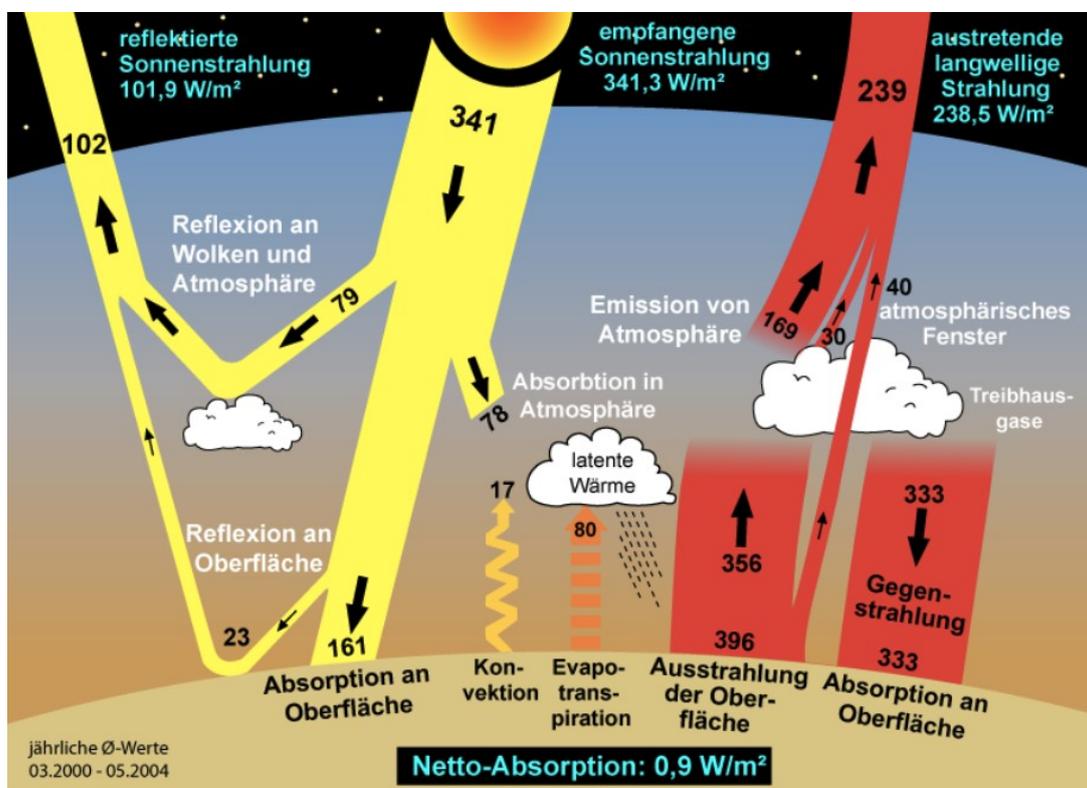
Die Sonne liefert Strahlungsenergie, die in Wärmeenergie gewandelt wird, bzw. direkt in elektrische Energie mit Hilfe einer PV-Anlage (photo-voltaische Anlage). Lokale Unterschiede in der Erwärmung der Erde durch die Sonneneinstrahlung führt zu Luftbewegungen. Windräder setzen ein Teil der Bewegungsenergie des Windes in elektrische Energie um. Regen führt zum Auffüllen von Wasserrervoirs und Laufwasser. Ein Teil der Bewegungsenergie des Wassers lässt sich mit Hilfe von Wasserkraftwerken in elektrische Energie wandeln. Elektrische Energie lässt sich wiederum zum Antrieb von Maschinen nutzen. Eine Wärmepumpe verwendet die elektrische Energie zum Antreiben eines Kom-

pressors, der der Umgebung Wärme entsteht. Auf diese Weise vervielfacht sich der Energieeinsatz im Vergleich zur direkten Erzeugung von Wärme durch elektrische Energie.

Mit Hilfe des Begriffs der Energie lassen sich Energiemengen unterschiedlicher Energieformen miteinander vergleichen. Die in der Abbildung dargestellten Energiekugeln sind [2] entnommen und vergleichen die irdischen Vorräte an Energie mit dem Energiebedarf der Menschheit. Hierbei fällt auf, dass erneuerbare Erzeuger wie Sonnenenergie, Wind, und Biomasse jährlich jeweils ein Vielfaches der weltweit jährlich benötigten Energiemenge bereit stellen können. Demgegenüber ist die Erschöpfung fossiler Energieträger und Kernbrennstoffe in einigen Jahren bis Jahrzehnten absehbar.

1.2. Energiehaushalt der Erde

Die Sonne ist die Grundlage allen Lebens auf der Erde. Entscheidend für den Energiehaushalt der Erde ist, dass Energie geringerer Temperatur wieder von der Erde ins Weltall abgestrahlt werden kann. Folgende Abbildung zeigt eine Übersicht.



Energiehaushalt der Erde (Quelle: LEIFlphysik [27])

Von der eintreffenden Solarstrahlung (linker Teil der Abbildung) gelangt ein Teil an die Erdoberfläche und wird dort absorbiert, einen weiteren Teil absorbiert die Erdatmosphäre. Dieser Teil trägt zur Erwärmung bei. Die Erdoberfläche ist warm und strahlt ihrerseits ab (rechter Teil der Abbildung), wobei die Erdatmosphäre nur einen im Vergleich zur direkten Sonneneinstrahlung geringeren Teil der Abstrahlung durchlässt. Ursache hierfür ist die vergleichsweise geringe Temperatur der Erdoberfläche im Vergleich zur Sonnenoberfläche (die Abstrahlung ist vergleichsweise langwellig).

Die Atmosphäre nimmt umgekehrt von der Erdoberfläche Wärme auf (durch Luftbewegung = Konvektion und Verdunstungswärme bei der Kondensation von Regenwasser in der Atmosphäre (mittlerer Teil der Abbildung)). Einen großen Teil der Wärmeenergie strahlt die Erdatmosphäre direkt ins Weltall ab (rechter Teile der Abbildung, größer als der direkte Anteil der Abstrahlung der Erdoberfläche).

Wie schaut die Energiebilanz gemessen an der Oberfläche der Erdatmosphäre aus? Einer mittleren Einstrahlung von $341,3 \text{ W/m}^2$ aus Sonnenenergie steht eine Abstrahlung von $101,9 \text{ W/m}^2$ aus reflektierter Sonnenstrahlung und $238,5 \text{ W/m}^2$ aus Wärmestrahlung gegenüber, in Summe somit $340,4 \text{ W/m}^2$. Es verbleibt eine Netto-Absorption von $0,9 \text{ W/m}^2$. Diese Berechnung illustriert, wie empfindlich das Gleichgewicht ist, das die Menschheit durch die vermehrte Emissionen von Treibhausgasen stört.

Bemerkung: Die dargestellten Energiemengen sind Jahresmittel. In den Breitengraden von Deutschland rechnet man mit ca. 100 kW/m^2 Energie aus Sonnenstrahlung in der Mittagszeit auf der Erdoberfläche. Bei 1400 Sonnenstunden im Jahr errechnet man hieraus eine Einstrahlung von $1,4 \text{ MWh/m}^2$. Mit einer solarthermischen Anlage wären hiervon ca. 60% als Wärmeenergie nutzbar, mit einer PV-Anlage ca. 20%. Der in der Abbildung angegebene Wert von 161 W/m^2 an Sonneneinstrahlung auf der Erdoberfläche entspricht dem Jahresmittel: Multipliziert mit $24 \cdot 365 = 87600$ Stunden im Jahr erhält man eine Energie aus Solareinstrahlung von $1,4 \text{ MWh/m}^2$.

1.3. Kreislaufprozesse

Natürliche Prozesse sind Kreislaufprozesse, die zu einem Gleichgewicht und zu einem stabilen Klima führen. Hierzu trägt das gesamte Ökosystem der Erde bei, einschließlich aller Arten von Pflanzen und Tieren. Für industrielle Kreislaufprozesse ist die Verfügbarkeit von Wasser, Sauerstoff und Kohlenstoff eine entscheidende Voraussetzung.

Folgende Abbildung illustriert den Wasserkreislauf. Auch hier ist die Sonne die treibende Kraft: der Prozess kommt durch die Verdunstung von Wasser zustande. Das Wasser wird in der Atmosphäre gespeichert, formt sich zu Wolken und regnet ab.

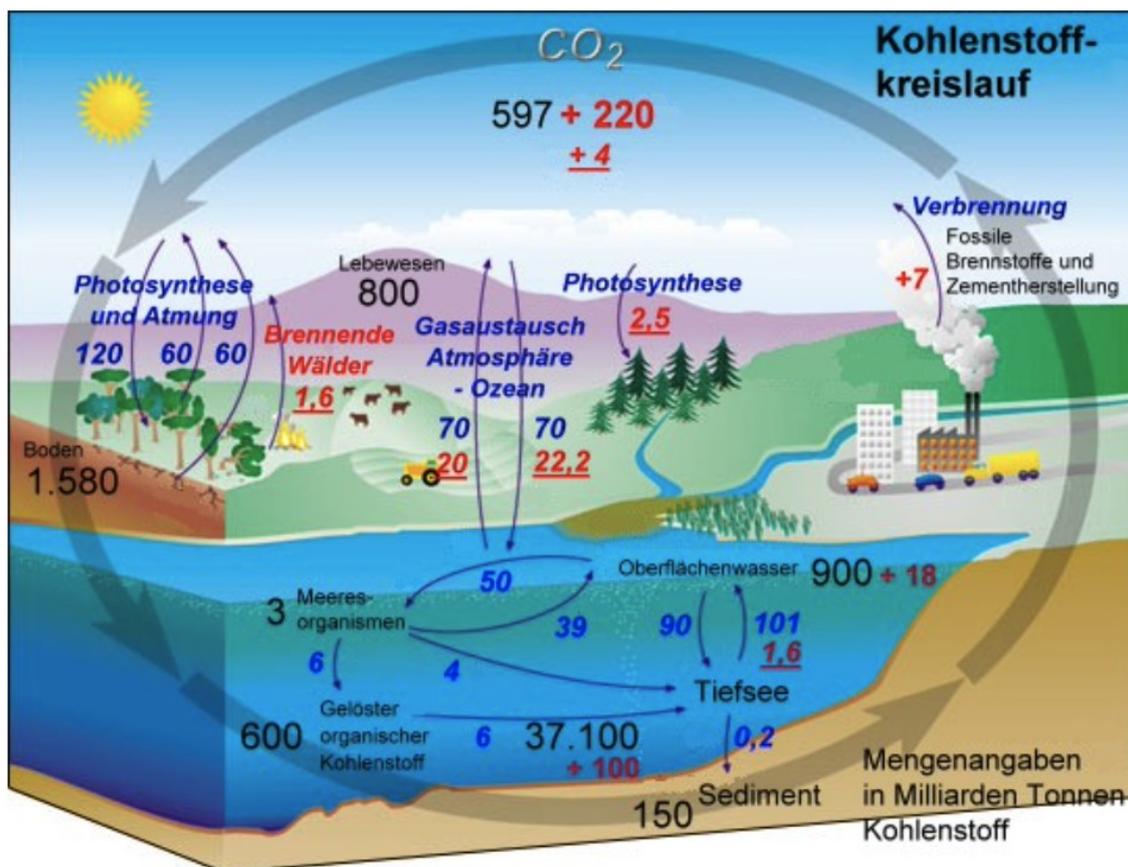


Kreislauf des Wassers (Quelle: Wikipedia [29])

Zusätzlich zu den Meeren dienen als Wasserspeicher für Süßwasser dienen Eis und Schnee, Flüsse und Seen, sowie Grundwasser. Der Prozess sorgt für ausreichend Wasser für Pflanzen und Tiere auf dem Land und im Wasser.

Eng verbunden mit dem Leben auf der Erde ist der Kohlenstoffkreislauf. Zwar ist der Kohlenstoffgehalt der Atmosphäre minimal, doch dient dieser Kohlenstoff als Basis der Vegetation. Auch hier ist die Sonne die treibende Kraft: Mit Hilfe der Photosynthese entsteht aus Wasser und Kohlenstoff Zucker als Basis des pflanzlichen Stoffwechsels und Basis der pflanzlichen Substanz (Kohlenwasserstoffe). Der benötigte Kohlenstoff wird dem Kohlendioxid (CO₂) der Luft entnommen. Bei der Photosynthese wird Sauerstoff frei und liefert die Basis für Lebewesen, die auf Sauerstoff angewiesen sind, und somit für Tier und Mensch.

Umgekehrt entsteht durch Verbrennung von Zucker bzw. Kohlenwasserstoffen in Pflanzen und Tieren wiederum Kohlendioxid und Wasser. Auch diesen Effekt kennt jeder, der ein Gerät zur Überwachung des CO₂-Gehaltes von Räumen betreibt: Durch die Atemluft vergrößert sich der CO₂-Gehalt rasch. Die Atemluft liefert einen unmittelbaren Indikator für die Verbrennung von Kohlenwasserstoffen und somit für die Präsenz tierischen Lebens (was viele Insekten zur Ortung ausnutzen). Folgende Abbildung illustriert den Kreislauf des Kohlenstoffs.



Kreislauf des Kohlenstoffs (Quelle: J. Paeger und NASA Earth Observatory [30])

Basis fossiler Brennstoffe sind Kohlenwasserstoffe, die aus der Biomasse von Pflanzen stammt, und somit aus der Photosynthese von Kohlenstoff aus der Atmosphäre. Dieser Kohlenstoff wurde über lange Zeiten aufgenommen und in den Ablagerungen der fossilen Biomasse gespeichert. Durch die massenhafte Verbrennung fossiler Biomasse setzen wir in kurzer Zeit große Mengen als CO₂ frei und stören den Kreislauf empfindlich.

Kohlenstoff wird ebenfalls eingelagert in den Skeletten pflanzlicher und tierischer Lebewesen, die sich über lange Zeiträume in Form von Sedimentgestein ablagern: Kalkstein (bzw. chemisch Kalziumkarbonat, CaCO₃) findet sich massenweise im Gestein und Boden (zu einem Anteil von ca. 99,8% des weltweiten Vorkommens an Kohlenstoff). Auch hier ist der Mensch in der Lage, durch massive industrielle Nutzung Kreislaufprozesse zu unterbrechen: Zur Herstellung von Zement wird Kalkstein zu

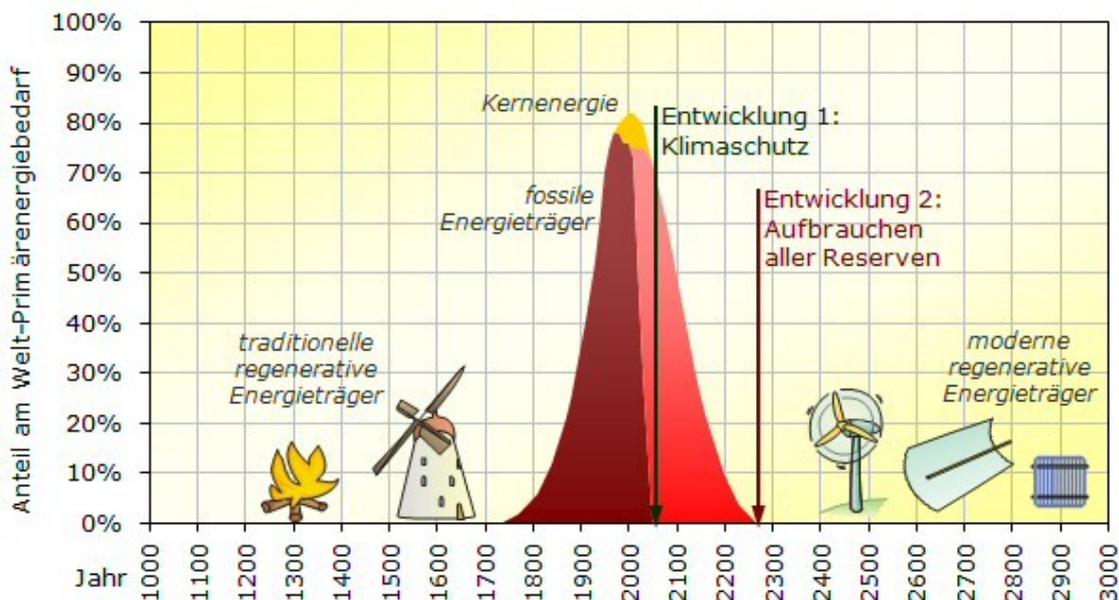
Kalk gebrannt (aus Kalziumkarbonat CaCO_3 entsteht Kalziumoxid CaO), hierbei entweicht das im Kalkstein gebundene Kohlendioxid (CO_2).

Die in der Abbildung dargestellten schwarzen Zahlen illustrieren die jährlichen Flüsse an Kohlenstoff in Milliarden Tonnen innerhalb des Prozesses. Die Zahlen in blauer Schrift beschreiben die natürlich Teilprozesse. Zahlen in roter Schrift illustrieren das Ausmaß der menschlichen Eingriffe in den Kreislauf. In roter Schrift unterstrichen sind die aktuellen jährlichen Beiträge aus menschlicher Aktivität (bei Verbrennung +7 fehlt der Unterstrich). Durch brennende Wälder, fossile Brennstoffe und die Zementherstellung vergrößert sich der CO_2 -Ausstoß erheblich, weit über die Grenzen der Photosynthese hinaus. Dem höheren CO_2 -Gehalt der Erdatmosphäre steht kein äquivalenter Prozess der Rückführung in Biomasse gegenüber.

1.4. Zeitraum der fossilen Industrialisierung

Dem überwiegenden Teil ihrer Geschichte hat die Menschheit mit regenerativen Energieträgern überlebt: Brennholz, Biomasse, Wind und Laufwasser wachsen nach und regenerieren sich über die natürlichen Kreislaufprozesse. Erst mit der Entdeckung von Kohle, Öl und Gas begann die Zeit der Industrialisierung. Diese Zeit ist verbunden mit einem explosionsartigen Anstieg des Primärenergieverbrauchs. Folgende Abbildung zeigt eine Übersicht auf der Zeitskala.

Die Zukunft bleibt offen, jedoch ist die Erschöpfung der irdischen Ressourcen an fossilen Brennstoffen, sowie an Erz absehbar, und somit die Rückkehr in einen Kreislaufprozess, und zwar im Laufe dieses Jahrhunderts. Die Energiewende und Maßnahmen zum Klimaschutz stellen den Versuch dar, diesen Übergang zu lenken und zu ordnen.

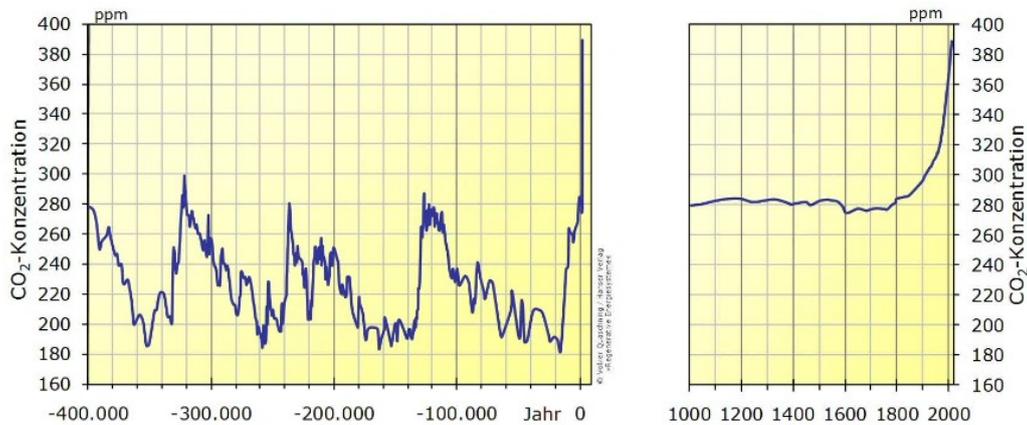


Zeit der Nutzung fossiler Brennstoffe (Quelle: Quaschnig [28])

Mit der Energiewende verbunden ist eine drastische Verringerung des Primärenergiebedarfs, d.h. des Energiebedarfs aus fossilen Energieträgern. Mit der Industrialisierung ist der Begriff der Primärenergie eng verbunden mit der Dampfmaschine (mit Kohle betrieben) und dem Gasmotor (mit Benzin, Diesel oder Gas betrieben) zum Antrieb von Maschinen, sowie als Energiequelle zum Heizen und für Prozesswärme, sowie als Energiequelle zur Erzeugung von Stahl und Beton.

Die hierdurch freigesetzten Mengen an Kohlendioxid (CO_2) als Treibhausgas sind erheblich. Folgende Ablauf zeigt den Verlauf der Konzentration von CO_2 in der Atmosphäre in den vergangenen Jahren. Der heute übliche Wert von ca. 400 ppm (Volumenanteile an der Luft pro Million, d.h. 0,4 ‰ bzw. 0,04 %) ist jedem geläufig, der ein CO_2 -Messgerät zur Messung der Qualität der Raumluft ein-

setzt. Dieser Wert ist keineswegs bedrohlich für die Atemluft, stellt jedoch eine Verdopplung der Gleichgewichtskonzentration über die letzten Jahrtausende dar, mit erheblichen Konsequenzen für den Wärmehaushalt der Erde (siehe Abschnitt 1.2).



Kohlenstoffkonzentration in der Atmosphäre (Quelle: Quaschnig, [2])

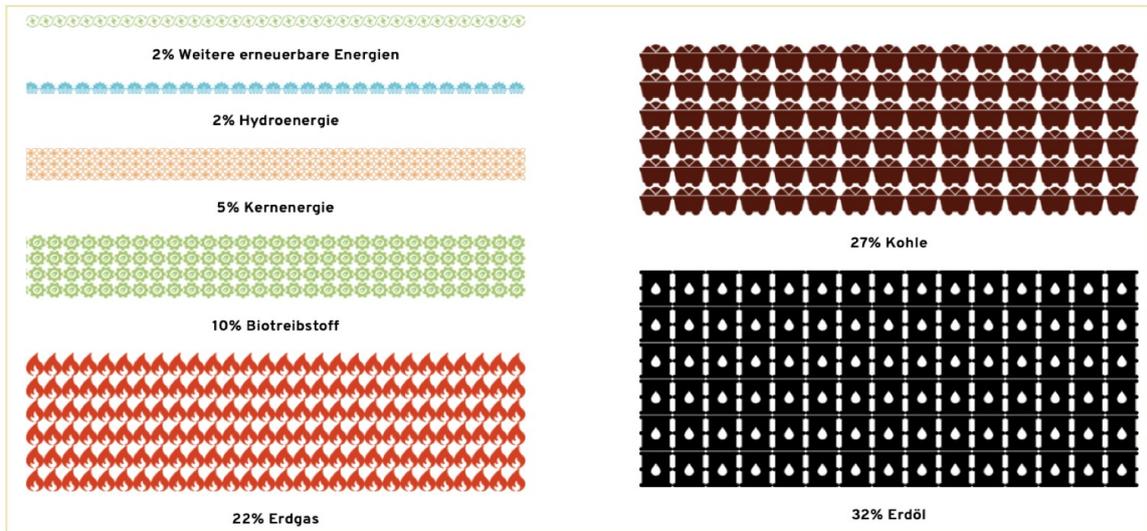
Die natürlichen Schwankungen der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre über Eiszeiten und Hitzeperioden der vergangenen Jahrtausende betrug zwischen 180 und 280 ppm. Entsprechend drastische Veränderungen des Klimas darf man als Folge der fossilen Industrialisierung erwarten.

Um den Klimawandel zu bremsen, wollen sich die meisten Länder von fossilen Energieträgern verabschieden. Zugleich steigt der Bedarf an elektrischer Energie. Was bedeutet das für die Netze?

1.5. Energieträger weltweit

Seit Beginn der Industrialisierung steigt der CO₂-Ausstoß aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe. Die wachsende Kohlenstoffdioxidkonzentration in der Erdatmosphäre gilt als Hauptverursacher des Klimawandels und Fachleute sind sich einig: Um diesen Trend zu verlangsamen, müssen fossile Brennstoffe durch CO₂-emissionsfreie Energiequellen ersetzt werden.

Heute beziehen wir weltweit noch rund 80 Prozent des Energiebedarfs aus fossilen Energieträgern. Nur etwa 20 Prozent kommen aus CO₂-neutralen Energieträgern wie Wasserkraft, Kernkraft, natürliche Brennstoffe (Biomasse, Holz, Abfälle) und andere Erneuerbare wie Wind- und Solarkraft. Um den Klimawandel zu bremsen, haben viele Staaten beschlossen, fossile durch erneuerbare Energieträger zu ersetzen.



Quelle: Grafik Onload 07/2020 [11] basierend auf Zahlen der International Energy Agency (IEA), 2019 [9]

Energieträger heute (Stand 2019, Quellen [10, 11])

Am einfachsten gelingt die Energiewende durch den Umstieg auf Solar- und Windenergie. Das Angebot an Sonnenstrahlung und Wind ist schließlich immens und übersteigt den weltweiten Bedarf an Primärenergie von derzeit rund 170.000 Terawattstunden jährlich um ein Vielfaches. Rein theoretisch ist die emissionsfreie Energieerzeugung also keine Utopie.

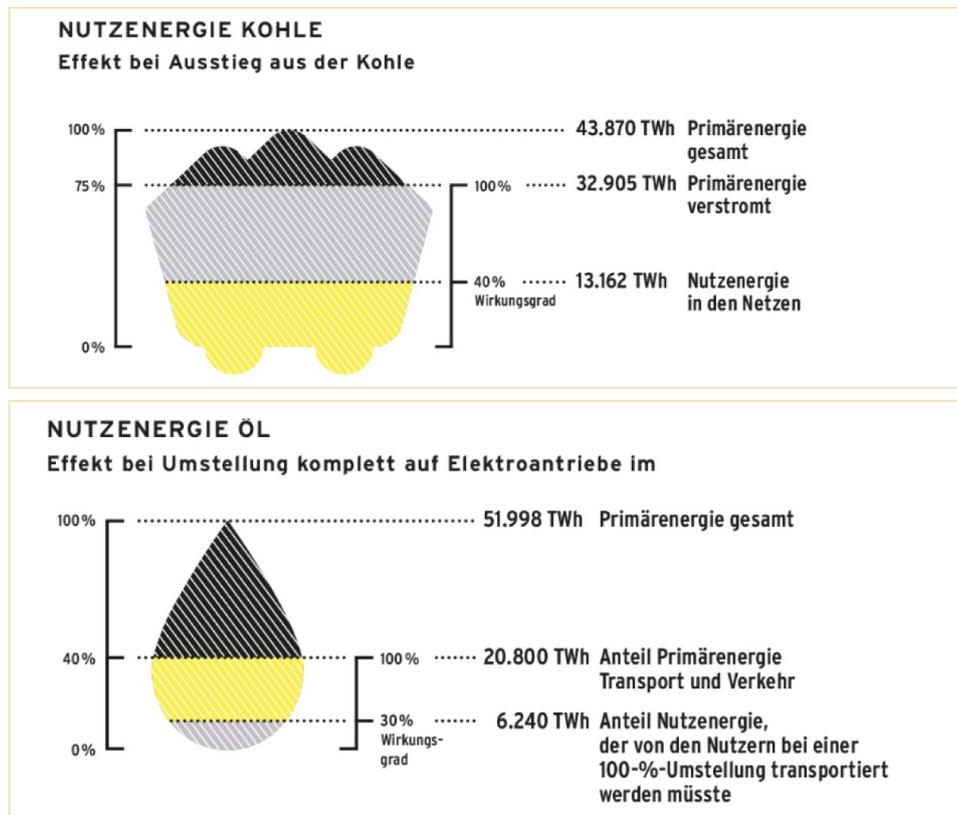
Doch bedeutet das im Umkehrschluss, dass künftig große Teile des Primärenergiebedarfs als elektrische Energie durch die Netze transportiert werden müssten. Das wäre ein gewaltiger Sprung im Vergleich zu den 27.000 Terawattstunden, die heute durch die Netze fließen. Die großen Fragen sind also: Wie viel Energie muss tatsächlich substituiert werden? Wie wird sich der Strombedarf in Zukunft entwickeln? Und was bedeutet es für die Netze, wenn deutlich mehr Strom durch sie fließt?

1.6. Primärenergie und Nutzenergie

Ein Großteil der Primärenergie geht ohnehin bei der Stromerzeugung verloren und gelangt nicht in die Netze. Die Erklärung: Grundsätzlich sind konventionelle und atomar betriebene Kraftwerke nichts anderes als thermische Maschinen, die Wärme in mechanische Energie umwandeln und diese wiederum in elektrischen Strom. Das gelingt jedoch nur mit recht hohen Verlusten.

Die Wirkungsgrade liegen in der Regel bei um die 40 Prozent, nur Gaskraftwerke schneiden hier deutlich besser ab. Die Netze transportieren also nur einen vergleichsweise geringen Anteil der eingesetzten Primärenergie: die sogenannte Nutzenergie. Da die Erzeugung von Strom aus Sonne und Wind nicht mit Primärenergiekosten verbunden ist, spielt der Wirkungsgrad solcher Anlagen eine untergeordnete Rolle. Entscheidend für einen wirtschaftlichen und ökologisch sinnvollen Betrieb sind lediglich die Investitionen und die laufenden Kosten über die Betriebsdauer.

Rund drei Viertel des Primärenergieträgers Kohle dienen der Stromerzeugung. Soll dieser nun durch Solar- und Windanlagen substituiert werden, ist nur der Anteil an Nutzenergie, also der aus Wärme erzeugte elektrische Strom, zu ersetzen.



Ausbeute an Nutzenergie bei Kohlekraftwerken und Verbrennungsmotoren (Quellen [10, 11])

Der gleiche Effekt ergibt sich bei der Nutzung von Mineralöl in Verbrennungsmotoren. Diese gegenüber Kraftwerken kleinen Verbrennungsmotoren haben Wirkungsgrade von weniger als 30 Prozent. Gelingt im Straßenverkehr ein Ersatz durch elektrisch betriebene Fahrzeuge, so ist auch hier nur der Anteil an Nutzenergie (30 Prozent) durch erneuerbare Energieträger zu ersetzen. Bei einem Anteil von 40 Prozent am Primärenergieverbrauch von Mineralöl für den Transport wären somit überschlägig nur insgesamt etwa neun Prozent an elektrischer Energie für elektrisch betriebene Fahrzeuge aufzubringen. Diese Energiemenge muss bei einer kompletten Umstellung auf elektrische Antriebe zusätzlich durch die Stromnetze transportiert werden.

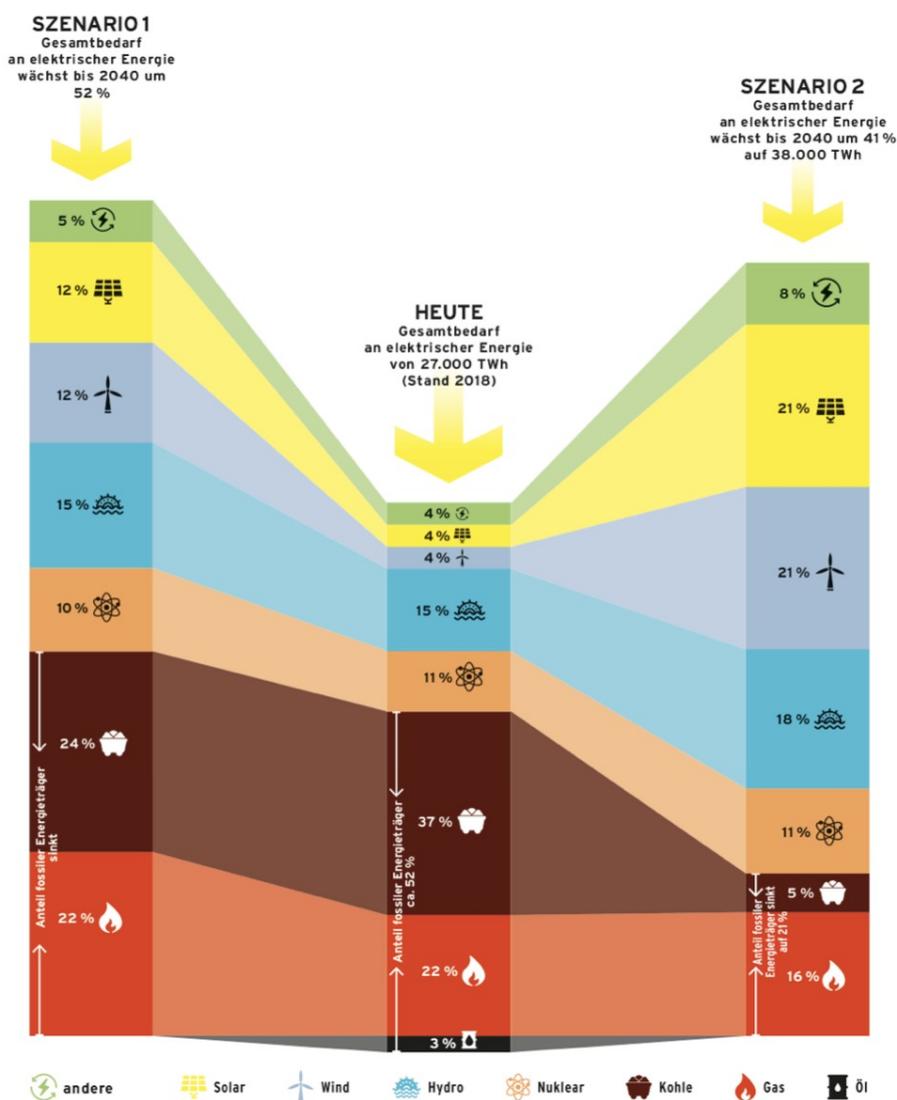
Thermische Kraftwerke und Verbrennungsmotoren sind die größten Abnehmer von Kohle und Mineralöl. Weitere Verbraucher sind Heizungen (Mineralöl und Kohle) sowie industrieller Bedarf etwa bei der Erzeugung von Stahl und Zement (Kohle). Auch in diesem Segment stehen Technologien zur Substitution zur Verfügung: Bei Heizungen lässt sich der Bedarf an fossiler Primärenergie durch beispielsweise Wärmepumpen oder solarthermische Anlagen reduzieren. Insgesamt verfügen wir heute über Technologien, mit denen der Primärenergiebedarf und somit die Verbrennung fossiler Brennstoffe deutlich reduziert werden kann.

Und wie steht es um die Zukunft des Energieträgers Gas? Gaskraftwerke beziehungsweise Gas- und Dampfkraftwerke haben im Energiemix der Zukunft deutlich bessere Aussichten: Sie erzielen wesentlich höhere Wirkungsgrade (über 60 Prozent) als konventionelle thermische Kraftwerke, da sich Gasturbinen bei erheblich höheren Temperaturen betreiben lassen, Dampfturbinen nachlagern lassen und häufig in Kombination mit Fernwärme betrieben werden (die sogenannte Kraft-Wärme-Kopplung). Ein weiterer Vorteil dieser Technologie: Auch in Sachen Betriebsführung gelten Gaskraftwerke als die flexibelsten.

1.7.Szenarien für die Energiewende

Rund 17 Prozent des weltweiten Energiebedarfs fließen heute als elektrische Energie durch die Netze. Etwa 37 Prozent davon sind bereits emissionsfrei. Für die Zukunft müssen Netzplaner neben unterschiedlichen Szenarien für die Subvention konventioneller Energieträger auch noch Wachstums-szenarien berücksichtigen.

Denn der Energiehunger ist groß und viele Schwellen- und Entwicklungsländer haben hohen Nachholbedarf. Immer noch haben rund 650 Millionen Menschen weltweit keinen Zugang zur Elektrizität. So rechnen Fachleute mit einem Faktor 1,5 der heutigen Energienachfrage bis zum Jahr 2040. Daraus leitet die internationale Energieagentur (IEA, [10]) zwei Zukunftsszenarien ab. Hierbei wird die Stromerzeugung aus Öl nahezu vollständig verschwinden, die aus Kohle um bis zu 80 Prozent reduziert. Daraus leitet die Internationale Energieagentur (IEA) zwei Zukunftsszenarien ab.



Stromerzeugung nach Energieträgern heute und 2040 (Quellen [10, 11])

In Summe wächst nach heutiger Planung der emissionsfreie Anteil an der elektrischen Energieerzeugung bis 2040 auf 52 bis 79 Prozent, wobei die Stromerzeugung insgesamt um einen Faktor 1,5 wächst. Gemessen an der heute installierten Basis ergibt sich weltweit folgende Entwicklung: Die Energie aus Kernkraft wächst um 0 bis 33 Prozent, die aus Wasserkraft um 50 bis 75 Prozent, die aus

Wind um 400 bis 700 Prozent, die aus Solaranlagen um 400 bis 700 Prozent und die aus sonstigen erneuerbaren Quellen um 100 bis 200 Prozent.

Die Stromerzeugung aus Öl wird nahezu vollständig verschwinden, die aus Kohle um bis zu 80 Prozent reduziert. Und die aus Gas wird gemessen am heutigen Stand stabil bleiben oder je nach Szenario um bis zu 50 Prozent wachsen. Gas ist die vergleichsweise klimafreundlichste fossile Energiequelle. Die Anlagen haben zudem das Potenzial zur Nutzung regenerativ erzeugten Gases und erfüllen damit eine Speicher- beziehungsweise Pufferfunktion.

1.8. Konsequenzen für die Stromnetze

Will man den Klimawandel bremsen, ist die Abkehr von konventionellen Energieträgern ohne Alternative. Doch auch ohne die Substitution von Kohle und Öl müssten die Netze mehr elektrische Energie transportieren, denn der Bedarf wächst kontinuierlich.

Der Anteil der Großkraftwerke in den Stromnetzen (Kernkraft, Kohle und Gas) wird sich im Zuge der Energiewende von derzeit 70 Prozent auf 56 bis 32 Prozent verringern. Das heißt, je nach Szenario werden 2040 zwischen 52 und 79 Prozent der elektrischen Energie emissionsfrei produziert. Solar- und Windstrom haben daran den größten Anteil.

Doch über das Jahr und im Tagesverlauf schwankt die Produktion erneuerbarer Energie je nach dem lokalen Angebot an Wind, Sonne und Wasser. Außerdem sind viele der Anlagen deutlich kleiner als konventionelle Kraftwerke. Daher wird der Umstieg auf erneuerbare Energie spürbare Auswirkungen auf die Stromnetze haben.

Neue Methoden zur Leistungsregelung

Die Betriebsführung der Netze muss sich einem schwankenden Angebot an elektrischer Energie zur Deckung der Nachfrage anpassen. Wo früher der Kohlebunker als Speicher diente, sind nun Methoden zur kurzfristigen und langfristigen Speicherung von Energie für die Regelung der Leistungsbilanz gefragt. Zu den wichtigsten Speichertechnologien zählen Power-to-Gas-Anlagen, Pumpspeicherkraftwerke oder Batterien.

Strukturwandel im Netz

Anlagen zur Erzeugung erneuerbarer Energie werden überwiegend dort errichtet, wo das Angebot an Primärenergie (Wind, Sonne, Biogas, Biomasse) am größten ist, nicht zwangsläufig am Ort der größten Nachfrage. Die Versorgung wird zudem immer dezentraler und die Anlagen werden tendenziell kleiner als konventionelle Kraftwerke. Viele Erzeuger verlagern sich von den Übertragungsnetzen in die Verteilnetze.

Die installierte Leistung (und somit die benötigte Anschlussleistung) fällt im Verhältnis zur jährlichen Energieausbeute wegen des schwankenden Angebots wesentlich größer aus als bei konventionellen Kraftwerken. Ein Ausbau der Verteilnetze und Übertragungsnetze wird damit in vielen Fällen erforderlich.

Wachstum der Stromnetze

Im Zuge der Energiewende wird weltweit ein Anstieg des Bedarfs an elektrischer Energie um 50 Prozent erwartet. Die Stromnetze müssen diese Menge an zusätzlicher Energie transportieren. Hierbei hängt die benötigte Transportleistung vom Bedarf und vom Angebot im Tagesverlauf ab. Erzeuger erneuerbarer Energie bringen größere Schwankungen auf der Angebotsseite.

Denn aufgrund der natürlichen Gegebenheiten liegen die Betriebszeiten von Windanlagen bei rund 40 Prozent gegenüber konventionellen Anlagen — bei Solaranlagen sind es lediglich knapp 15 Prozent. Das bedeutet, dass wesentliche höhere Kapazitäten aufgebaut werden müssen, um die gleiche Energiemenge zu erbringen. Die Integration des Straßenverkehrs ins Stromnetz führt zudem auf

Seite der Nachfrage zu neuen Schwankungen im Netz. Je nach Reservekapazität der Netze ist hierfür ein Ausbau erforderlich.

Flexibilisierung der Stromnetz

Stromnetze verfügen über eine Reserve für Ausnahmesituationen sowie für den sicheren Betrieb im Fehlerfall. Der Strukturwandel und mehr Strom im Netz führen zu einer stärkeren Auslastung der Netze insgesamt auf allen Spannungsebenen. Die Netze sind hierfür zu verstärken beziehungsweise durch Maßnahmen zur Flexibilisierung von Angebot und Nachfrage zu entlasten. Neue Konzepte an den Regelbörsen und flexiblere Preismodelle sind hierzu erforderlich.

Technologischer Ausbau der Netze

Abgesehen von der Produktion und vom Verbrauch an Energie findet in den Stromnetzen eine weitere technologische Entwicklung statt. Wind- und Solaranlagen, elektrische Speicher, Elektrolyseanlagen, Ladeinfrastruktur für elektrische Fahrzeuge sowie viele Verbraucher haben eins gemeinsam: Sie werden mit Gleichstrom betrieben beziehungsweise liefern Gleichstrom. Mit der Energiewende übersteigt in vielen Netzen bereits heute die installierte Kapazität an Gleichstromsystemen die der traditionellen Wechselstromsysteme (Generatoren, Antriebe, Wechselstromverbraucher).

Der Einsatz leistungselektronischer Wandler wird künftig zunehmen. Neue leistungselektronische Betriebsmittel und neue konventionelle Betriebsmittel lassen sich zum Betrieb künftiger Netze unter den oben genannten Herausforderungen nutzen. Weiterhin ist eine zunehmende Automatisierung der Netze absehbar. Die Anforderungen bleiben hierbei gleich: ein sicherer Betrieb der Netze mit hoher Strom- und Spannungsqualität.

2. Klimawandel und Energiewende

Ursache des Klimawandels ist die Störung des Kohlenstoffkreislaufs verursacht durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe im industriellen Zeitalter weit über den Kreislaufprozess hinaus. Daher muss die sich Energiewende von der Verbrennung fossiler Energieträger wegbewegen.

Erneuerbare Energieträger sind mit den Stoffkreisläufen vereinbar. Als nachhaltig gilt hierbei, wenn einem System nicht mehr entnommen wird, als im gleichen Zeitraum nachwächst, also z.B. in der Forstwirtschaft. Unter dieser Voraussetzung wäre die Verbrennung von Holz als Biomasse klimaneutral im Sinne von vereinbar mit dem Kohlenstoffkreislauf. Windmühlen, Laufwasser und die Nutzung der Sonnenenergie kommen ohne Brennstoffe aus und sind daher ohne Einfluss auf den Kohlenstoffkreislauf.

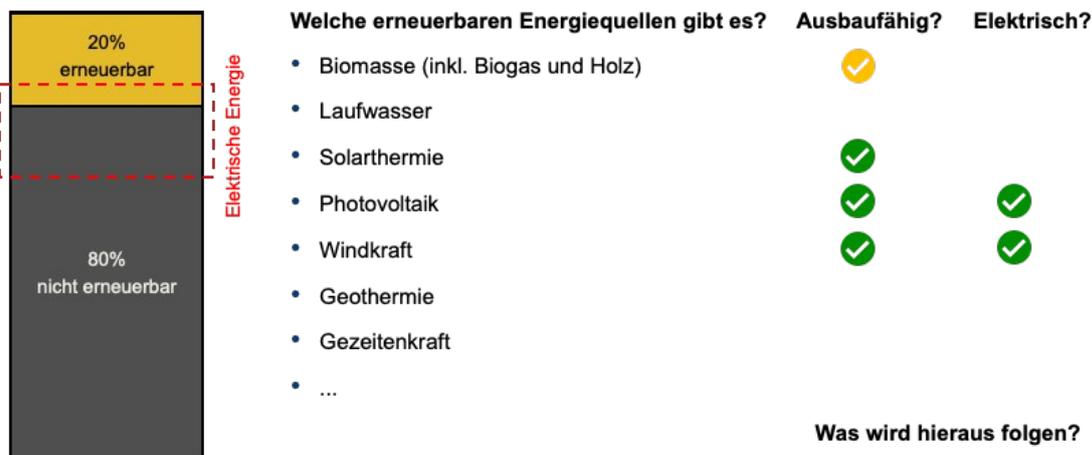
2.1. Energiebedarf nach Energiequellen

Die globale Energieversorgung basiert heute vorwiegend (zu 80%) auf der Nutzung fossiler Brennstoffe: nur 20% der Energieversorgung nutzt erneuerbare Energieträger. Die elektrische Energieversorgung stellt einen Anteil von ca. 25% des gesamten Energiebedarfs. Auch die elektrische Energieversorgung verwendet heute nur einen Anteil von 20% erneuerbare Energieträger.

Frage 2.1.1: Erzeuger. Welche erneuerbaren Energieträger kennen Sie? Wie beurteilen Sie die Ausbaufähigkeit der genannten Energieträger zur weltweiten Energieversorgung? Welche der genannten Energieträger liefern elektrischen Strom? Welche Folgerung ergibt sich hieraus für die Energiewende?

Lösungsbeispiel: siehe folgende Abbildung.

Globale Energieversorgung



Energiequellen und Ausbaupotenzial Erneuerbare Erzeuger

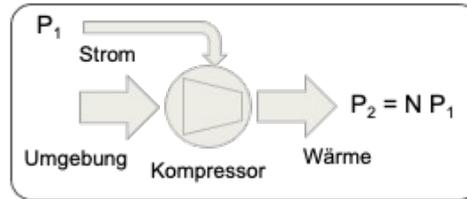
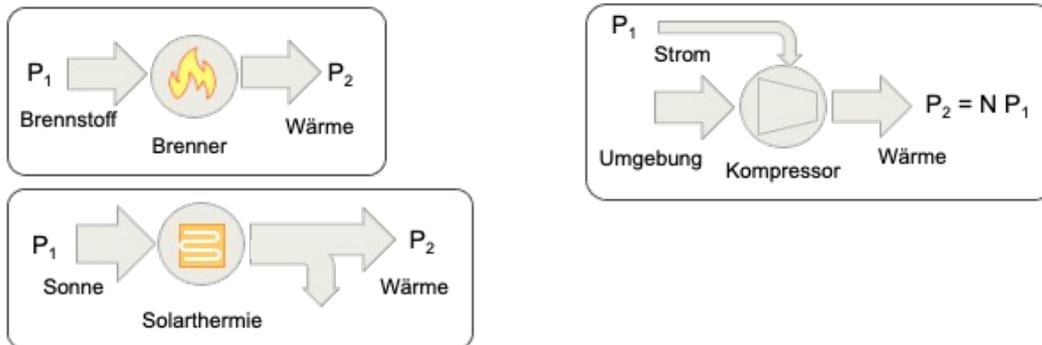
Der Großteil der nicht erneuerbaren Energieträger ist fossil, basiert also auf Kohle, Erdöl und Erdgas. Die Kernkraft mit ca. 10% der elektrischen Energie (siehe Abschnitt 1.7) leistet bei 25% Anteil der elektrischen Energie insgesamt einen Anteil von ca. 2,5% zur Energieversorgung. Die Kernkraft ist emissionsfrei, gilt jedoch mangels Ressourcen als nicht erneuerbar und sehr begrenzt ausbaufähig.

Biomasse in Form von Brennholz und sonstigen natürlich anfallenden Brennmaterial stellt die traditionelle erneuerbare Energiequelle dar. Die Ausbaufähigkeit lässt sich mit modernen Methoden steigern (z.B. Biogas aus Gülle und Verwertung von Pflanzenresten, Verwendung von Biomasse in Blockheizkraftwerken), bleibt aber gemessen am gesamten Energiebedarf begrenzt ausbaufähig.

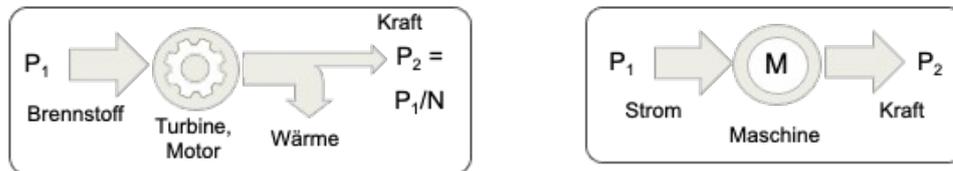
Reichlich vorhanden und praktisch unerschöpflich (siehe Abschnitt 1.1) erscheinen Solarthermie, Photovoltaik (PV) und Windkraft. Hierbei liefern PV und Windkraft unmittelbar elektrischen Strom (ohne Brennstoff und ohne den Umweg über eine Wärmekraftmaschine). Daher kommt diesen Energiequellen eine besondere Bedeutung in der Energiewende zu. Gemessen an den Eigenschaften dieser beiden wesentlichen erneuerbaren Energieträger sollte die Energiewende ein globales Elektrifizierungsprogramm darstellen.

Frage 2.1.2: Verbraucher. Folgende Abbildung zeigt unterschiedliche Methoden der Erzeugung von Wärme (zum Heizen bzw. als Prozesswärme in der Industrie) und Kraft (Antrieb für Maschinen, Pumpen, Fahrzeuge, Schiffe, Flugzeuge und konventionelle Kraftwerke). Vergleichen Sie die Verfahren bzgl. des Energieeinsatzes für den beabsichtigten Nutzen. Welche Methoden sind mit Kreislaufprozessen bzw. klimaneutralen Lösungen vereinbar?

Wärmeerzeugung



Krafterzeugung



Wärmeerzeugung und Krafterzeugung als Verbraucher

Lösungsbeispiel: (1) Wärmeerzeugung mit Brenner: Man bekommt die eingesetzte Primärenergie (in den Brennstoffen chemisch gebundene Energie) komplett als Wärmeenergie. Allerdings ist der Einsatz fossiler Brennstoffe (Öl, Gas oder Kohle) mit erhöhten CO_2 -Emissionen verbunden und greift in den Stoffkreislauf ein. Der Einsatz fossiler Brennstoffe ist Ursache der Probleme. Biomasse als Brennstoff funktioniert genauso, lässt sich bei nachhaltiger Wirtschaft aber mit einem Stoffkreislauf vereinbaren.

(2) Wärmeerzeugung mit Solarthermie: Verwendet die Sonneneinstrahlung als Wärmequelle, z.B. um Wasser in den Heizschlangen des Kollektors zu erwärmen. Bezogen auf die Sonneneinstrahlung auf der Erdoberfläche erhält man annähernd 60% der Energie als Warmwasser. Der Wirkungsgrad spielt allerdings keine Rolle, da Sonnenlicht kostenlos und unbegrenzt verfügbar ist. Diese Lösung ist emissionsfrei und klimaneutral.

(3) Wärmeerzeugung mit Kompressor (Wärmepumpe): Mit Hilfe eines elektrisch betriebenen Kompressors wird der Umgebung Wärme entnommen. Diesem Nutzen steht der Energieaufwand für den Kompressor als Einsatz gegenüber. Die Ausbeute ist abhängig von der Differenz zwischen Heiztemperatur und Umgebungstemperatur. Für Wärmepumpen, die der Luft Wärme entnehmen, lässt sich der Energieeinsatz im Jahresmittel etwa verdreifachen. Für Anlagen, die sich aus dem Erdreich bzw. dem Grundwasser oder aus Laufwasser versorgen, ist die Ausbeute deutlich größer. Wie Klimaneutral eine solche Anlage ist, hängt von der Qualität der elektrischen Energie ab: Wird die Anlage mit Solarstrom oder Windstrom betrieben, ist sie klimaneutral.

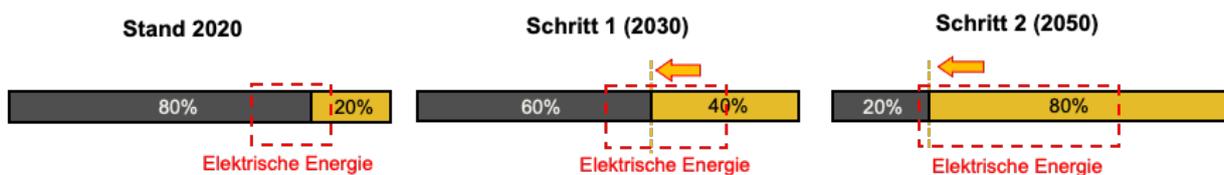
(4) Krafterzeugung durch eine Turbine bzw. einen Motor (Wärme­kraftmaschine): Die Quelle der fossilen Industrialisierung ist die Wärme­kraftmaschine, gestartet als Dampfmaschine (mit Kohle befeuerter Kessel) und weiterentwickelt zum Verbrennungsmotor und zur Gasturbine (betrieben mit Benzin, Diesel, Kerosin oder Erdgas). Die im Brennstoff gebundene chemische Energie wird vollständig in Wärme umgesetzt, das erwärmte Gas leistet mechanische Arbeit. Die Ausbeute an mechanischer Energie gemessen am Energieeinsatz ist physikalisch begrenzt durch die Temperaturdifferenz zwischen Kessel und Außentemperatur (bezogen auf die Kesseltemperatur auf der absoluten Kelvin-Skala). Für große Turbinen rechnet man mit etwa 1/3 Kraft aus dem eingesetzten Brennstoff, für kleinere Verbrennungsmotoren wie z.B. für Automobile mit etwa ¼ des Einsatzes. Verkehr und Stromerzeugung mit fossilen Brennstoffen sind wesentliche Ursachen für die hohen CO₂-Emissionen. Bei Einsatz von Brennstoffen mit besserer Klimabilanz (z.B. grüner Wasserstoff, synthetische Brennstoffe) bleibt der grundsätzlich schlechte Wirkungsgrad der Wärme­kraftmaschine ein Nachteil gegenüber effizienteren Lösungen.

(5) Krafterzeugung durch elektrische Maschinen: Elektrische Maschinen wandeln elektrische Energie nahezu vollständig in Kraft um. Die elektrische Maschine hat bezüglich der Energieausbeute einen grundsätzlichen Vorteil gegenüber der Wärme­kraftmaschine. Die elektrische Maschine lässt sich innerhalb ihres Leistungsbereichs auch beim Bremsen als Generator betreiben und gestattet die Rückspeisung bzw. Rückgewinnung (Rekuperation) der Bremsenergie. Die Klimabilanz der elektrischen Maschine ist abhängig von der Quelle der eingesetzten elektrischen Energie: Betrieben mit Grünstrom ist sie klimaneutral.

Bemerkung: Bei der Verkettung von Wandlern zu mehrstufigen Prozessen verschlechtert sich die Energieausbeute. So wäre eine mit Strom aus fossilen Kraftwerken betriebene Wärmepumpe keine gute Idee: Das Kraftwerk verwertet ca. 1/3 des Brennstoffes zu Kraft und weiter in Strom. Die Wärmepumpe verdreifacht den Energieeinsatz wieder. Im besten Fall könnte man gleich mit dem Brennstoff heizen, ohne den Umweg über das Kraftwerk und die Wärmepumpe. Allerdings wäre auch diese Lösung besser als eine Elektroheizung: Hier bleibt vom Brennstoff nur der Wirkungsgrad des Kraftwerks, also etwa 1/3 der Ausbeute, wenn man den Brennstoff direkt verheizt.

2.2. Fahrplan für die Energiewende

Folgende Abbildung illustriert den Fahrplan für die Energiewende der Internationalen Agentur für Erneuerbare Energien (IRENA – International Renewable Energy Agency) in der Ausgabe 2022, siehe [31]. Auf der Basis des heutigen Standes werden zwei Etappen bzw. Schritte vorgeschlagen.



Energiewende nach Ausbauzielen der IRENA

Ausgangspunkt ist die heutige globale Energieversorgung, die nur 20% erneuerbare Energien einsetzt (siehe Aufgabe 2.1). Der Anteil elektrischer Energie am gesamten Energiebedarf beträgt etwa 25%, wobei auch hiervon nur 20% aus erneuerbaren Energiequellen stammt.

Zum Start (Stand 2020) speist sich der Energiebedarf aus folgenden Quellen:

- 36% Mineralöl
- 21% Elektrizität (hiervon 26% aus erneuerbaren Quellen)
- 15% Erdgas
- 13% Kohle
- 11% Biomasse (6% traditionell, 5% modern)

- 3% Fernwärme
- 1% sonstige Erneuerbare.

Der Anteil erneuerbaren Energien berechnet sich hieraus aus der Biomasse (11%) und dem Anteil erneuerbarer Energien am Strom (5%), sowie 1% sonstige. Insgesamt erhält man einen Anteil von weniger als 20%.

Frage 2.2.1 : Erste Etappe (2030). Ziel ist die Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien am Gesamtenergiebedarf auf ca. 40%, somit eine Verdopplung. Welche Kandidaten aus dem oben genannten Energiemix bieten sich hierzu an? Was bedeutet dies für den Anteil elektrischer Energie? Gibt es weitere Möglichkeiten zur Steigerung des Anteils erneuerbarer Erzeuger?

Lösungsbeispiel: (1) Hauptanteile erneuerbarer Erzeuger waren Biomasse und Elektrizität. Diese Anteile wird man steigern müssen. Mit Hilfe moderner Biomasse lässt sich Wärme und Strom in ein kommunales Netz einspeisen und um Solarthermie ergänzen. (2) Die Steigerung des Bedarfs an elektrischer Energie erreicht man durch fortschreitende Elektrifizierung (Wärmeerzeugung und Verkehr). Gespeist werden müsste der Mehrbedarf aus den ausbaufähigen erneuerbaren Quellen, somit vorwiegend Windkraft und PV. (3) Der Anteil lässt sich auch durch Energieeinsparungen steigern, d.h. Maßnahmen zur besseren Energieeffizienz (z.B. Wärmedämmung, effizientere Geräte und Maschinen).

Bemerkung: In den Plänen der IRENA findet sich folgende Anteile (siehe [31]):

- 30% Mineralöl
- 30% Elektrizität (Steigerung um 50% gegenüber dem Stand 2020; Anteil 65% erneuerbarer Erzeuger; somit also eine Steigerung EE an der Stromproduktion um einen Faktor 3,75)
- 12% Biomasse (vorwiegend moderne Biomasse)
- 9% Erdgas
- 8% Kohle
- 4% Fernwärme
- 3% Wasserstoff
- 3% sonstige Erneuerbare.

Die Reihenfolge der Energieträger ändert sich hierbei nur unwesentlich. Die größten Veränderung gibt es in den Stromnetzen und in der Modernisierung der Biomasse.

Frage 2.2.2 : Zweite Etappe (2050). Ziel ist die Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien am Gesamtbedarf auf 80%. Wie lässt sich dieses Ziel erreichen?

Lösungsbeispiel: Auf dem gleichen Weg wie in der 1. Etappe: Fortschreitende Elektrifizierung mit erneuerbaren Stromerzeugern und Steigerung der Biomasse. Wegen der größeren Zeitspanne können außerdem weiterentwickelte Wasserstoff-Technologien zum Einsatz kommen.

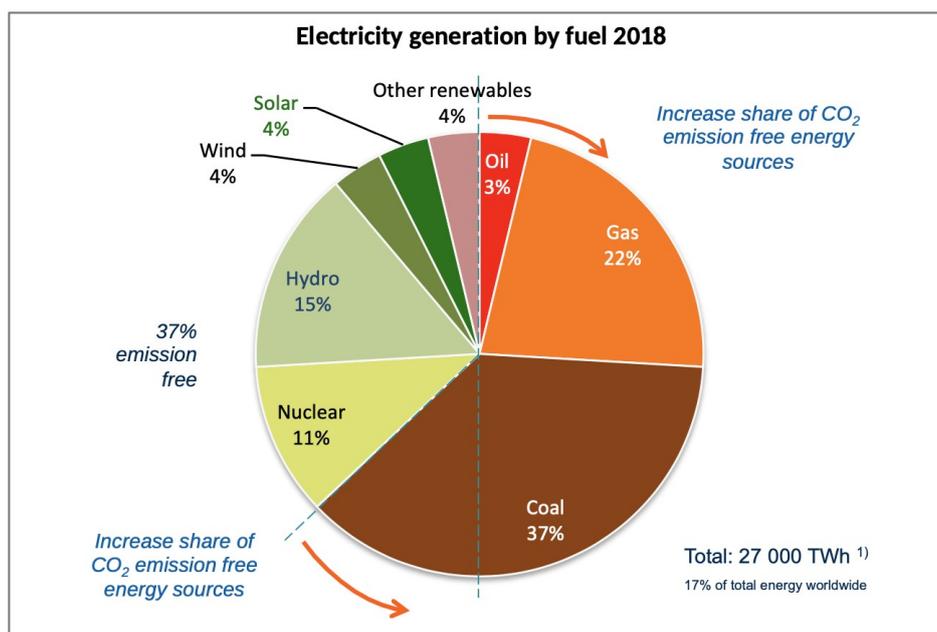
Bemerkung: In den Plänen der IRENA findet sich folgende Anteile (siehe [31]):

- 51% Elektrizität (Steigerung um 70% gegenüber dem Stand 2030; Anteil 90% erneuerbarer Erzeuger; somit also eine Steigerung EE an der Stromproduktion um einen Faktor 2,3 gegenüber 2030; insgesamt annähernd um einen Faktor 10 gegenüber 2020)
- 18% Biomasse (moderne Biomasse)
- 12% Wasserstoff (vorwiegend grüner Wasserstoff mit Anteil 66%)
- 5% Fernwärme
- 4% Erdgas
- 4% Mineralöl
- 4% sonstige Erneuerbare
- 2% Kohle.

Bei der Elektrifizierung muss man unterscheiden zwischen dem Anteil der Elektrizität an der Gesamtenergie und dem Wachstum der EE innerhalb der Stromnetze. Der Bedarf an elektrischer Energie wächst gegenüber dem Stand 2020 um einen Faktor 2,5 (51% zu 21%). Das Wachstum erneuerbarer Erzeuger innerhalb der Stromnetze fällt deutlich höher aus (annähernd ein Faktor 10).

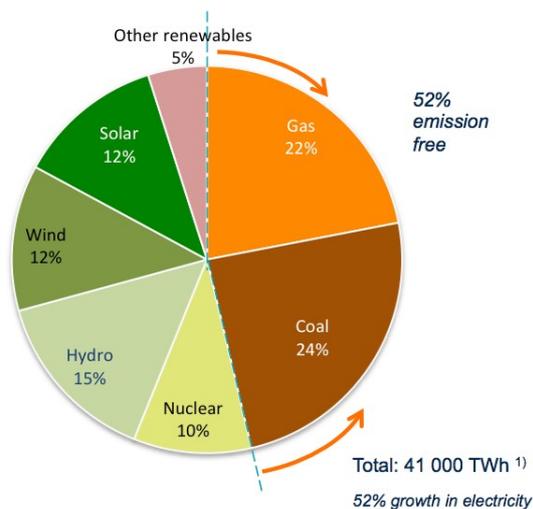
2.3. Entwicklung der Elektrizität weltweit

Folgende Grafiken zeigen (1) die aktuellen Energieträger in der weltweiten elektrischen Energieversorgung (Stand 2018), sowie (2) das von den Ländern geplante Szenario (links, stated policies) gegenüber einem geforderten nachhaltigen Szenario (rechts, sustainable development) für das Jahr 2040 (Quelle: IEA, International Energy Agency, World Energy Outlook 2019, [10]). Die elektrische Energie insgesamt wächst um ca. 50% im genannten Zeitraum.

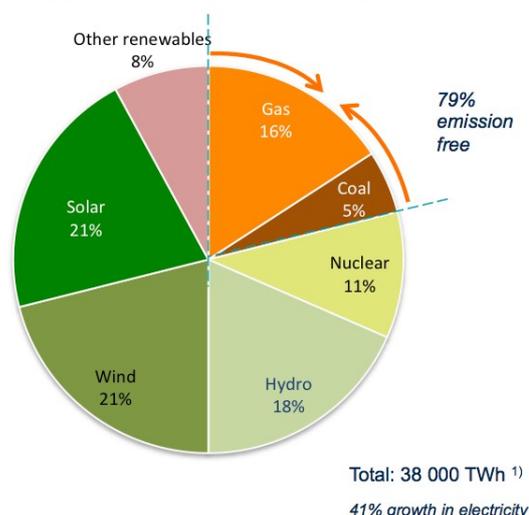


Stromerzeugung nach Energieträgern heute (Stand 2018)

Electricity generation - Stated policies 2040



Electricity generation - Sustainable development 2040



Stromerzeugung 2040 nach zwei Szenarien der IEA

Frage 2.3.1: CO₂-Ausstoß: Weshalb steht zu erwarten, dass der globale CO₂-Ausstoß sich trotz der verkündeten Bemühungen der Industrieländer nach den derzeit geplanten Szenarien weiter erhöhen wird? Welche möglichen Gründe gibt es für die Zurückhaltung einzelner Länder bei der Umsetzung der Klimaziele?

Lösung: Lösung: (1) Öl, Gas und Kohle haben 2019 einen Anteil von 63%. Im geplanten Szenario 2040 haben Kohle und Gas zusammen 46%, multipliziert mit einem Faktor 1,5 somit 69% im Vergleich zu 2018.

(2) Schwellenländer wollen zu den Industrieländern aufholen – sich „entwickeln“. Hierfür wird bevorzugt Kohle als Primärenergie genutzt. In Erdteilen wie Afrika wird ein hohes Bevölkerungswachstum prognostiziert, was den Energiebedarf steigert.

(3) Mögliche Gründe für die Zurückhaltung beim Einsatz erneuerbarer Erzeuger in den geplanten Szenarien: [a] Gewohnheit: Kohle gilt als erprobte und preisgünstige Technologie; [b] wirtschaftlicher und politischer Einfluß: Kohlekraftwerke sind Großkraftwerke und sehr viel zentraler und bedeutsamer als viele kleine Anlagen; [c] Stabilität und Verlässlichkeit bei der Umsetzung: Dezentrale Erzeuger benötigen lokale Initiativen und lokale Unterstützung.

Frage 2.3.2: Energiewende: Was versteht man unter dem Begriff der Energiewende und was soll sich in den Sektoren der Energiewende ändern?

Lösung: Die Energiewende soll die Förderung fossiler Rohstoffe wie Kohle, Erdgas und Erdöl zurückfahren. Dies soll durch den Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energieformen geschehen. Die Energiewende basiert auf drei Säulen: der Energieeinsparung, der Effizienzsteigerung der Energieerzeugung und Verteilung, sowie der Nutzung erneuerbarer Primärenergieformen.

In den Sektoren soll sich folgendes ändern:

- Sektor Strom: Dekarbonisierung und Atomausstieg. Erzeugung aus Wind, Sonnenlicht, Wellen, Gezeiten, Geothermie, Bioenergie und Wasserkraft.
- Sektor Wärme: Nutzung der Abwärme von Erzeugungs- und Wandlungsprozessen, sowie verstärkter Einsatz von Wärmepumpen.

Sektor Mobilität: Übergang auf Elektromobilität und Mobilitätsdienstleistungen.

Frage 2.3.3: Windanlagen: Wie hält man die Leistungsabgabe einer Windkraftanlage über einen großen Bereich der Windgeschwindigkeit konstant und wie schützt man die Anlage außerhalb der nutzbaren Windgeschwindigkeiten?

Lösung: Windkraftanlagen arbeiten erst ab einer Mindest-Windgeschwindigkeit. Darüber allerdings steigt die Leistung mit der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit, so dass bei großen Geschwindigkeiten und Böen der Generator überlastet wird und die Kräfte auf die Flügel und den Turm zu groß werden. Zwei Methoden sind verbreitet: die Begrenzung durch Strömungsabriss (veränderlicher Leistungsbeiwert, Stall-Effekt = Strömungsabriss) und die Blattanstellwinkelverstellung (Pitch-Regelung).

Außerhalb der zulässigen Windgeschwindigkeiten wird der Rotor mit einer Bremse stillgesetzt. Haben die Flügel keine Blattverstellung, kann die Gondel um 90° aus dem Wind gedreht werden.

Frage 2.3.4: Solaranlagen.

(1) Angebot und Nachfrage: Was können wir aus dem täglichen Lastgang eines Haushalts und dem Photovoltaik-Tagesangebot für eine dezentrale Energieversorgung und die Versorgung des Haushalts folgern?

(2) Ertrag einer Solaranlage: Welche geografischen und technischen Faktoren beeinflussen den Ertrag einer Photovoltaik-Anlage? Welche Rolle spielen wirtschaftliche Faktoren?

Lösung: (1) Angebot und Nachfrage: Ein Haushalt braucht rund um die Uhr Strom (Kühlschrank, Heizungsumwälzpumpen, etc.) mit Spitzenzeiten am Morgen Mittag und Abend. Die Leistung der Photovoltaik folgt der Sonneneinstrahlung, d.h. liefert nachts überhaupt nichts, aber dafür mittags einen Überschuss.

Der Überschuss entsteht zu einem Teil der Spitzenzeiten und entlastet die Netze durch die lokale Einspeisung und reduziert die Kosten der Spitzenstromerzeugung.

Weil der Haushalt aber auch außerhalb der Sonneneinstrahlungszeiten Strom verbraucht und Wärme braucht, ist eine lokale Speicherung zur Erhöhung der Autarkie erforderlich.

(2) Ertrag: Geografische Faktoren umfassen die geografische Breite des Standorts der Anlage, sowie das lokale Klima und eine evtl. Beschattung durch Gebäude, Bäume o.ä.

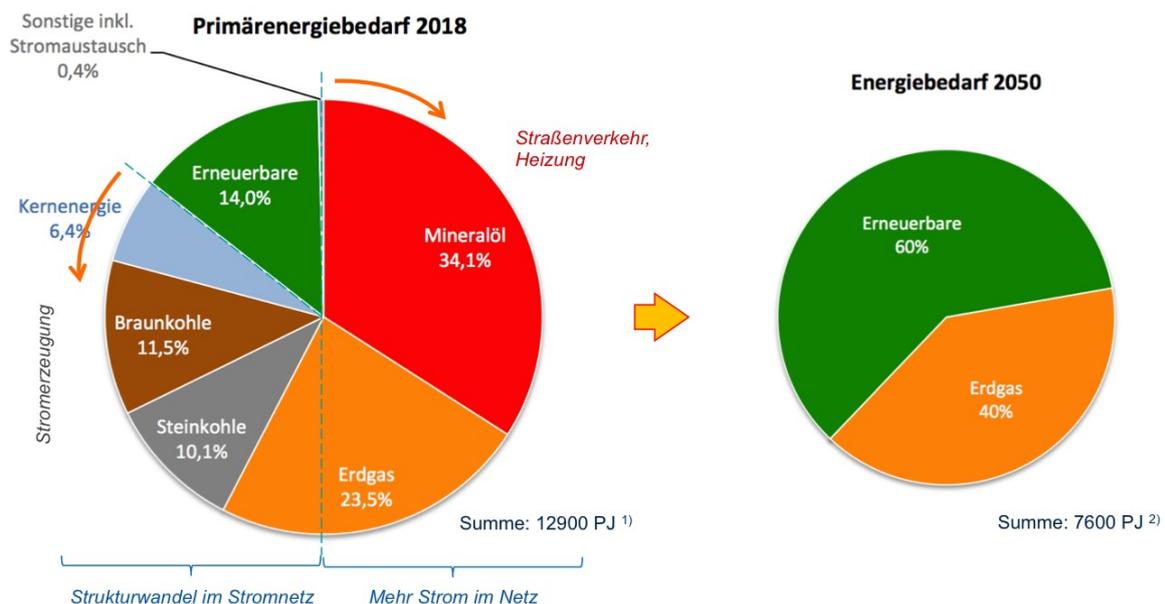
Technische Faktoren sind die Neigung der Module, eine evtl. Nachführung, der Wirkungsgrad der Wechselrichter und das Material der Module.

Ganz erheblichen Einfluss haben die Kapitalkosten: Ist die Zinsrate hoch, wird es schwierig, die Investitionen über der Betriebsdauer zu erwirtschaften. Dieses Argument kann technische Argumente leicht aushebeln.

2.4. Energiebilanz Mineralöl

In Deutschland wurde im Jahr 2018 ein Anteil von 34% der Primärenergie aus Mineralöl gedeckt, wie in folgender Grafik links dargestellt. Der Gesamtenergiebedarf betrug 12900 PJ.

Bemerkung: Für das Jahr 2020 sind die Anteile an der Primärenergie Mineralöl 33,7%, Erdgas 26,6%, Steinkohle 7,7%, Braunkohle 8,1%, Kernenergie 6%, Erneuerbare Energien 16,6% Sonstige 1,3%. Diese Anteile beziehen sich auf einen Gesamtbedarf von insgesamt 11,691 PJ [21]. Die größte Quelle von CO₂-Emissionen bleibt in Deutschland somit das Mineralöl.



Primärenergiebedarf in Deutschland heute und künftiger Energiebedarf

Frage 2.4.1: Welcher Energiemenge in TWh entspricht dieser Anteil?

Lösung: $1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J}$, somit $1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J}$. 34% von $12900 \text{ PJ} = 4386 \text{ PJ} = 1218 \text{ TWh}$.

Frage 2.4.2: Der Energiegehalt eines Liters Brennstoff beträgt ca. 10 kWh . Ein Liter Brennstoff wiegt ca. 850 g . Mineralöl ist ein Kohlenwasserstoff, besteht also aus Ketten von Kohlenstoff und Wasserstoff. Die Menge an Wasserstoff-Teilchen beträgt etwas mehr als das Doppelte des Kohlenstoffs (Ketten von CH_2 mit zusätzlichen H an den Enden). Mit einer molaren Masse von 1 g für Wasserstoff gegenüber 12 g für Kohlenstoff sei die Masse des Wasserstoffs näherungsweise vernachlässigt. Welche Masse an CO_2 wird näherungsweise aus einem Liter Brennstoff freigesetzt? Welche Menge an CO_2 wird insgesamt freigesetzt? Hinweis: Die molare Masse von Sauerstoff beträgt 16 g .

Lösung: $1 \text{ Liter Brennstoff}$ entspricht 850 g und besteht näherungsweise aus Kohlenstoff. Pro Kohlenstoff Anteil kommen bei CO_2 zwei Anteile Sauerstoff dazu. Hierdurch vergrößert sich die Masse von annähernd 12 g auf insgesamt $12 \text{ g} + 2 \times 16 \text{ g} = 44 \text{ g}$. Somit entstehen aus 850 g (= 1 Liter) Brennstoff annähernd $3,1 \text{ kg CO}_2$.

(2) Beim gegebenen Energiegehalt von 10 kWh/l entsprechen 1218 TWh insgesamt $121,8 \cdot 10^9 \text{ l Brennstoff}$ und somit ca. $100 \cdot 10^9 \text{ kg} = 100 \text{ Mio t Brennstoff}$. Bei der Verbrennung entstehen somit ca. 310 Mio t CO_2 .

Näherung: Berücksichtigt man den Massenanteil von 2 g Wasserstoff auf 12 g Kohlenstoff , sollte man die Masse um einen Faktor $1/6$ reduzieren, und somit auch den Umrechnungsfaktor: $5/6 \cdot 310 = 258$. Aus $100 \text{ Mio t Brennstoff}$ entstehen somit ca. 260 Mio t CO_2 .

Frage 2.4.3: Mineralöl als Primärenergieträger wird hauptsächlich für den Straßenverkehr (Diesel, Benzin), sowie zum Heizen (Heizöl) verwendet. Welchen Anteil an elektrischer Energie müssten die Stromnetze zusätzlich bereitstellen, wenn man stattdessen auf Elektrofahrzeuge bzw. Wärmepumpen umsteigt? Begründen Sie Ihre Abschätzung.

Lösung: Wenn man einen Wirkungsgrad von ca. 30% für den Anteil der Nutzenergie für den Verkehr annimmt, müsste nur dieser Anteil vom Stromnetz bereit gestellt werden, unter der Annahme, dass elektrische Antriebe annähernd ideal arbeiten. Für Wärmepumpen müsste nur ein Anteil von schätzungsweise 30% durch Strom bereit gestellt werden, da die Wärme der Umgebung entnommen wird. Somit müssten anstelle der in Frage 1 berechneten 1218 TWh nur 365 TWh an elektrischer Energie bereit gestellt werden.

Frage 2.4.4: Energiebilanz der Verbrennung. Für die Bildungsenthalpien der beteiligten Substanzen finden sich folgende Werte:

- Kohlendioxid (gasförmig) CO_2 : -394 kJ/Mol
- Wasserdampf (ca. 25 °C) H_2O : -242 kJ/Mol .

Wie erklärt sich hieraus der Heizwert von Dieseldieselkraftstoff, wenn man pro Mol die Strukturformel $\text{C}_{16}\text{H}_{34}$ voraussetzt? Welche Menge an Wasser entsteht bei der Verbrennung? Welchen Anteil an der gewonnenen Energie hat der im Brennstoff enthaltene Wasserstoff?

Lösung: Bei der Verbrennung wird Sauerstoff aus der Luft zugefügt. Pro Mol Diesel entstehen:

- 16 Mol CO_2 mit insgesamt -6304 kJ
- $17 \text{ Mol H}_2\text{O}$ mit insgesamt -4114 kJ .

Pro Mol Brennstoff werden ca. 10 MJ freigesetzt. 1 Mol Brennstoff entspricht einer Masse von $16 \times 12 \text{ g} + 34 \times 1 \text{ g} = 226 \text{ g} \hat{=} 0,226 \text{ l}$. Somit erhält man pro Liter Brennstoff ca. $40 \text{ MJ} = 11 \text{ kWh}$.

Bei der Verbrennung entstehen pro Liter Brennstoff ca. $69 \text{ Mol Wasser} = 69 \times 18 \text{ g} = 1,2 \text{ kg}$. Die Berechnung berücksichtigt nicht die tatsächliche Temperatur des Wasserdampfes.

Der Energieanteil der Verbrennung von Wasserstoff beträgt $4114 \text{ kJ} / (6304 \text{ kJ} + 4114 \text{ kJ}) = 39,4\%$. Ein wesentlicher Anteil an der gewonnenen Energie ist somit dem Wasserstoff zuzuschreiben.

Bemerkung: Unter dem Begriff Heizwert versteht man die bei der Verbrennung freigesetzte Energie, wenn das entstandene Wasser als Wasserdampf freigesetzt wird, also gasförmig. Wasserdampf enthält mehr Energie als der zu Wasser kondensierte Dampf (siehe Bildungsenthalpien für gasförmiges Wasser -242 kJ/Mol und flüssiges Wasser -286 kJ/Mol). Kondensiert man des Wasserdampf bei der Verbrennung, spricht man vom Brennwert.

2.5. Kraftstoffe für die Elektromobilität

In Deutschland wird im Straßenverkehr (LKW und PKW) jährlich eine Menge Treibstoff verbraucht, der insgesamt einer Energiemenge von ca. 700 TWh entspricht.

Frage 2.5.1: Würde man von Verbrennungsmotoren komplett auf batteriebetriebene Elektromotoren umsteigen, welche Energiemenge müsste das Stromnetz zusätzlich bereitstellen? Begründen Sie Ihre Abschätzung.

Lösung: Da Elektromotoren mit sehr hohem Wirkungsgrad arbeiten, müsste nur der Anteil der Nutzenergie als elektrische Energie bereit gestellt werden. Wenn man den Wirkungsgrad von Verbrennungsmotoren mit 25% abschätzt, wären dies ca. 175 TWh.

Frage 2.5.2: Welche Auswirkungen ergeben sich im Fall 2.4.1 für die Stromnetze? Wann ist der Einsatz batteriebetriebener Fahrzeuge ökologisch sinnvoll?

Lösung: Die berechnete Energiemenge muss zusätzlich produziert und transportiert werden. Hierbei kommt es auf die zeitliche Verteilung an: können alle Fahrzeuge nachts geladen werden, bekommt man die Energiemenge problemlos unter. Ladespitzen im Verbrauch müssen vermieden werden (z.B. wenn alle Fahrzeuge nach Feierabend gleichzeitig geladen werden sollen), indem ein Lastmanagement eingeführt wird, das für eine zeitliche Verteilung der Last sorgt.

Ökologisch sinnvoll ist der Einsatz batteriebetriebener Elektrofahrzeuge dann, wenn der Strom emissionsfrei erzeugt wird, z.B. aus erneuerbaren Energien.

Frage 2.5.3: Brennstoffzelle. Statt mit Batterie lässt sich ein Elektrofahrzeug auch mit einer Brennstoffzelle betreiben. Hierbei wird die benötigte elektrische Energie aus einer sogenannten „kalten“ Verbrennung von Wasserstoff erzeugt. Die Reaktion verläuft umgekehrt zur Elektrolyse von Wasser, d.h. aus Wasserstoff und Sauerstoff entsteht Wasser. Welche Menge Wasserstoff wird für eine Energiemenge von 100 kWh benötigt, wenn die Bildungsenthalpie von Wasser -242 kJ/Mol beträgt?

Lösung: $100 \text{ kWh} = 3600 \cdot 100 \text{ kWh} = 360 \text{ MJ}$. Somit werden $360 \text{ MJ} / (242 \text{ kJ/Mol}) = 1487 \text{ Mol H}_2$, entsprechend 2,975 kg. Hierbei sind ideale Wirkungsgrade vorausgesetzt.

Frage 2.5.4: Brennstoffzelle und Batterie. Vergleichen Sie Elektrofahrzeuge mit Batterie und Brennstoffzelle bzgl. der Auswirkungen auf die Stromnetze. Wann ist der Einsatz von Fahrzeugen mit Brennstoffzelle ökologisch sinnvoll?

Lösung: Der Einsatz von Brennstoffzellen muss keinen Einfluß auf den Transport elektrischer Energie im Netz haben, wenn Wasserstoff durch Elektrolyse dort erzeugt wird, wo elektrische Energie im Überfluss vorhanden ist (z.B. in der Nähe von Windparks). Ökologisch sinnvoll ist der Betrieb, wenn Wasserstoff z.B. aus der Elektrolyse von Wasser mit Strom aus erneuerbaren Energien erzeugt wird.

Frage 2.5.5: Synthetische Kraftstoffe. Wasserstoff bzw. aus Wasserstoff erzeugtes Erdgas (Methan) lässt sich zu synthetischen Kraftstoffen weiter verarbeiten. In diesem Fall ist der Einsatz von Verbrennungsmotoren weiterhin möglich. Vergleichen Sie diese Lösung mit batteriebetriebenen Fahrzeugen bzw. mit Fahrzeugen mit Brennstoffzellen bzgl. der ökologischen Bilanz.

Lösung: (1) Erzeugung der synthetischen Brennstoffe: mit schlechterem Wirkungsgrad als bei der Batterie und bei der Brennstoffzelle, da bei der Erzeugung von Methan aus Wasserstoff ca. 20% der Energie in Wärme umgesetzt wird und die Kette insgesamt weitere Verluste hat. (2) Ein Verbrennungsmotor als thermische Maschine setzt nur ca 25% der bei der Verbrennung erzeugten Wärme in Bewegungsenergie um. (3) Wird der Brennstoff aus erneuerbaren Erzeugern hergestellt, bleibt die Kette zwar emissionsfrei, benötigt insgesamt allerdings ein Vielfaches der elektrischen Energie eines Elektrofahrzeugs.

Frage 2.5.6: Ein Start-up Unternehmen hat die Idee, Strom für Elektrofahrzeuge aus einem Diesel-Aggregat zu erzeugen, das mit synthetischem Brennstoff versorgt wird. Der Diesel-Generator arbeitet unabhängig von Stromnetz und lässt sich somit überall aufstellen. Wie beurteilen Sie diese Geschäftsidee mit Blick auf die Ökobilanz?

Lösung: Siehe Verbrennungsmotor mit synthetischem Brennstoff oben. Zwar emissionsfrei, jedoch mit sehr hohem Energiebedarf (ein Vielfaches) im Vergleich zum direkten Laden des Fahrzeugs mit emissionsfrei erzeugtem Strom aus dem Netz. Der schlechte Wirkungsgrad sollte sich im Preis des Brennstoffs im Vergleich zum Strompreis aus dem Netz niederschlagen.

2.6. Stahl, Beton und Aluminium

Weltweit haben die Stahlproduktion, Zementproduktion und die Gewinnung von Aluminium und Kupfer einen maßgeblichen Anteil an den Emissionen an Kohlendioxid: Derzeit erzeugen sie insgesamt 22% der CO₂-Emissionen. Behält man das heutige Niveau der Produktion bei, sind die weltweiten Vorräte an Eisenerz innerhalb der kommenden 70 Jahre erschöpft.

Stahl und Beton werden vorwiegend in der Bauindustrie eingesetzt. Hier kommen weitere Emissionen durch den Transport, den Bau und den Betrieb der Gebäude hinzu. Insgesamt ist die Bauindustrie nach den heute vorwiegenden Standards die größte Quelle von CO₂-Emissionen. Abhilfe schafft hier die Verwendung von Stoffkreisläufen (Wiederverwendung von Material), alternative Konzepte beim Bau, sowie die Verwendung von Strom aus erneuerbaren Energien im Erzeugungsprozess.

Stahlerzeugung

Nach den heutigen industriellen Prozessen werden bei der Produktion pro Tonne Stahl im Mittel 2 Tonnen CO₂ freigesetzt. Bei einer jährlichen Produktion von ca. 1.8 Milliarden Tonnen Stahl entspricht das 3,6 Milliarden Tonnen CO₂ und somit ca. 10% der weltweiten CO₂-Emissionen heute. Der Bedarf an Stahl wird weltweit in den kommenden Jahrzehnten wachsen. Hierbei sind weder die Emissionswerte vereinbar mit den Klimazielen, noch sind die weltweiten Erzvorkommen für eine dauerhafte Bewirtschaftung ausreichend. Mit den heutigen Produktionsraten wären die bekannten Erzvorkommen in den kommenden 70 Jahren erschöpft [17].

Abhilfe schafft eine nachhaltigere Bewirtschaftung, die einen höheren Anteil von Altmetall in den Stoffkreislauf bringt. Hierdurch entfällt ein Großteil der Emissionen für die Verhüttung von Erzen. Sofern die Schmelzöfen mit Strom aus erneuerbaren Erzeugern betrieben werden, ist dieser Teil der Produktionskette emissionsfrei. Weiterhin lässt sich Wasserstoff aus erneuerbaren Energien als Ersatz für Kohle und Erdgas einsetzen. Je nach verwendeten Verfahren besteht ein Einsparpotenzial an CO₂-Emissionen zwischen 40% und über 95%.

Frage 2.6.1: Die Prozesskette der Stahlerzeugung verwendet einerseits Roheisen aus Erz, andererseits Altmetall. Nach Produktionsmethoden geordnet beträgt der Anteil aus Schmelzöfen mit Sauerstoffeinblasung (engl. Basic Oxygen Furnace) heute ca. 70%, der verbleibende Anteil von 30% stammt überwiegend aus Lichtbogenöfen [16] (engl. Electric Arc Furnace).

Die Prozessschritte haben folgende Stoffbilanzen pro t Stahl:

- Eisenerzeugung: Reduktion von Erz (Eisenoxid) zu Roheisen mit Hilfe von Kohlenstoff: ca. 1 t CO₂

- Stahlerzeugung durch
 - Schmelzöfen mit Sauerstoffeinblasung: vorwiegend aus Roheisen, ca 0,8 t CO₂.
 - Lichtbogenöfen: vorwiegend aus Altmetall, ca. 0,3 t CO₂.
- Vorverarbeitung des Erzes (Sintermaterial, Pellets) und Kokserzeugung: ca. 1,2 t CO₂.

Welche Menge an CO₂ werden pro Tonne Stahl freigesetzt, je nachdem, welche Verfahren verwendet werden?

Lösung: Mit diesen Prozessen reicht die Skala der Emissionen von 0,3 bis 3 t CO₂ pro t Stahl, wobei man mit den heutigen Produktionsmethoden im Mittel mit 2 t rechnen muss. Am unteren Ende der Skala findet sich die Stahlerzeugung mit Hilfe von Lichtbogenöfen vorwiegend aus Altmetall; am oberen Ende der Skala die Stahlerzeugung aus Erz mit Hilfe von Schmelzöfen.

Frage 2.6.2: Die wesentlichen Potenziale zur Verringerung der CO₂-Emissionen bestehen in der Verwendung von Wasserstoff statt Kohlenstoff zur Reduktion von Eisenerz ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3 \text{H}_2$ (statt 3C) - $> 2 \text{Fe} + 3 \text{H}_2\text{O}$ (statt 3CO_2)) und in der Verwendung von mehr Altmetall aus dem Stoffkreislauf anstelle von Erz.

Worauf beruht die Einsparung von CO₂ beim Einsatz von Wasserstoff? Welche Einsparungen insgesamt lassen sich hierdurch erreichen? Bewerten Sie die Möglichkeiten zur dauerhaften und emissionsfreien Stahlerzeugung.

Lösung: Wasserstoff übernimmt die Rolle von Kohlenstoff als Reduktionsmittel und bindet den Sauerstoff. Statt CO₂ entsteht H₂O, also Wasser. In der Prozesskette (siehe Frage 2.6.1, Reduktion von Erz zur Erzeugung von Eisen) spart man 1t CO₂ pro Tonne Stahl.

In beiden Fällen ist die zunehmende Verwendung von Lichtbogenöfen anstelle von Hochöfen und Schmelzöfen mit Sauerstoffeinblasung die Konsequenz.

Wegen der begrenzten Ressourcen ist die Verwendung zunehmend geschlossener Stoffkreisläufe unverzichtbar: Die weltweit bekannten Vorkommen an Eisenerz betragen ca. 170 Milliarden Tonnen. Bei Förderraten von derzeit 2,5 Milliarden Tonnen Erz im Jahr sind diese Vorräte in 70 Jahren erschöpft [17]. Hinweis: Derzeit werden 70% des jährlich produzierten Stahls aus primären Vorräten (Erz) gewonnen.

Zementproduktion

Weltweit werden heute ca. 4,6 Milliarden Tonnen Zement produziert [19]. Mit den heutigen Produktionsmethoden entstehen jährlich über 3 Milliarden t CO₂, entsprechend ca. 8% der weltweiten CO₂-Emissionen. Zement wird vorwiegend als Baustoff in Kombination mit Stahl eingesetzt.

Produziert wird Zement durch Brennen von Kalkstein. Hierdurch wird der im Kalk gebundene Kohlenstoff und Sauerstoff als CO₂ freigesetzt (Calciumkarbonat, $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$). Dieser Prozess ist mit ca 0,8 t CO₂ pro t Kalziumoxid (CaO, gebrannter Kalk) verbunden.

Dem Kalkstein werden Ton, und Sand (SiO₂ und Al₂O₃) sowie Eisenerz (Fe₂O₃) zugemischt. Zement enthält außerdem Beimischungen wie Gips (CaSO₄), so dass der Anteil an CaO ca. 60% beträgt. Die pro t Zement beim Brennen freigesetzte Menge an CO₂ fällt hierdurch geringer aus.

Zusätzliches CO₂ wird durch fossile Brennstoffen (Kohle) beim Brennen freigesetzt, sowie durch den Energieaufwand zum Brechen, Zerkleinern und Mahlen. Insgesamt erhält man mit heutigen Produktionsmethoden ein Verhältnis von ca. 0,6 bis 0,8 t CO₂ pro t Zement.

Frage 2.6.3: Welche Maßnahmen zur Verringerung der CO₂-Emissionen kommen in Frage?

Lösung:

Ein Ansatz zur Verringerung der CO₂-Emissionen bei der Produktion sind Einsparungen bzw. der Verzicht auf fossile Brennstoffe beim Brennen (= Brennstoffemissionen). Andere Ansätze gehen in Rich-

tung der Reduktion des Anteils an gebranntem Kalk (CaO) am Zement, bzw. in der Abscheidung und Speicherung bzw. Verwertung des freigesetzten CO₂ (= Prozessemissionen). Darüber hinaus bleiben Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz.

Insgesamt bleibt Zement problematisch wegen des im Kalkstein gebundenen CO₂, das beim Brennen freigesetzt wird. Abscheiden und Speichern des CO₂ wäre eine Möglichkeiten zur Reduktion der Emissionen in die Luft, sowie der Einsatz alternativer Materialien beim Bau (z.B. Holz).

Aluminium

Die Aluminiumproduktion beträgt heute weltweit ca. 65 Millionen Tonnen Reinaluminium aus Aluminium-Hütten, zusätzlich ca. 20 Millionen t aus Altmittel. Verwendet wird Aluminium vorwiegend im Bauwesen, im Transport und im Maschinenbau (hierunter auch Kabel).

Bei der Produktion aus Erz wird in Raffinerien Aluminiumoxid (Al₂O₃) gewonnen, wobei die 1,5-fache Menge an Rückständen (Rotschlamm) anfällt. Das Aluminiumoxid wird in Aluminiumhütten in einem Elektrolyseverfahren zu Aluminium reduziert, wobei eine Energie von 15,7 MWh pro t Aluminium erforderlich ist. Für die Gewinnung von Aluminium aus Altmittel ist nur etwa ein Anteil von 5% dieser Energiemenge erforderlich.

Der Einsatz für die jährliche Produktion von Aluminium aus Oxid heute beträgt somit ca. 1000 TWh an elektrischer Energie. Hierbei verbrennt der bei der Reduktion freiwerdende Sauerstoff mit dem Kohlenstoff der Kathode, es wird CO₂ freigesetzt ($2 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 3 \text{ C} \rightarrow 4 \text{ Al} + 3 \text{ CO}_2$). Pro t Aluminium entstehen somit 1,2 t CO₂ an Prozessemissionen bei der Verhüttung.

Wird bei der Elektrolyse Strom aus Kohlekraftwerken verwendet, muss man den thermischen Energieeinsatz gegenüber der benötigten elektrischen Energie etwa verdreifachen und mit ca. 170 GJ pro t Aluminium rechnen. Bei der Gewinnung diese Energiemenge aus der Verbrennung von Kohle werden 19 t CO₂ freigesetzt. Zusammen mit der Elektrolyse wären mit mehr als 20 t CO₂ pro t Aluminium an Emissionen rechnen. Hinzu kommt der Energiebedarf der Erz-Raffinerien.

Für die jährliche Produktion von Aluminium aus Erz betragen die jährlichen CO₂-Emissionen insgesamt über 1,3 Milliarden t CO₂, entsprechend ca. 4% der weltweiten CO₂-Emissionen heute.

Frage 2.6.4: Welche Maßnahmen zur Verringerung der CO₂-Emissionen kommen in Frage?

Lösung: Einsparpotenziale bestehen hier vor allem bei den Brennstoffemissionen durch den Einsatz von Grünstrom für die Elektrolyse und in der Erhöhung des Anteils an Altmittel im Stoffkreislauf.

Die Rolle der Stromnetze

In der Industrie insgesamt (Eisen und Stahl, Zement, Chemische Industrie einschließlich Mineralöl, Aluminium und Papier) beträgt der Anteil elektrischer Energie am gesamten Energieeinsatz heute ca. 14%. Für eine Bewirtschaftung mit weniger Emissionen soll dieser Anteil nach den Szenarien der IRENA [3] bis zum Jahr 2050 mehr als 63% betragen. Das entspricht einem Wachstum von 450%.

Hierbei soll ein Anteil von ca 40% der elektrischen Energie direkt selber erzeugt werden (z.B. Solaranlagen und Biomasse für Heizung und Prozesswärme), der Rest aus den Stromnetzen bezogen werden. Bei einem gesamten Energiebedarf von ca 140 EJ pro Jahr vom Segment Industrie beträgt der Anteil an der weltweiten Stromproduktion dann annähernd 25% (von heute ca. 9%), wobei die Erzeugung elektrischer Energie in dieser Zeit insgesamt um 50% wachsen wird.

Hierdurch fördert man einerseits Prozesse mit weniger Emissionen und höherem Anteil am Stoffkreislauf (wie z.B. Lichtbogenöfen), zum anderen wird elektrische Energie aus erneuerbaren Quellen eingesetzt, die somit emissionsfrei ist. Hierzu zählt auch die Verwendung von „grünem“ Wasserstoff, d.h. Wasserstoff aus Elektrolyse.

Als saubere Energie spielen im Industriesegment die elektrische Energie und somit die Stromnetze eine zentrale Rolle. Hierdurch ergeben sich neue Anforderungen sowohl bei der Aufrüstung bzw. Umrüstung der Industrieanlagen, als auch in den Stromnetzen. Ein Übersichtsartikel über Stahl, Beton und Aluminium findet sich in [20].

2.7. Kohle und Erdgas

Als Alternative zur Kohle bei der Stromerzeugung wird Erdgas eingesetzt. Erdgas ist auch als Heizung eine Alternative zur Ölheizung und zum Kohleofen. In beiden Fällen wird ein fossiler Brennstoff eingesetzt: Kohle besteht vorwiegend aus Kohlenstoff (C), Erdgas (Methan, CH₄) ist ein einfacher Kohlenwasserstoff.

Frage 2.7.1: CO₂-Emissionen. Halten Sie Kohle und Erdgas bei vergleichbarer Menge an Wärmeenergie bzw. der Kohlendioxid-Emissionen für gleichwertig? Begründen Sie Ihre Aussage.

Lösung: Beim Erdgas wird Energie aus der Verbrennung von Kohlenstoff und Wasserstoff gewonnen; bei der Kohle verbrennt nur Kohlenstoff. Für die gleiche Energiemenge aus der Verbrennung sollte Kohle daher Kohle mehr CO₂ freisetzen.

Frage 2.7.2: Erstellen Sie die Strukturformel für die Verbrennung von Kohle und Erdgas.

Lösung: (1) Kohle: $C + O_2 \leftrightarrow CO_2$, (2) Erdgas: $CH_4 + 2 O_2 \leftrightarrow CO_2 + 2 H_2O$

Bei der Verbrennung von Erdgas entstehen neben einem Anteil Kohlendioxid (CO₂) zwei Anteile Wasser (H₂O). Hierzu wird ein zusätzlicher Anteil O₂ aus der Luft aufgenommen. Es oxidieren somit der Kohlenstoff und der Wasserstoff.

Frage 2.7.3: Energiebilanz der Verbrennung. Für die Bildungsenthalpien der beteiligten Substanzen finden sich folgende Werte:

- Kohlendioxid (gasförmig) CO₂: -394 kJ/Mol
- Wasserdampf (ca. 25 °C) H₂O: - 242 kJ/Mol.

Berechnen Sie hieraus die Menge an Energie (1) bei der Verbrennung pro Mol Kohlenstoff, (2) bei der Verbrennung von 1 Mol Erdgas.

Lösung:

(1) Kohlendioxid: Unmittelbar aus der Enthalpietabelle ergibt sich ein Energiebetrag von 394 kJ/Mol.

(2) Erdgas: Aus der Enthalpietabelle nimmt man die Energie für einen Anteil CO₂ und zwei Anteile Wasser (H₂O), somit $394 \text{ kJ/Mol} + 2 \times 242 \text{ kJ/Mol} = 878 \text{ kJ/Mol}$.

Pro Mol Erdgas wird somit mehr als die doppelte Energiemenge freigesetzt als pro Mol Kohlenstoff.

Frage 2.7.4: Berechnung der CO₂-Emissionen. Berechnen Sie die CO₂-Emissionen bei der Verbrennung von Kohle und Erdgas für eine vergleichbare Energiemenge.

Lösung: Siehe Aufgabe 2.7.3, wenn man die Ergebnisse auf die Energiemenge bezieht. Im Verhältnis ergeben sich pro Mol Kohlenstoff in Erdgas im Verhältnis zu 1 Mol Kohlenstoff in Kohle: $878/394 = 2,3$.

Interpretation: Bei der Verbrennung von Erdgas liefert die Menge den enthaltenen Wasserstoffs etwas mehr Energie als die Verbrennung des enthaltenen Kohlenstoffs. Für die gleiche Energiemenge als im Erdgas würde man somit die 2,3 fache Menge an Kohle (bzw. Kohlenstoff) benötigen. Somit würde auch die 2,3-fache Menge an CO₂ freigesetzt.

2.8. Wasserstoff

Wasserstoff lässt sich durch Elektrolyse aus überschüssigem Strom herstellen. Somit lässt sich ein beispielsweise ein Überangebot an Windenergie sinnvoll nutzen, indem Wasserstoff erzeugt wird. Der Wasserstoff kann als Gas gespeichert oder transportiert werden, bzw. weiterverarbeitet werden zu Erdgas. Erdgas (CH₄) lässt sich leichter speichern als Wasserstoff, bzw. in beliebigen Mengen in die Gasnetze einspeisen.

Wegen der Möglichkeiten zum Transport lassen sich Erzeugung und Verbrauch räumlich trennen: So könnten Wasserstoff oder Erdgas in sonnenreichen Gebieten aus Solarenergie erzeugt werden und eine Alternative zu fossilen Brennstoffen bieten.

Für die Energiegewinnung kann Wasserstoff in Brennstoffzellen wieder in Elektrizität gewandelt werden. Speziell in Form von Erdgas wäre eine Verwendung zur Wärmeabgewinnung (Heizung) möglich, sowie in konventionellen Gas- und Dampfkraftwerken.

In der Literatur finden sich folgende Strukturformeln und Enthalpien:

- Elektrolyse: $4 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 4 \text{ H}_2 + 2 \text{ O}_2$ 1143 kJ/Mol.
- Methanisierung: $\text{CO}_2 + 4 \text{ H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{ H}_2\text{O}$ -253 kJ/Mol
- Verbrennung Methan: $\text{CH}_4 + 2 \text{ O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{ H}_2\text{O}$ -893 kJ/Mol

Die Energiebilanzen sind in der angegebenen Richtung der Reaktion angegeben. Ein negatives Vorzeichen bedeutet hierbei freigesetzte Energie, positives Vorzeichen aufzuwendende Energie. Alle Prozesse sind reversibel, d.h. auch in der Gegenrichtung mit umgekehrter Energiebilanz möglich.

Bemerkungen: (1) Der Wert für die Elektrolyse von Wasser ergibt sich aus der Enthalpie für flüssiges Wasser bezogen auf 4 Anteile Wasser: $4 \cdot 285,83 \text{ kJ/Mol} = 1143 \text{ kJ/Mol}$. (2) Der Wert für die Methanisierung lässt sich aus den Bildungsenthalpien von Kohlendioxid, Methan und Wasser berechnen: $+394 \text{ kJ/Mol} (\text{CO}_2) - 2 \cdot 286 \text{ kJ/Mol} (\text{H}_2\text{O}) - 75 \text{ kJ/Mol} (\text{CH}_4) = -253 \text{ kJ/Mol}$. Die Vorzeichen ergeben sich aus der Richtung der Reaktion (Verbrennung von Wasserstoff, Reduktion von Kohlendioxid).

Frage 2.8.1: Elektrolyse. Es sei angenommen, dass sich Wirkungsgrade bis 80% realisieren lassen, um Wasser mit Hilfe von Strom in Wasserstoff und Sauerstoff zu zerlegen. Eine Anlage hat eine Leistung von 20 MW und kann im Jahr 3000 Stunden mit dieser Leistung betrieben werden. Welche Energiemenge lässt sich in Wasserstoff umsetzen? Wie viel Wasserstoff wird erzeugt?

Lösung: (1) Energiemenge pro Anlage und Jahr: 60 GWh.

(2) Wasserstoffherzeugung: Umgesetzt werden 80% der Energiemenge aus (1) gleich 48 GWh.

Für die Umwandlung in Joule gilt: $1 \text{ Ws} = 1 \text{ J} = 1 \text{ Nm}$. Somit entsprechen $48 \text{ GWh} = 48 \cdot 3600 \text{ GWs} = 173 \text{ TJ}$. Hieraus lassen sich 0,15 GMol Wasserstoff (in der Menge 4 H_2 aus der Strukturformel oben) erzeugen. Umgerechnet in H_2 ergeben sich somit 0,6 GMol H_2 .

Bemerkung: Die Masse pro Mol H_2 beträgt 2g. Somit werden insgesamt $1,2 \cdot 10^9 \text{ g H}_2 = 1200 \text{ t H}_2$ erzeugt. Das Volumen eines Gases unter Normalbedingungen beträgt 22,4 l/Mol. Unkomprimiert entsprechen 0,6 GMol H_2 somit ca. 13 Millionen $\text{m}^3 \text{ H}_2$. Die hierzu benötigte Wassermenge beträgt 0,6 GMol H_2O . Wasser besitzt eine molare Masse von 2 g für H_2 + 16 g für 1 Atom O = 18 g. Somit werden $0,6 \cdot 10^9 \cdot 18 \text{ g} = 10.800 \text{ t Wasser}$ benötigt, also etwa $10.800 \text{ m}^3 \text{ Wasser}$.

Frage 2.8.2: Brennstoffzelle. Es sei angenommen, dass die Brennstoffzelle als umgekehrte Elektrolyse funktioniert und hierbei einen maximalen Wirkungsgrad von 80% erzielt. Welcher Wirkungsgrad ergibt sich insgesamt von der Speicherung elektrischer Energie (über Elektrolyse) zur Erzeugung (aus Brennstoffzellen)? Welche Rolle spielt der Wirkungsgrad bei überschüssigen Strom aus Windanlagen oder Solaranlagen? Welche Voraussetzungen gelten für die Standorte von Brennstoffzellen?

Lösung: (1) $0,8 \cdot 0,8 = 0,64$. Es verbleibt somit ein Wirkungsgrad von 64%.

(2) Der Wirkungsgrad spielt keine Rolle. Es gibt weder Brennstoffkosten noch Emissionen für den Strom. Die Alternative wäre, den Überfluss abzuregeln und somit nicht zu nutzen.

(3) Standorte von Brennstoffzellen: Mit Rücksicht auf den Netzausbau entweder direkt am Ort der Erzeugung (Nutzung der vorhandenen Anschlusskapazität, die bei mangelndem Angebot aus Wind oder Sonne nicht ausgeschöpft wird), oder nahe am Ort des Energiebedarfs. Im zweiten Fall muss der Wasserstoff an den Ort der Erzeugung transportiert werden.

Frage 2.8.3: Methanisierung. Welcher Anteil an Energie verbleibt im Erdgas, gemessen an der ursprünglich bei der Elektrolyse eingesetzten elektrischen Energie?

Lösung: Die Methanisierung ist exotherm; sie setzt einen Teil der Energie aus dem Wasserstoff frei. Bezogen auf den Wasserstoff beträgt dieser Anteil als Verlust $253 \text{ kJ/Mol} / 1143 \text{ kJ/Mol} = 22\%$. Es verbleiben somit ca 80% der Energie des Wasserstoffs im Methan.

Bezogen auf die ursprünglich eingesetzte elektrische Energie muss der Wirkungsgrad der Elektrolyse mitgerechnet werden. Insgesamt erhält man also für Methan aus Strom eine Ausbeute von ca. 64%.

Bemerkung: Die bei der Methanisierung freiwerdende Wärme kann ggf. als Prozesswärme für die Industrie oder als für Heizungen bzw. als Fernwärme eingesetzt werden.

Frage 2.8.4: Verbrennung von Methan. Das gewonnene Erdgas kann wie fossiles Erdgas für Heizungen oder in Gaskraftwerken zur Stromerzeugung eingesetzt werden. Welche Wirkungsgrade bezogen auf die ursprünglich eingesetzte elektrische Energie ergeben sich hiermit? Vergleichen Sie den Einsatz mit technischen Alternativen (beispielsweise Wärmepumpen zum Heizen und Brennstoffzellen zur Heizung bzw. zur Stromerzeugung).

Lösung: (1) Heizung: Wirkungsgrade Elektrolyse und Methanisierung ergeben insgesamt 64% bezogen auf die ursprünglich genutzte elektrische Energie. Eine elektrische Wärmepumpe würde die elektrische Energie unmittelbar einsetzen. Allerdings müsste die elektrische Energie hierfür durch die Stromnetze transportiert werden. Hier wäre also der erforderliche Netzausbau gegen die Wandlungsverluste und den Transport für das Erdgas abzuwägen, sowohl kommerziell als auch bzgl. der CO_2 -Bilanz.

(2) Stromerzeugung aus Erdgas: (2a) Gaskraftwerk: Wirkungsgrad 64% Strom zu Methan in Kombination mit einem Wirkungsgrad von 40% bis 60% für die Erzeugung von Strom mit Hilfe einer Wärmekraftmaschine (Gas-Kraftwerk), der höhere Wert in Kombination mit Fernwärme (Kraft-Wärme-Kopplung) ergeben insgesamt 26% bis 38%. (2b) Brennstoffzelle als Blockheizkraftwerk: Wirkungsgrad 64% Strom zu Methan in Kombination mit einem Wirkungsgrad von bis zu 100% für die Erzeugung von Strom und Heizwärme mit Hilfe einer Brennstoffzelle ergibt insgesamt ca. 64%.

(2c) Für eine Brennstoffzelle zur Stromerzeugung würde man Wasserstoff als Basis verwenden und erreicht somit ebenfalls 64% Gesamtwirkungsgrad.

3. Einführung in die Stromnetze

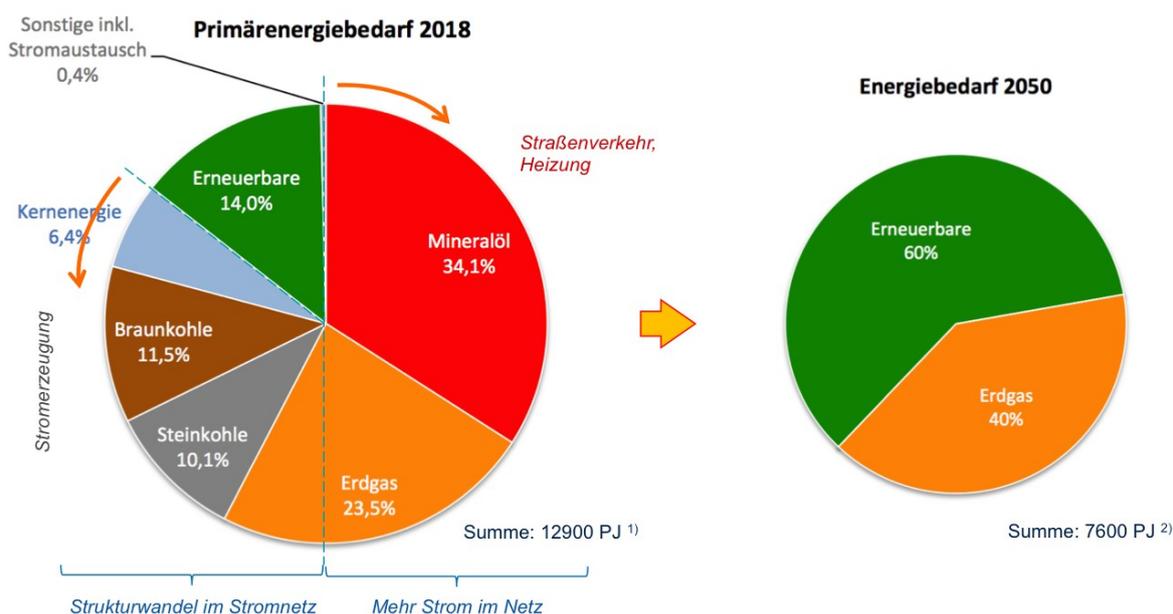
Dieser Abschnitt dient der allgemeinen Einführung in die Funktionsweise elektrischer Energieversorgungsnetze (umgangssprachlich: Stromnetze), motiviert aus deren Bedeutung für die Energiewende. Die wesentlichen technischen Begriffe werden hierbei erläutert.

3.1. Stromnetze als Schlüssel zur Energiewende

Dem Klimawandel lässt sich entgegenwirken, indem wir von fossilen Brennstoffen auf emissionsfreie Erzeuger und Verbraucher umsteigen. Im Zuge der Energiewende spielen die Stromnetze eine besondere Rolle: Strom lässt sich mit Windrädern und Solaranlagen emissionsfrei erzeugen. Elektrische Antriebe und Wärmepumpen stellen eine Alternative zu Verbrennungsmotoren und Heizungen mit fossilen Brennstoffen dar. Durch die Wasserstoffelektrolyse und Gaskraftwerke lassen sich Strom- und Gasnetz koppeln. Auf diese Weise treibt der Klimawandel die Entwicklung der Stromnetze. Welchen Einfluß hat die Energiewende auf die Netze?

Klimawandel und Energiewende

Die wichtigsten Energiequellen in Deutschland sind Mineralöl, Erdgas und Kohle. Erneuerbare Energien (EE) stellen heute immerhin 14% des Energiebedarfs bereit [1]. Betrachtet man Steinkohle und Braunkohle getrennt, sind EE somit der drittgrößte Energieträger in Deutschland. Bezugsgröße ist hierbei der Primärenergiebedarf, d.h. die Energie, die zur Erzeugung von Strom in Kraftwerken, bzw. zur Erzeugung von Bewegung oder Wärme erforderlich ist.



Stromerzeugung nach Energieträgern heute (Quelle [14]) und Hochrechnung für 2050

Gemessen an den Klimazielen, die einen Anteil von wenigstens 60% emissionsfreier Energie am gesamten Energiebedarf fordern, fehlt somit noch ein gutes Stück. Der Anteil EE im Stromnetz ist deutlich höher. Im Jahr 2018 tragen Erneuerbare Energien in Deutschland bereits 38% der Stromerzeugung [13] (vorwiegend Wind und Solar).

Der Begriff Primärenergie ist immer dann von Bedeutung, wenn der primäre Energieträger in Form fossiler Brennstoffe Geld kostet. Die Kosten konventioneller Stromerzeugung sind vor allem Brennstoffkosten. Auch im Straßenverkehr ist die Benzinrechnung ein wesentlicher Kostenanteil neben Investition und Betrieb. Die Brennstoffkosten einer Heizung sind ebenfalls erheblich.

Bei erneuerbaren Erzeugern wie Wind, Sonne, Laufwasser oder Umgebungswärme ist der primäre Energieträger uninteressant, da kostenlos. Daher ist auch der Wirkungsgrad hier völlig unerheblich. Bei fossilen Brennstoffen ist der Wirkungsgrad jedoch wesentlich bezüglich Kosten und Emissionen: Ein thermisches Kraftwerk (Kernkraft, Kohle, Braunkohle, Gas) wandelt nur ca. 40% der Primärenergie in elektrischen Strom.

Auch Verbrennungsmotoren sind thermische Maschinen. Wegen der vergleichsweise kleinen Baugrößen wandeln sie Primärenergie nur in ca. 25% Bewegungsenergie um. Beim Heizen mit Brennstoffen ist die Energieausbeute sehr viel besser. Allerdings hat hier eine Wärmepumpe den Vorteil, dass die Wärmeenergie gar nicht erzeugt werden muss, sondern der Umgebung entnommen wird.

Somit ergibt sich für die Energiewende eine wesentliche Konsequenz: Mit dem Kohleausstieg aus der Stromerzeugung wird sich der Primärenergiebedarf in Deutschland drastisch verringern. Bei 40% Stromaushbeute wäre eben nur dieser Anteil durch EE zu ersetzen, nicht die komplette Primärenergie. Ebenso verringert sich mit dem Mineralölausstieg der Bedarf an Energie aus Mineralöl auf ca. 30% des Primärenergiebedarfs, wenn man auf Elektrofahrzeuge und Wärmepumpen umsteigt.

Eine einfache Abschätzung ergibt, dass der Energiebedarf in Deutschland dann auf ca 60% des heutigen Primärenergiebedarfs sinkt [eigene Hochrechnung]. Gemessen an dieser reduzierten Basis sind die Klimaziele von 60% EE wesentlich einfacher zu erreichen: In absoluten Werten wäre ein Wachstum der EE auf das 2,5-fache der heutigen Basis ausreichend.

Ein sinkender Anteil an Primärenergie bedeutet auch geringere Primärenergiekosten. Daher sollte sich die Energiewende für die Industrie und den Endverbraucher rechnen. Wegen der zunehmend wichtigeren elektrischen Energie wird man Energiekosten künftig häufiger pro kWh kalkulieren als pro Liter oder m³ Brennstoff (ein Liter Benzin oder Diesel enthält eine Primärenergie von ca. 10 kWh). Rechnen sich also Elektrofahrzeuge, Wärmepumpen, Solaranlagen und Blockheizkraftwerke?

Die Verteilung der Energie werden zunehmend die Stromnetze übernehmen. Daher gewinnen die Kosten für den Ausbau und den Betrieb der Netze an Bedeutung.

Kohleausstieg bedeutet Strukturwandel im Stromnetz

Kernenergie, Braunkohle und Steinkohle als Primärenergieträger werden vorwiegend zur Stromerzeugung eingesetzt. Beim Ausstieg aus Kernenergie und Kohle müssen die thermischen Kraftwerke durch EE ersetzt werden; das sind in Deutschland vorwiegend Windkraft und Solarenergie. Zu ersetzen ist hierbei nur die elektrische Teil der Energie, d.h. die mit dem Wirkungsgrad reduzierte Primärenergie. Dieser Teil der Energie befindet sich bereits heute in den Stromnetzen.

Der Kohleausstieg bedeutet somit einen Strukturwandel im Stromnetz: Wenige, große Kraftwerke (in Deutschland derzeit ca. 70 Kraftwerke größer 500 MW, bzw. insgesamt ca. 55 GW installierter Kapazität für Kohle und Kernenergie [15]) müssen durch viele, dezentrale Kraftwerke ersetzt werden.

Hierbei richten sich bei Windanlagen und Solaranlagen die Standorte weniger nach der lokalen Nachfrage, sondern eher nach dem lokalen Angebot. Ein Großteil der Erzeuger im Netz verlagert sich außerdem von den oberen Netzebenen in die Verteilnetze. Die Strommenge bzw. der Jahresbedarf an Strom ändert sich hierdurch nicht.

Die Dezentralisierung der Erzeuger hat jedoch einen Einfluss auf die Transportwege und den Lastfluss im Netz. Daher ist hierfür ein Ausbau der Netze erforderlich. Der zeitliche Ausgleich von Angebot und Nachfrage elektrischer Leistung im Netz muss außerdem an die Eigenschaften der EE angepasst werden. Das Angebot richtet sich nun nach der Wetterprognose.

Somit ändert sich der Speicher im Netz: Statt die Nachfrage aus dem Kohlebunker zu bedienen, muss ein Überangebot elektrischer Leistung entweder exportiert, verbraucht oder gespeichert werden, z.B. dauerhaft im Gasnetz durch die Elektrolyse von Wasser. Hierdurch wird eine Versorgung durch

Gaskraftwerke zunehmend emissionsfrei. Die Kapazität an Gaskraftwerken in Deutschland beträgt derzeit ca. 29 GW [15].

Mineralölausstieg bringt mehr Strom ins Netz

Mit Mineralöl als primärem Energieträger werden in Deutschland vorwiegend Verkehr und Heizung versorgt. Beim Mineralölausstieg muss das elektrische Äquivalent der benötigten Energie von den Stromnetzen übernommen werden. Rechnet man mit einem Wirkungsgrad von ca. 30%, so reduziert sich die Primärenergiemenge von ca. 34% auf ca. 10% des heutigen Primärenergiebedarfs. Dieser Betrag wäre als elektrische Energie bereitzustellen.

Der Anteil von Kernenergie, Braunkohle und Steinkohle an der Primärenergie beträgt heute insgesamt ca. 28%. Bei Reduktion mit Wirkungsgrad 40% verbleiben somit ca. 10% an elektrischer Energie. Schätzt man den Beitrag der bereits vorhandenen EE zur elektrischen Energie mit ebenfalls ca. 10% ein, beträgt der Anteil elektrischer Energie heute insgesamt ca. 20% (bezogen auf den heutigen Primärenergiebedarf).

Mit dem Mineralölausstieg müsste der Anteil elektrischer Energie somit von 20% auf insgesamt 30% erhöht werden; Die Stromnetze müssten somit ca. 50% mehr elektrische Energie aufnehmen als bisher. Der Ausbau der Stromnetze richtet sich hierbei nicht nach der im Jahresverlauf transportierten Energiemenge, sondern nach der im zeitlichen Verlauf erforderlichen elektrischen Leistung. Da die Netze nachts kaum ausgelastet sind, wären weitere 50% in dieser Zeit kaum ein Problem. In der Realität sind neben einem Ausbau der Netze auch hier Methoden zur Anpassung von Angebot und Nachfrage an elektrischer Leistung im Tagesverlauf bzw. Jahresverlauf gefragt. Auch die Elektrolyse in Verbindung mit Brennstoffzellen wäre hier ein technisch gangbarer Weg.

Technische Begriffe

Energie: Wird in unterschiedliche Formen gewandelt, wie Wärme, Bewegung, elektrische Energie bzw. potenzielle Energie. Gemessen in Joule [J], Wattsekunden [Ws], bzw. Newtonmeter [Nm]. Hierbei entspricht $1 \text{ J} = 1 \text{ Ws} = 1 \text{ Nm}$. Eine Wattstunde entspricht 3600 Ws, und somit $1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MWh} = 3,6 \text{ MJ}$.

Leistung: Energie pro Zeit, gemessen in Watt [W]. Im elektrischen Netz errechnet sich die Leistung aus dem Produkt aus Strom und Spannung.

Stromverbrauch und Stromerzeugung: Umgangssprachlich für elektrische Energiemengen. Diese Bezeichnung ist zutreffend, da in den Stromnetzen die Spannung konstant gehalten wird. In diesem Fall folgt die Leistung dem Strom, bzw. die Energie dem Strom über der Zeit.

Lastfluss: Leistungsfluss. Bei konstanter Spannung folgt die Leistung dem Strom, und somit der Leistungsfluss oder Lastfluss dem Fluss des Stroms. Der Strom fließt üblicherweise vom Erzeuger zum Verbraucher (= Last), bzw. vom Netz zum Verbraucher. Bei Einspeisung kehrt sich der Lastfluss um.

Spannungsqualität: Stabile Spannung im Netz. Üblicherweise soll die Spannung in 95% der Zeit maximal um $\pm 10\%$ abweichen.

3.2. Lastfluss im Netz

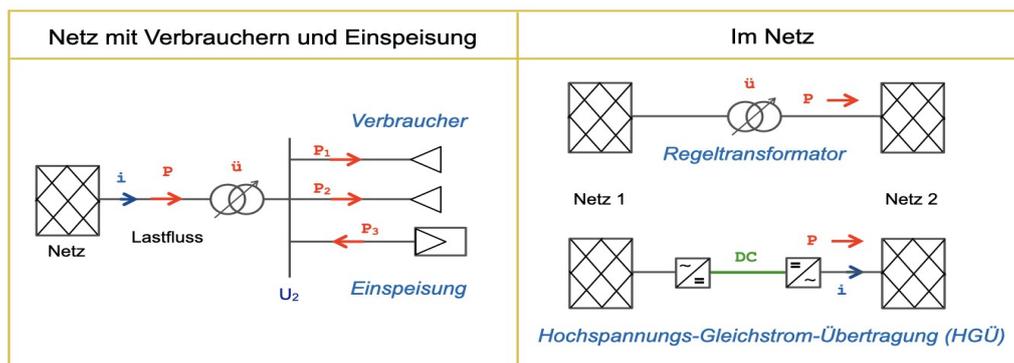
Stromnetze bringen elektrische Energie vom Erzeuger zum Verbraucher. Durch die Energiewende steigt der Anteil an Erzeugern und Verbrauchern, die nicht als konventionelle Generatoren, Motoren oder Wechselstromverbraucher arbeiten, sondern als Gleichstromsysteme über leistungselektronische Umrichter an das Netz angebunden werden, bzw. im Netz Funktionen übernehmen..

Die Steuerung der Lastflüsse wird durch den Ausbau der Netze anspruchsvoller. Regeltransformatoren sorgen mit Hilfe der Spannungsregelung gleichzeitig für optimale Lastflüsse. Wie stellen sich Lastflüsse ein und welche Unterschiede und Gemeinsamkeiten gibt es zu Umrichtersystemen am Netz und im Netz?

Verbraucher und Erzeuger am Netz

In den Mittelspannungsnetzen und Niederspannungsnetzen finden sich als Einspeisung Blockheizkraftwerke, PV-Anlagen, Windanlagen und Batteriesysteme. Als Verbraucher finden sich Haushalte, Gewerbe und Industrie, sowie zunehmend Ladestationen für Elektrofahrzeuge.

Da die Netze spannungsgeführt sind, ergibt sich der Lastfluss aus dem Stromfluss: Ein Erzeuger speist Leistung ins Netz ein, ein Verbraucher nimmt Leistung aus dem Netz auf. Mit dem hiermit verbundenen Strom ergibt sich am Anschlusspunkt entweder ein Absinken der Netzspannung (Verbraucher), oder ein Anstieg der Netzspannung (Einspeisung).



Anlagen am Netz und Betriebsmittel im Netz

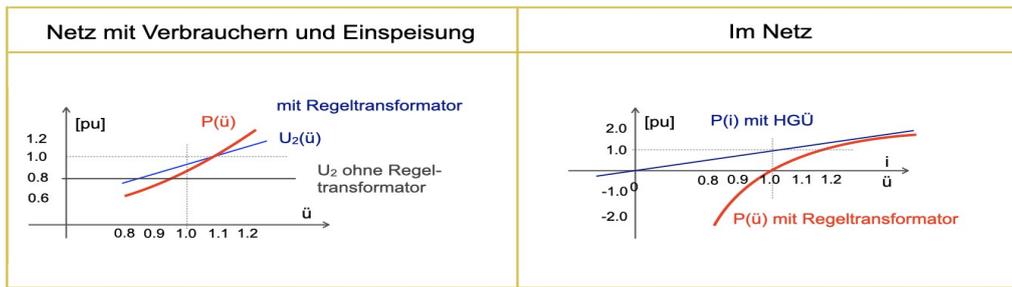
Den Lastfluss steuert ein Regeltransformator zusammen mit der Spannungsregelung. Für ein spannungsgeführtes Netz ist die Stabilisierung der Spannung erstes Ziel. Durch das Anheben oder Absenken der Spannung mit Hilfe des Übersetzungsverhältnisses passt sich der Lastfluss automatisch an. Bei einem passiven Verbraucher wächst der Lastfluss stärker als die Spannung, bei stromgeleiteter Verbraucher oder Erzeuger geht die Leistung mit der Spannung.

Selbst bei leistungsgeregelten Erzeugern oder Verbrauchern hat die Spannungsregelung positiven Einfluss auf den Lastfluss: Wegen der Strombegrenzung umrichterbasierter Systeme kann das System bei sinkender Spannung seine verfügbare Leistung nicht abgeben bzw. die geforderte Leistung nicht aufnehmen.

Mit wachsendem Ausbau der Erzeuger und Verbraucher am Netz ergibt sich eine höhere Auslastung der Niederspannungsnetze und Mittelspannungsnetze. Man kann davon ausgehen, dass Regeltransformatoren auch in den unteren Netzebene der Standard werden.

Lastfluss im Netz

Zwischen zwei Netzen oder Netzabschnitten gibt es kein Leistungsgefälle, wenn die Spannungen in beiden Teilen ausbalanciert sind. Auch hier sorgt ein Regeltransformator über das Übersetzungsverhältnis für einen Ausgleich bzw. einen Lastfluss. Die Leistung P ist hierbei abhängig vom Übersetzungsverhältnis \ddot{u} .



Lastfluss folgt Netzimpedanz (Regeltransformator) oder äußerer Einwirkung (HGÜ)

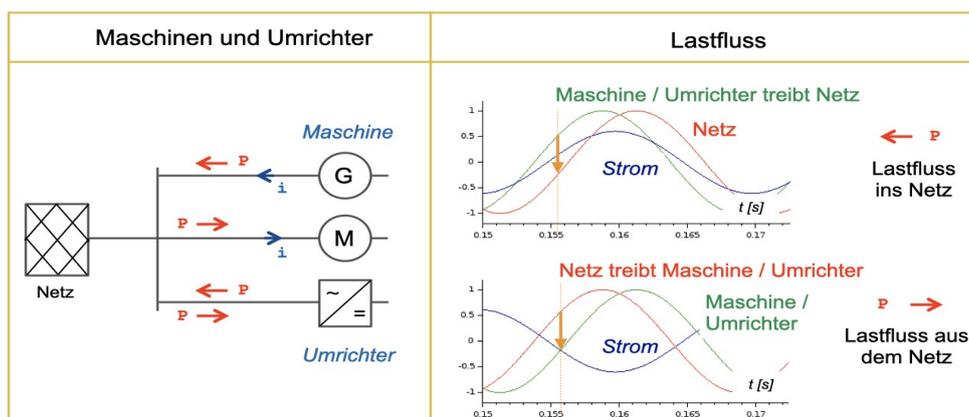
In den Übertragungsnetzen finden sich zunehmend Gleichstrom-Übertragungsstrecken (HGÜ). Zwei Kopfstationen mit Umrichtern bilden die Anschlusspunkte ins Stromnetz. Die HGÜ kann ebenfalls einen gezielten Lastfluss bereit stellen, verfolgt aber ein anderes Konzept: Da die Spannungen in beiden Netzen ausbalanciert sind, arbeitet die HGÜ als Strompumpe. Die Leistung P folgt unmittelbar dem Strom i . Die in einen Netzabschnitt beförderte Leistung wird dem anderen Netz entnommen.

Maschinen und Umrichter

Elektrische Maschinen und Umrichter sind unterschiedlich aufgebaut, funktionieren am Netz jedoch nach dem gleichen Prinzip. Eine elektrische Maschine kann sowohl als Erzeuger (Generator) als auch als Verbraucher (Motor) laufen. Die Richtung des Lastflusses hängt allein von der Betriebsweise ab und kann im laufenden Betrieb jederzeit wechseln.

Treibt man eine Maschine an der Welle an, so dass sie insgesamt mechanische Leistung aufnimmt, so läuft der Rotor weiterhin synchron mit dem Netz, jedoch zeitlich versetzt vor dem Netz. Hierdurch eilt die Spannung der Maschine der Netzspannung voraus: zu jedem Zeitpunkt gibt es ein Spannungsgefälle von der Maschine zum Netz. Mit Hilfe des magnetischen Speichers der Maschine (Induktivität) folgt der Strom der Maschinenspannung; es ergibt sich ein Lastfluss ins Netz.

Lässt das Drehmoment an der Rotorwelle nach, so dass die Maschine insgesamt Leistung aus dem Netz aufnimmt, so fällt die Rotorposition und somit die Spannung in der Maschine zeitlich hinter die Netzspannung zurück: der Lastfluss kehrt sich um. Der Wechsel ist fließend. Auf diese Weise können elektrische Maschinen bei Umkehr des Drehmomentes Bremsenergie an das Netz zurückgeben.



Maschinen und Umrichter als Erzeuger oder Verbraucher

Soll die Maschine mit variabler Drehzahl laufen, so ist sie mit Hilfe eines Frequenzumrichters an das Netz angebunden. Das ist für fast alle drehzahlgeregelten Antriebe der Fall, aber auch für Windrä-

der mit Synchronmaschinen. Andere Verbraucher, wie z.B. Solaranlagen oder Batterien sind Gleichstromsysteme und müssen aus diesem Grund über einen Umrichter mit dem Netz verbunden werden.

Das Funktionsprinzip bleibt gleich: Der Umrichter erzeugt eine Wechselspannung synchron zur Netzfrequenz. Eilt diese der Netzspannung voraus, stellt sich ein Lastfluss ins Netz ein. Bleibt die Spannung des Umrichters zeitlich hinter der Netzspannung, wird Leistung aufgenommen. Auch hier ist der Übergang fließend und über die Zeitverzögerung einstellbar. Umrichter verwenden ebenfalls einen magnetischen Energiespeicher (Drosselspule) zur Führung des Stromes mit der Spannung.

Die weitere Entwicklung

Im Zuge der Energiewende wird sich die installierte Leistung für Solaranlagen und Windparks in Deutschland mehr als verdoppeln. Zum Ausgleich kurzfristiger Schwankungen bei Rückbau der Kernkraftwerke und Kohlekraftwerke sind Batteriespeicher vorgesehen. Als langfristiger Speicher soll die Elektrolyse von Wasser dienen. Solche Anlagen nehmen ein Überangebot an elektrischer Energie auf und können diese ins Gasnetz einspeisen.

Der Mineralölaustieg bringt über Elektrofahrzeuge mit ihrer Ladeinfrastruktur mehr Strom ins Netz. Alle diese Systeme werden mit Gleichstrom betrieben und mit Hilfe von Umrichtern an das Stromnetz angeschlossen. Die Frage ist hierbei, an welcher Stelle im Netz der Anschluss mit der Umwandlung in Wechselstrom am besten erfolgt. Die höhere Auslastung der Netze wird weitere leistungselektronische Systeme im Netz erfordern.

3.3. Gleichstrom und Wechselstrom

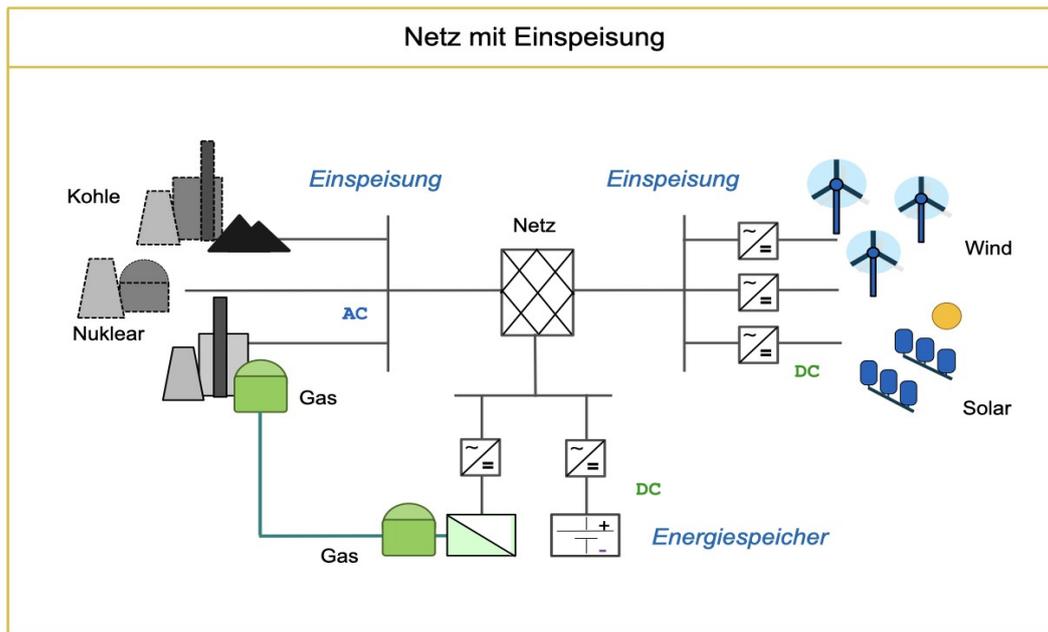
Stromnetze werden traditionell mit Drehstrom aus Kraftwerks-Generatoren versorgt und somit mit Wechselstrom (AC für englisch alternating current). Im Zuge der Energiewende erfolgt die Einspeisung zunehmend mit Gleichstrom (DC für englisch direct current). Außerdem wächst die Anzahl der Gleichstromverbraucher am Netz. Welchen Einfluss haben diese Systeme auf die Netze?

Einspeisung

Konventionellen Kraftwerken werden betrieben mit Laufwasser, Braunkohle, Steinkohle, Kernkraft, Gas (inklusive Biogas) und Biomasse. Mit Ausnahme der Laufwasser-Kraftwerke sind diese Erzeuger thermische Kraftwerke, die Primärenergie zunächst in Wärme und mechanische Energie wandeln. Die mechanische Energie treibt dann den Drehstromgenerator.

Das Leistungsangebot von Laufwasserkraftwerken ist abhängig vom Wasserstand. Bei den thermischen Kraftwerken lässt sich Brennstoff lagern.

Der überwiegende Teil der erneuerbaren Erzeuger in Deutschland sind Windkraftwerke und Solaranlagen. Die Primärenergie ist hier kostenlos, allerdings ist das Angebot abhängig von der Wetterlage. Eine Speicherung kann hier erst nach der Stromerzeugung erfolgen. Zur kurzfristigen Speicherung über den Tagesverlauf (z.B. für Solarenergie) bieten sich Batteriespeicher an. Größere Energiemengen lassen sich durch Wasser-Elektrolyse zu Gas verarbeiten, das dann im Gasnetz längerfristig gespeichert werden kann.



Vom Kohlebunker zum Gasbehälter

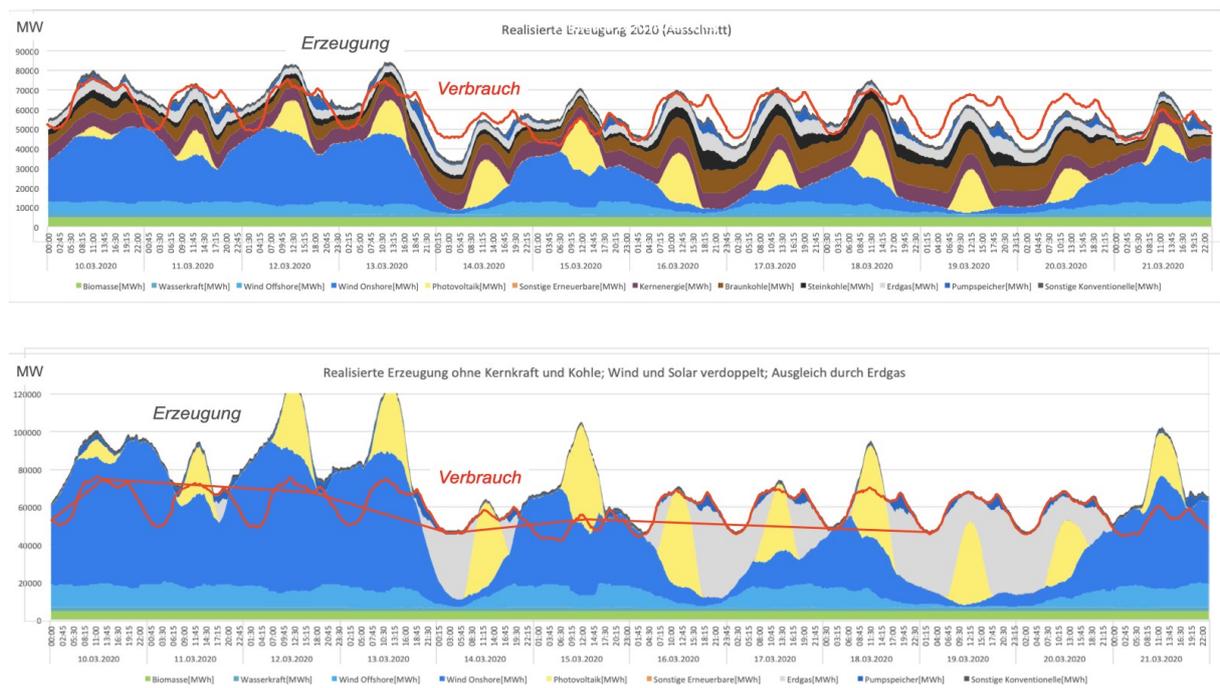
In Deutschland wurden im Jahr 2019 etwa 42% des jährlichen elektrischen Energiebedarfs durch erneuerbare Erzeuger gedeckt [13]. Dabei sind die Anschlusswerte erneuerbarer Erzeuger und ihrer Energiespeicher bereits heute größer als die der konventionellen Kraftwerke: Wind und Solar haben in Deutschland heute eine Anschlusskapazität von ca. 110 GW [3]. Grund hierfür ist das schwankende Angebot an Energie. Solaranlagen in Deutschland bringen ca. 1000 Vollaststunden im Jahr, Windanlagen ca. 3000 Vollaststunden im Jahr.

Nach Kernenergieausstieg und Kohleausstieg müsste die elektrische Energieversorgung vorwiegend durch EE gedeckt werden. Auf der heute installierten Basis, die eine Versorgung von 42% ermöglicht, wäre etwa eine Verdopplung der Windenergie und Solarenergie erforderlich, somit eine Verdopplung der Anschlusskapazität auf über 220 GW. Hinzu kommt die Anschlusskapazität der Energiespeicher. Die Stromversorgung erfolgt dann vorwiegend über Gleichstromquellen

Angebot und Nachfrage

Die Nachfrage elektrischer Energie schwankt über den Tagesverlauf und über den Verlauf der Woche (an Werktagen und am Wochenende), sowie mit den Jahreszeiten. Der größte Strombedarf in Deutschland ergibt sich in der kalten Jahreszeit mit etwa 80 GW.

Die Abbildung zeigt einen Ausschnitt über 12 Tage im März 2020 [12]. Da unser Tagesrhythmus der Sonneneinstrahlung folgt, findet er eine natürliche Unterstützung durch Solarenergie. Sofern der Himmel nicht bedeckt ist. Wind ist bereits heute in der Lage, den größten Teil der Energie zu decken, allerdings ist auch mit Flauten zu rechnen. In der Übergangszeit zwischen Winter und Sommer sind die Schwankungen von Wind und Sonne besonders ausgeprägt.



Produktion und Verbrauch heute und in Zukunft (Quelle [12, smard.de])

Die Differenz von Angebot und Nachfrage wird heute mit Hilfe der vorhandenen konventionellen Kraftwerke gedeckt, sowie durch Exporte und Importe mit den Nachbarländern. Künftig werden Kernkraftwerke und Kohlekraftwerke ersetzt durch eine höhere Kapazität von Wind- und Solaranlagen, ergänzt um kurzfristige und langfristige Speicher. Im unteren Teil der Abbildung wurden im gleichen Ausschnitt aus dem Jahr 2020 Kernkraft und Kohle eliminiert und die Produktion von Wind und Solar verdoppelt. Die Abweichung von der Nachfrage wurde durch Gaskraftwerke wieder hergestellt.

Ein Überangebot an Energie ist technisch betrachtet kein Problem, allerdings wird ein Teil der überschüssigen Energie benötigt, um Flauten zu überbrücken, wenn man hierzu nicht auf fossile Brennstoffe zurückgreifen möchte. Hierzu wird eine erhebliche Kapazität an Energiewandlern für Energiespeicher benötigt werden.

Verbraucher

Zur Energiewende gehört auch der Mineralölausstieg, d.h. der Umstieg von Ölheizungen auf Wärmepumpen, sowie von Verbrennungsmotoren auf Elektrofahrzeuge, bzw. der Umstieg auf öffentliche Verkehrsmittel. Hierdurch erhöht sich die Nachfrage nach elektrischer Energie. Ladegeräte für Elektrofahrzeuge kommen als Gleichstromverbraucher zusätzlich ins Netz. Der Anteil an elektrischer Energie für den Schienenverkehr und öffentlichen Nahverkehr wird steigen.

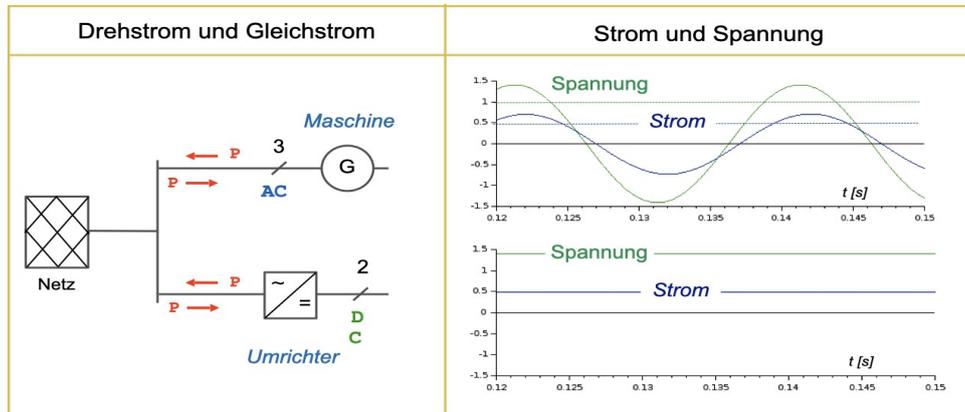
In den Haushalten arbeiten Beleuchtung, Haushaltsgeräte und Geräte zu Unterhaltung zwar an der Wechselspannung, jedoch zunehmend mit Gleichstrom (über eingebaute oder externe „Netzteile“). In der industriellen Fertigung arbeiten elektrische Maschinen und Antriebe zunehmend mit Frequenzumrichtern und könnten effizienter mit Gleichstromnetzen versorgt werden.

Energieübertragung mit Gleichstrom und Wechselstrom

Die Stromnetze werden mit konstanter Spannung betrieben, das Netz hält die Spannung stabil. In einem spannungsgeführten Netz ist die transportierte Leistung bzw. die transportierte Energie proportional zum Strom. Das gilt sowohl für Gleichstrom als auch für Wechselstrom.

Aus Sicht des Netzes ist die Spannung interessant. Eine Einspeisung bzw. ein Verbraucher erzeugt einen Strom im Netz. Im Falle der Energieübertragung tauchen beide Begriffe auf: Die Abkür-

zung HGÜ bezeichnet eine „Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung“: Die Übertragungsstrecke (Netz) arbeitet mit Gleichspannung, der Energietransport geschieht mit dem Strom.



Gleichstrom und Wechselstrom

Bei Wechselstromsystemen folgen Strom und Spannung der Drehzahl der Generatoren: Für eine Maschine, die auf 3000 Umdrehungen pro Minute geregelt ist, ergibt sich eine Netzfrequenz von 50 Hz (Umdrehungen pro Sekunde) bzw. 20 Millisekunden pro Umdrehung (Periode). Für Wechselstromsysteme rechnet man Leistungen mit Hilfe der sogenannten Effektivwerte: Hier zählt nicht der maximale Wert (Scheitelwert) des zeitlichen Verlaufs, sondern der Beitrag zur elektrischen Leistung. Das Produkt der Effektivwerte von Strom und Spannung ergibt die Leistung. Unter konstanter Spannung wird in einem Wechselstromnetz ein konstanter Effektivwert der Spannung verstanden.

Bei Gleichstromsystemen gibt es keine zeitlichen Schwankungen: Strom und Spannung sind konstant. Im Vergleich kann man eine Leitung oder ein Kabel mit einem Gleichstrom betreiben, der dem Effektivwert des Wechselstroms entspricht. In diesem Fall sind die Leitungsverluste beider Varianten gleich.

Die Spannung bei einer Gleichstromübertragung darf jedoch grundsätzlich dem Scheitelwert der Wechselspannung entsprechen, da die Leitung bzw. das Kabel hierfür isoliert sein sollte. Hierdurch kann ein Gleichstromsystem pro Leitung oder Kabel mehr Leistung übertragen (pro Leiter etwa das 1,5-fache). Im Vergleich der Gleichstromübertragung zur Wechselstromübertragung ergeben sich folgende Regeln:

- Systeme gleicher Leistung lassen sich in Wechselstrom (AC) mit 3 Leitern realisieren, in Gleichstrom (DC) mit 2 Leitern.
- Das Gleichstromsystem hat im Vergleich zum Wechselstromsystem $2/3$ der Verluste (da ein Leiter weniger benötigt wird).
- Die Schaltung für Umrichter beträgt für ein Gleichstromsystem $2/3$ des Aufwands für ein Wechselstromsystem (da 2-phasig statt 3-phasig).

Aus diesen Gründen sind Gleichstromsysteme grundsätzlich dann von Vorteil, wenn an beiden Enden der Übertragung Umrichter benötigt werden, bzw. wenn sich an einem Ende ein Gleichstromsystem als Einspeisung oder Verbraucher befindet. Die Wandlung in Wechselstrom erfolgt am Netzananschlusspunkt, heute vorwiegend in Niederspannungstechnik. Mit wachsender Systemleistung und abhängig von wirtschaftlichen Erwägungen lässt sich der Anschlusspunkt künftig weiter ins Netz verlegen, beispielsweise in der Mittelspannung.

Technische Begriffe

Energie: Wird in unterschiedliche Formen gewandelt, wie Wärme, Bewegung, elektrische Energie bzw. potenzielle Energie. Gemessen in Joule [J], Wattsekunden [Ws], bzw. Newtonmeter [Nm]. Hierbei entspricht $1 \text{ J} = 1 \text{ Ws} = 1 \text{ Nm}$. Eine Wattstunde entspricht 3600 Ws, und somit $1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MWh} = 3,6 \text{ MJ}$.

Leistung: Energie pro Zeit, gemessen in Watt [W]. Im elektrischen Netz errechnet sich die Leistung aus dem Produkt aus Strom und Spannung.

Stromnetz: Umgangssprachlich für elektrisches Energieversorgungsnetz. Die Spannung im Netz wird konstant gehalten (geregelt). Somit wird die Energie bzw. die elektrische Leistung mit dem Strom transportiert.

Effektivwert (eines Stromes oder einer Spannung): Der Wert, der einen Beitrag zur Leistung liefert. Zur Berechnung der elektrischen Leistung multipliziert man die Effektivwerte von Strom und Spannung. Die Scheitelwerte des zeitlichen Verlaufs bei Wechselspannung bzw. Wechselstrom liegen über den Effektivwerten (beim ca. 1,5 fachen). Bei Gleichspannung und Gleichstrom sind die Werte konstant; Scheitelwerte sind in diesem Fall Effektivwerte.

Drehstromsystem: Besteht in den oberen Spannungsebenen aus 3 Leitern mit phasenversetzter Spannung und phasenversetztem Strom, die konventionell durch den Antrieb von Generatoren erzeugt werden. Im Niederspannungsnetz findet sich außerdem ein Neutralleiter. Die Spannung zwischen zwei Leitern ist höher als die Spannung zwischen Leiter und Neutralleiter (bzw. Bezugspunkt).

Gleichstromsystem: Besteht aus 2 Leitern mit umgekehrter Polarität (z.B. bei einem Kabelsystem mit Bezugspunkt zum Kabelmantel) bzw. aus einem Leiter und einem Neutralleiter.

HGÜ (engl. HVDC): Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (engl. high voltage direct current). Gleichstromsystem zur Übertragung von Leistung über große Entfernungen mit hoher Spannung. An den Kopfstationen befinden sich Umrichter zur Wandlung ins Stromnetz.

3.4. Qualität von Strom und Spannung

Aufgabe der Netze ist die Bereitstellung der Spannung. Traditionell übernehmen diese Aufgabe Kraftwerke (Kohlekraftwerke, Kernkraftwerke, Gaskraftwerke, sowie Wasserkraftwerke). Aufgabe der Stromnetze ist der Transport der elektrischen Leistung, umgangssprachlich des Stroms.

Konventionelle Kraftwerke stellen Leistungen bis in den Bereich eines Gigawatts bereit. Damit die Ströme beim Transport großer Leistungen klein bleiben, werden große Leistungen mit hohen elektrischen Spannungen übertragen: Aus dem Produkt von Strom und Spannung berechnet sich die Leistung. Stromnetze sind daher mit verschiedenen Spannungsebenen aufgebaut.

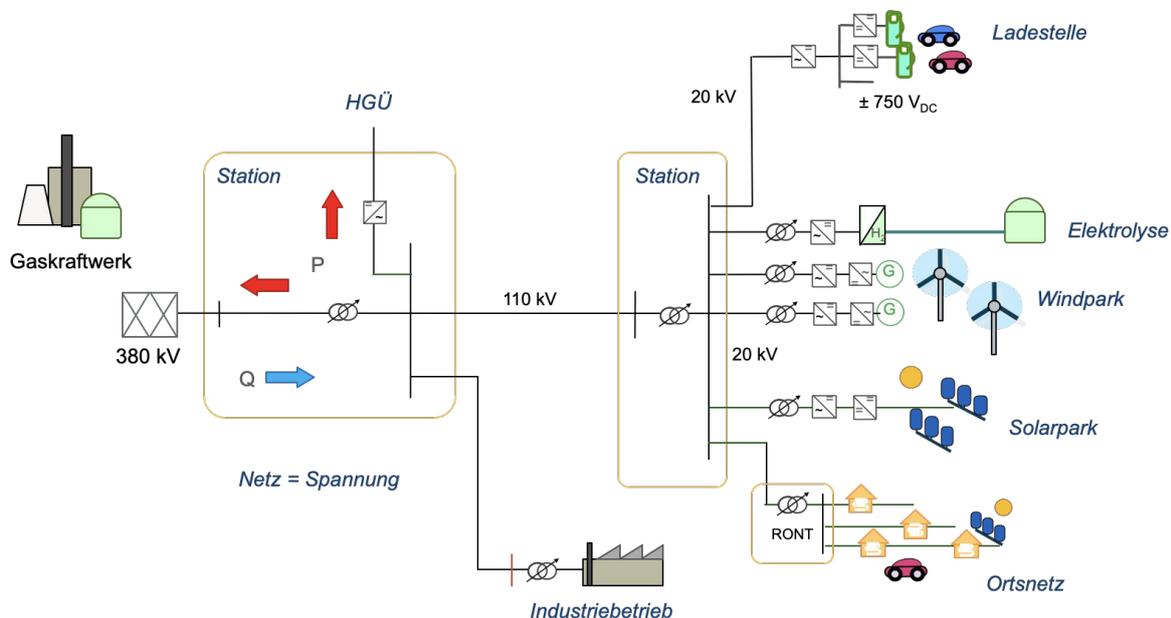
Bei Freileitungen ist die Spannungsebene mit Hilfe der Anzahl von Isolatoren an Freileitungsmasten erkennbar: Je höher die Spannung, desto größer ist die Isolatorstrecke zwischen Leitung und Aufhängung der Leitung am Hochspannungsmast.

Zwischen den einzelnen Spannungsebenen finden sich Transformatoren: Sie wandeln die Leistung in niedrigere Spannungen zur weiteren Verteilung um. Im traditionellen Stromnetz speisen die Kraftwerke mit Hilfe von Transformatoren in die oberste Spannungsebene ein. Die Verteilung der Leistung erfolgt über die verschiedenen Spannungsebenen bis zu den Verbrauchern.

Die niedrigste Spannungsebene bilden die aus dem Haushalt bekannten 230 Volt bzw. 400 Volt an Netzspannung. Verbraucher in Industriebetrieben können auch an Anschlüsse in den Spannungsebenen 20 kV bzw. 110 kV angeschlossen sein.

Aktuell vollziehen wir einen Wandel in unseren Energiesystemen: klassischer Antriebstechnologien werden durch Einsatz von Leistungselektronik ersetzt. Als Beispiele lassen sich Antriebe bis in den 100 MW Leistungsbereich nennen (Antriebe im Bergbau $\leq 50 \text{ MW}$ / Kompressorantriebe für die Verflüssigung von Erdgas $\leq 75 \text{ MW}$).

Mit erneuerbaren Erzeugern verbreiten sich Umrichtertechnologien und Speichertechnologien (Batteriespeicher, die Elektrolyse von Wasserstoff, Brennstoffzellen) und im Leistungsbereich zwischen 100 bis 500 MW. Die leistungselektronische Energiewandlung verbreitet sich im täglichen Leben bis hinein in den häuslichen Bereich. Außerdem bringt die E-Mobilität neue Herausforderungen für Infrastruktur und Verfügbarkeit der Ladeleistung.



Stromnetz mit verschiedenen Spannungsebenen

Mit dem Ausbau erneuerbarer Erzeuger ergeben sich Veränderungen in den elektrischen Energieversorgungsnetzen für die Verteilung und Übertragung: Der Energiefluss vom zentralen Generator ändert sich in einen Energiefluss aus einer Vielzahl verteilter, dezentraler Energieerzeuger. Der Rückbau thermischer Kraftwerke (Ausstieg aus Kernenergie und Kohle) ist verbunden mit dem Verlust rotierender Generatoren (Schwungmasse) und Konsequenzen für die Spannungshaltung und Regelung der Leistungsbilanz (Primärregelung über die Netzfrequenz).

Im Unterschied zu Kraftwerken, die nach dem Bedarf (der Nachfrage) geführt werden, erbringen erneuerbare Erzeuger eine Einspeiseleistung abhängig vom Angebot an Sonne und Wind. Hiermit verbunden ist die Notwendigkeit der Integration zentraler und dezentraler Energiespeicher.

Die Spannung an einem Anschlusspunkt am Netz stellt den ungestörten Betrieb der Anlagen sicher. Hierbei wird die Spannung am Netzanschlusspunkt bestimmt durch

- die Spannung im vorgeordneten Versorgungsnetz (Übertragungsnetz bzw. Verteilnetz); hier zählt die Einhaltung von Frequenz und Spannungsband,
- die Netzurückwirkung einer Anlage am Anschlusspunkt abhängig von deren Lastcharakteristik.

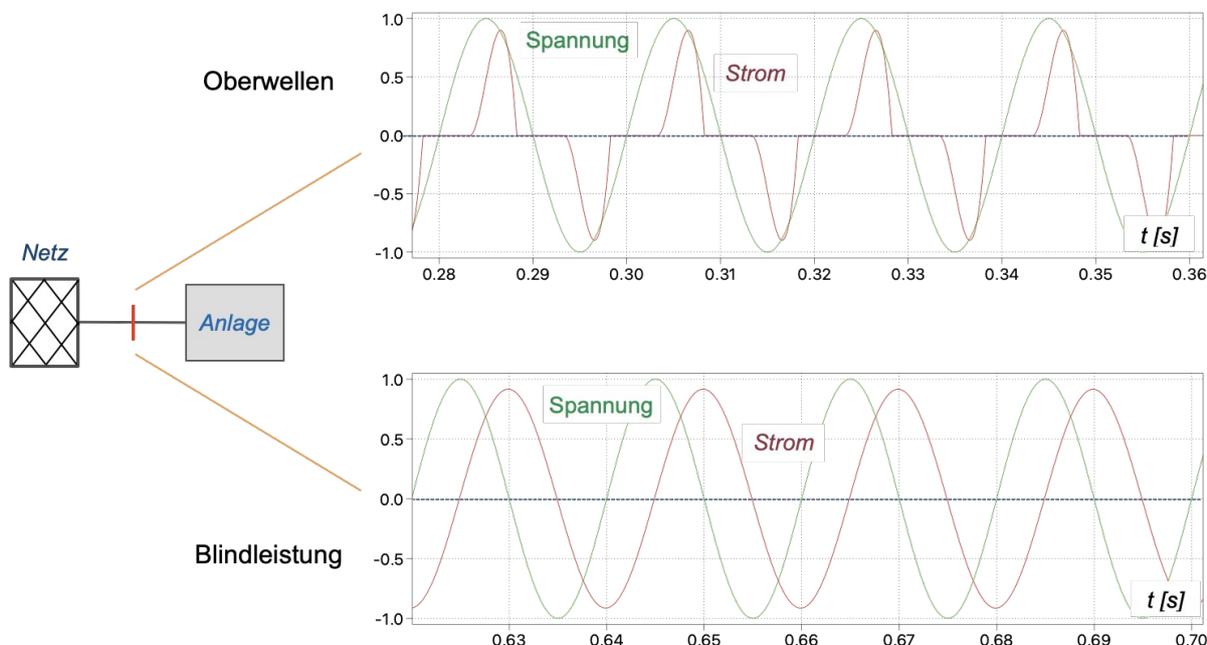
Unterschiedliche Anlagen belasten das Netz unterschiedlich: Zu Lasten mit Blindleistungsbedarf zählen beispielsweise motorische Lasten, sowie dynamische und unsymmetrische Belastungen durch Lichtbogenöfen in der Stahlerzeugung. Bei Lasten mit nichtlinearer Strom-/Spannungscharakteristik (z.B. Gleichrichter für die Elektrolyse bzw. Stromrichtersysteme für Antriebe) werden darüber hinaus Oberschwingungsströme ins Netz gespeist.

Alle Netzurückwirkungen mindern die Qualität der idealerweise sinusförmigen Spannung und beeinträchtigen somit auch die zu versorgenden Abnehmer. Rückwirkungen besitzen folgende Eigenschaften:

- Sie können Zusatzverluste verursachen (durch zusätzliche Erwärmung von Betriebsmitteln wie Transformatoren und Kabeln).

- Sie können zu einer erhöhten Belastung der Übertragungs- und Verteilnetze aufgrund von zusätzlichen Blindleistungsanteilen führen.
- Sie können den sicheren Betrieb von Anlagen aufgrund Spannungsinstabilitäten beeinflussen.

Folgende Abbildung illustriert Oberwellen durch nicht ideale Ströme, sowie die sogenannte Blindleistung, die durch eine zeitliche Verschiebung der Ströme zum Verlauf der Spannung zustande kommt.



Oberwellen und Blindleistung

Frage 3.4.1: Wenn das Netz die Aufgabe hat, eine konstante Spannung bereit zu stellen, welche Rolle hat dann ein Verbraucher am Netz (z.B. eine Kochplatte)? Worin unterscheidet sich ein Erzeuger am Netz (z.B. eine Solaranlage) von einem Verbraucher?

Lösung: Der Verbraucher bezieht Leistung aus dem Netz. Da das Netz die Spannung konstant hält, ist diese Leistung proportional zum Strom. Somit ist die umgangssprachliche Bezeichnung „Stromverbrauch“ für den Bezug elektrischer Leistung oder Energie durchaus korrekt.

Ein Erzeuger speist somit Strom in das Netz ein, und liefert somit elektrische Leistung an das Netz. Aufgabe des Netze bleibt auch hier, die Spannung konstant zu halten.

Frage 3.4.2: Welchen Einfluss haben Ströme, deren Signalform von der harmonischen Sinuswelle abweichen, wie in der Abbildung oben gezeigt (wobei man diese Abweichungen vom harmonischen Signal auch als Obertöne bzw. Oberwellen bezeichnet)?

Lösung: Sie belasten andere Betriebsmittel bzw. Anlagen am Netz. Diese Anlagen sind für harmonische Ströme ausgelegt und können vorzeitig altern und ausfallen.

Frage 3.4.3: Ein blinder Passagier ist ein Mitreisender ohne Fahrschein; ein blindes Ende führt nirgendwo hin; blinder Eifer schadet. Was möchte man mit dem Begriff „Blindleistung“ andeuten?

Lösung: Die Blindleistung hat keine Effekt, sie zeigt keine Wirkung. Es gibt zwar Ströme im Netz, jedoch zeigen diese zusammen mit der Spannung keine Wirkung, da sie zeitversetzt zueinander arbeiten.

Frage 3.4.4: Wenn Blindleistung keine Wirkung hat, stört sie ja nicht weiter. Gibt es Gründe, etwas gegen Blindleistung zu unternehmen?

Lösung: Blindleistung, die von Anlagen oder Leitungen verursacht wird, hat eine physikalische Ursache, die sich nicht beseitigen lässt (an einem ohmsch-induktiven Widerstand ist der Strom nun einmal phasenversetzt zur Spannung).

Allerdings möchte man die Ausbreitung der Blindleistung im Netz beseitigen, da die Blindströme die Betriebsmittel belasten und z.B. auf Leitungen durchaus reale Verluste erzeugen (hier gilt $P_V = I^2 R$, die Verlustleistung ist proportional zum Quadrat des Betrages des Stromes I und proportional zum Leistungswiderstand R).

Daher beseitigt man die Phasenverschiebung im Netz durch eine Kompensationsanlage am Anschlusspunkt. Die Kompensationsanlage stellt den Blindstrom bereit, so dass dieser nicht mehr aus dem Netz bezogen werden muss.

Technische Begriffe

Energie: Wird in unterschiedliche Formen gewandelt, wie Wärme, Bewegung, elektrische Energie bzw. potenzielle Energie. Gemessen in Joule [J], Wattsekunden [Ws], bzw. Newtonmeter [Nm]. Hierbei entspricht $1 \text{ J} = 1 \text{ Ws} = 1 \text{ Nm}$. Eine Wattstunde entspricht 3600 Ws, und somit $1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MWh} = 3,6 \text{ MJ}$.

Leistung: Energie pro Zeit, gemessen in Watt [W]. Im elektrischen Netz errechnet sich die Leistung aus dem Produkt aus Strom und Spannung.

Stromnetz: Umgangssprachlich für elektrisches Energieversorgungsnetz. Die Spannung im Netz wird konstant gehalten (geregelt). Somit wird die Energie bzw. die elektrische Leistung mit dem Strom transportiert.

Effektivwert (eines Stromes oder einer Spannung): Der Wert, der einen Beitrag zur Leistung liefert. Zur Berechnung der elektrischen Leistung multipliziert man die Effektivwerte von Strom und Spannung.

Blindleistung: Fluktuierende Leistung im Netz ohne Mittelwert und somit blind (d.h. ohne Beitrag zum Leistungstransport). Die Ströme sind hierbei nicht zeitgleich mit der Spannung, sondern phasenversetzt. Dennoch belasten die Blindströme die Betriebsmittel.

Oberwellen: Periodische Schwankungen von Strom und Spannung mit Vielfachen der Netzfrequenz. Oberwellen kommen durch Betriebsmittel oder Verbraucher zustande, die Ströme verzerren, z.B. durch einen gepulsten Betrieb, oder durch Sättigungseffekte (Strom steigt nicht linear mit der Spannung).

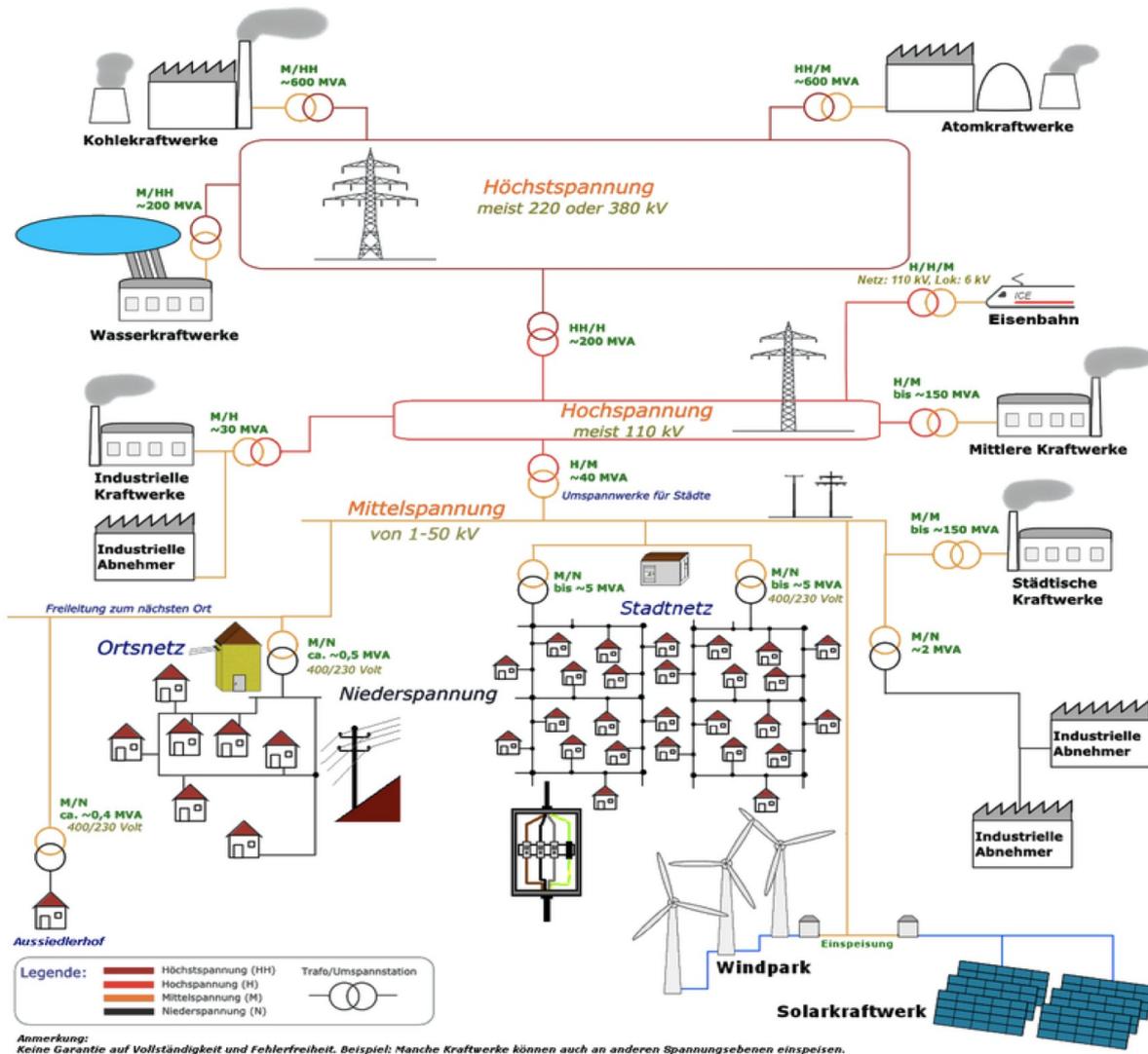
Kompensationsanlage: Beseitigt Blindleistung im Netz, indem ein Blindstrom mit umgekehrtem Vorzeichen ins Netz gespeist wird. Anders betrachtet stellt die Kompensationsanlage die Blindleistung lokal bereit, so dass diese nicht aus dem Netz bezogen werden muss.

Oberwellenfilter: Beseitigt Oberwellen von Strömen im Netz, indem die Oberwellen der Anlage analysiert werden und Oberwellen mit umgekehrtem Vorzeichen ins Netz gespeist werden.

4. Netze zur elektrischen Energieversorgung

4.1. Aufbau der Netze

Folgende Abbildung zeigt den Aufbau des Stromnetzes in Deutschland.



Aufbau der Netze [Quelle: Stefan Riepl, Wikimedia Commons]

Frage 4.1.1: Welche Erzeuger finden sich im Netz?

Frage 4.1.2: Welche Verbraucher finden sich im Netz?

Frage 4.1.3: Welche Bedeutung haben die Spannungsebenen?

Frage 4.1.4: Welche der folgenden Spannungsebenen ordnet man dem Transportnetz zu, welche Spannungsebenen dem Verteilnetz?

- Höchstspannung (380 kV, 220 kV)
- Hochspannung (110 kV)
- Mittelspannung (20 kV)

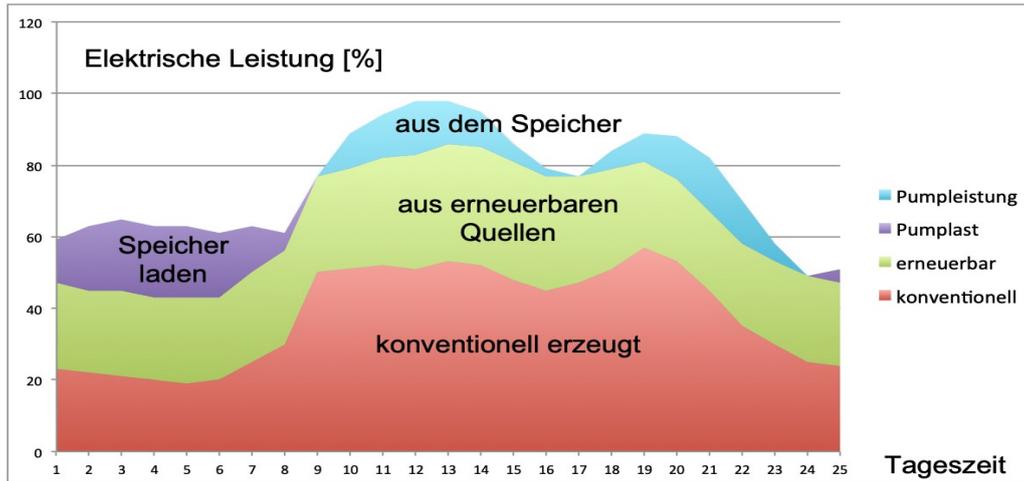
- Niederspannung (400V, 230V)

Frage 4.1.5: Welche Aufgabe haben die Transportnetze? Welche Aufgabe haben die Verteilnetze?

Frage 4.1.6: Wer betreibt Transportnetze? Wer betreibt Verteilnetze? Nennen Sie Beispiele für Netzbetreiber und die Aufgaben der Netzbetreiber.

4.2. Leistungsbedarf im Tagesverlauf

Folgende Abbildung zeigt eine Lastkurve für die Stromversorgung, bestehend aus konventioneller Erzeugung (fossile und nukleare Kraftwerke), erneuerbaren Energien, sowie den Einsatz von Speichern (Pumpspeicher).



Leistungsbedarf im Tagesverlauf

Frage 4.2.1: Erläutern Sie den Einsatz folgender Energiequellen bzw. Energiespeicher im Tagesverlauf: (1) regenerative Erzeuger (2) konventionelle Erzeuger, (3) Speicher (Pumpkraftwerke).

Lösung:

- (1) regenerative Erzeuger: Einsatz im Rahmen der Wettervorhersage planbar
- (2) Einsatz zur Deckung der Abweichung vom Bedarf planbar,
- (3) Speicher: zum Ausgleich der verbleibenden Differenz einsetzbar: Pumplast bei Überangebot, Pumpkraft bei Lastspitzen.

Frage 4.2.2: Charakterisieren Sie regenerative Energieformen und technische Mittel zu ihrer Nutzung (Erzeugung und Speicherung). Welche speziellen Anforderungen haben regenerative Energieformen bzgl. der Lastkurve?

Lösung: regenerative Energieformen: Sonne, Wind (durch Sonneneinstrahlung bewegte Luftmasse), Biomasse und Biobrennstoffe (Pflanzen, Photosynthese)

Mittel zur Erzeugung: Solar (Photovoltaik, Solar-thermisch), Wind (on-shore, off-shore), Biogas (Gasturbine), Biomasse (Verbrennung, Dampfkessel)

Mittel zur Speicherung: Wasser (Pumpspeicher- Kraftwerke), Luft (Druckluftspeicher), thermische Speicher (Wärmespeicher, ggf. in Kombination mit Wärmepumpen), mechanische Speicher (Schwungrad), Elektrolyse (Umwandlung Strom zu Gas).

Regenerative Energiequellen wie Sonne und Wind sind nicht planmässig verfügbar, d.h. das Angebot kann im Unterschied Energiequellen mit lagerbaren Brennstoffen schwer an eine erhöhte Nachfrage

angepasst werden. Umgekehrt muss ein Überangebot in andere Netze exportiert bzw. gespeichert werden.

Frage 4.2.3: Nennen Sie Möglichkeiten, Angebot und Nachfrage im Tagesverlauf aneinander anzupassen. Schätzen Sie die Wirksamkeit der genannten Möglichkeiten ein.

Lösung:

Lastmanagement. Einschätzung: Verbraucher sind bedingt steuerbar (Smart Grids). Insgesamt als Massnahme nicht ausreichend, kann aber Lastspitzen ggf. glätten.

Leistungsregelung. Derzeit nur durch konventionelle Kraftwerke durch Bezug von Regelleistung durch die Übertragungsnetzbetreiber. Einschätzung: Bei hohem Anteil regenerativer Energien hierdurch Verschlechterung des Regelverhaltens, sofern regenerative Energiequellen nicht in die Regelung einbezogen werden.

Einsatz weiterer Energiespeicher. Einschätzung: Ausbau von Pumpkraftwerken in Ländern wie D nur bedingt möglich. Andere Speichertechnologien wären zu untersuchen (z.B. Elektrolyse, Schwungmasse, ...).

Frage 4.2.4: Welche konkreten Massnahmen lassen sich für folgende Konzepte anwenden und zu welchen Ergebnissen sollen diese Massnahmen führen:

- Energie einsparen
- Energie effizienter nutzen
- Energie regenerativ erzeugen

Hinweis: Bewerten Sie die Maßnahmen bzgl. CO₂-Emissionen.

Lösung:

Energie einsparen: Massnahme: auf Einsatz von Energie verzichten; Ergebnis: Senkung des Bedarfs (Nachfrage) und somit der CO₂-Emissionen.

Energie effizienter nutzen: Massnahmen: Geräte mit besserem Wirkungsgrad einsetzen; Ergebnis: Senkung des Bedarfs (Nachfrage) und somit der CO₂-Emissionen.

Energie regenerativ erzeugen: Massnahmen: auf Primärenergiekosten (Brennstoffe) verzichten (keine variablen Kosten); Ergebnis: Angebot auf langfristig verfügbare Energiequellen ohne zusätzliche CO₂-Emissionen verlagern.

4.3. Übertragungsnetz

Folgende Abbildung zeigt die Netze der Übertragungsnetzbetreiber in Deutschland.

Frage 4.3.1: Welche Aufgaben haben die Übertragungsnetzbetreiber in Deutschland?

Frage 4.3.2: Anpassung von Angebot und Nachfrage im Netz: Wie in Aufgabe 3.2 gezeigt, wird der Bedarf an elektrischer Leitung im Tagesverlauf geplant und dieser Plan durch die Kraftwerksbetreiber durchgeführt. Im realen Verlauf gibt es Planabweichungen im Bereich einiger Prozent. Zum Ausregeln der Planabweichungen haben die Übertragungsnetzbetreiber Regelleistung von den Kraftwerksbetreibern eingekauft, die bei Bedarf abgerufen wird. Erläutern Sie das Prinzip und den Ablauf dieser Leistungsregelung.

Frage 4.3.3: Bei der Leistungsregelung unterscheidet man die sogenannte Primärregelung, die Sekundärregelung und die Minutenreserve. Erläutern Sie die Unterschiede und die Funktionsweise dieser Regelmechanismen.



Übertragungsnetze

Frage 4.3.4: In die Leistungsregelung sind derzeit nur die großen Kraftwerke eingebunden. Erzeuger erneuerbarer Energien nehmen an dieser Regelung nicht teil. Welche Konsequenzen ergeben sich mit dem weiteren Ausbau erneuerbarer Energien, wenn man an dieser Aufteilung festhält?

4.4. Photovoltaik

Unter Photovoltaik versteht man die direkte Stromerzeugung durch Sonnenlicht in Solaranlagen. Thermische Solaranlagen erzeugen im Unterschied hierzu Wärme.

Frage 4.4.1: Grenzschicht der Solarzelle. Erläutern Sie den Aufbau und die Funktionsweise einer Solarzelle. Wodurch entsteht das elektrische Feld?

Lösung: An der Grenzschicht zwischen n- und p-Schicht diffundieren die Löcher in die n-Schicht und die Elektronen in die p-Schicht. Es entsteht eine von freien Ladungsträgern verarmte Raumladungszone. Durch diese Verschiebung hat das n-Gebiet positive, das p-Gebiet negative Raumladung.

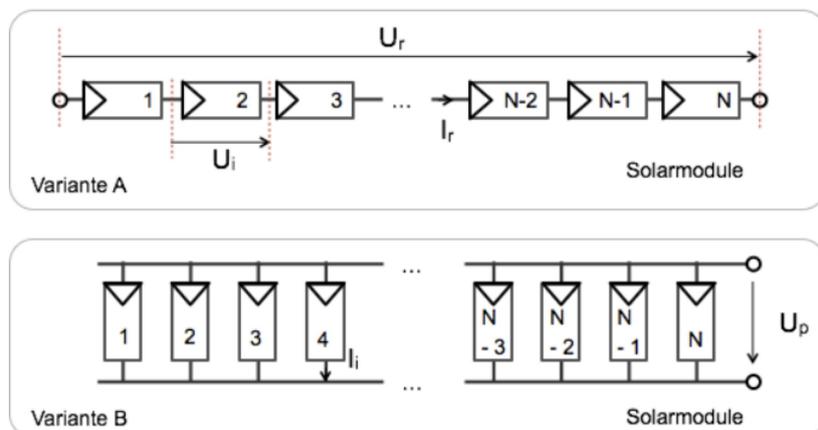
Frage 4.4.2: Leistung und Wirkungsgrad. Welche Faktoren bestimmen die Leistung und den Wirkungsgrad einer Photovoltaikanlage? Begründen Sie Ihre Aussage.

Lösung: siehe [2]; Fläche (Leistung), Winkel der Sonneneinstrahlung, Material, Wechselrichter zur Netzanbindung.

Frage 4.4.3: Wechselrichter. Wozu wird zur Anbindung ans Netz ein Wechselrichter benötigt? Welche Aufgaben hat der Wechselrichter? Erläutern Sie den Aufbau und die Funktionsweise.

Lösung: (1) Zum Wandeln des Gleichstroms der Photovoltaik-Anlage in Wechselstrom. (2) Einspeisung von Strom und Spannung ins Netz synchron zur Netzfrequenz und mit vorgegebenem Leistungsfaktor ($\cos \varphi$). (3) Gleichstromsteller (MPP-Tracker), Speicherkondensator, Brückenschaltung zum Netz, Schutzvorrichtung am Netzanschlusspunkt.

Frage 4.4.4: Solarpark. Solarmodule sind in den beiden in folgender Abbildung gezeigten Varianten verschaltet.



Verschaltung von Solarmodulen

Wie berechnen Sie die Leistung in beiden Fällen? Welche Vorteile bzw. Nachteile haben beide Varianten (z.B. bei Abschattung eines einzelnen Moduls)? Wie würden Sie eine größere Zahl Solarmodule in der Praxis verschalten?

Lösung: (1) $P = U \cdot I$. Reihenschaltung: $I = I_r$, $U = \sum U_i$; Parallelschaltung: $U = U_i$, $I = \sum I_i$ (2) Vorteile bzw. Nachteile: (a) Reihenschaltung: geringe Ströme, jedoch Unterbrechung des Stroms bei Abschattung eines einzelnen Moduls. (b) Parallelschaltung: hoher Gesamtstrom muss geführt werden. (3) Praxis: Kombination von Reihen- und Parallelschaltung. Bei der Reihenschaltung verhindern sogenannte Bypass-Dioden die Blockade durch einzelne abgeschattete Module.

4.5. Windkraft

Die Windenergie spielt eine zunehmend wichtige Rolle bei der Stromerzeugung. Für die Nutzung der Windenergie ist die Windgeschwindigkeit maßgeblich, da die potenzielle Leistung einer Windanlage mit der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit v wächst:

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 \quad (4.6.1)$$

Hierbei bezeichnen v_1 die Geschwindigkeit des einströmenden Windes, A die Rotorfläche und ρ die Dichte der Luft. Von der maximal möglichen Leistung P_0 entnimmt das Windrad den Anteil $P_N = c_p P_0$, mit dem Leistungsbeiwert c_p (siehe [2]).

Frage 4.6.1: Standort und Windgeschwindigkeit. Anlage B verfügt über einen höheren Turm als die sonst baugleiche Anlage A. Es sei angenommen, dass die Windgeschwindigkeit an Anlage B um 15% höher ist als an Anlage A. Um wie viel höher ist der Ertrag von Anlage B?

Lösung: Die Leistung des Windes, der die Anlagen treibt, steigt mit der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit. Aus dem Verhältnis der Geschwindigkeiten $v_B/v_A = 1,15$ ergibt sich somit $(v_B/v_A)^3 = (1,15)^3 = 1,52$. Der Ertrag ist somit über 50% größer.

Frage 4.6.2: Rotorleistung und Wirkungsgrad. Welche Faktoren bestimmen die Rotorleistung einer Windkraftanlage?

Lösung: Windgeschwindigkeit, Luftdichte, Rotorfläche, Leistungsbeiwert.

Frage 4.6.3: Drehzahl. Ein Windrad dreht sich mit 10 Umdrehungen pro Minute. Die Rotorlänge beträgt 50 m. Wie groß ist die Geschwindigkeit an den Flügelspitzen? Welcher Zusammenhang besteht zur Windgeschwindigkeit?

Lösung: (1) Kreisfrequenz $\omega = 2\pi n$, Geschwindigkeit der Spitze: $v = \omega R$ mit Rotorlänge R . Hieraus folgt $v = 2\pi \cdot 10 \text{ (1/min)} \cdot 50 \text{ m} = 3140 \text{ m/min} = 188 \text{ km/h}$. (2) Der Rotor bewegt sich quer zum Wind, die Windgeschwindigkeit ist geringer als die Geschwindigkeit der Rotorspitze in Drehrichtung.

Frage 4.6.4: Windpark. Zwanzig Windkraft-Anlagen mit einer Leistung von jeweils 5 MW sind in einem Windpark in Betrieb. Im Jahresmittel werden 3000 Betriebsstunden mit voller Last erwartet (Jahres-Volllaststunden). Welche Energie erzeugt der Windpark im Jahr? Vergleichen Sie den Windpark mit einem konventionellen Kraftwerk.

Lösung: (1) Stromerzeugung im Jahr: $20 \cdot 5 \text{ MW} \cdot 3000 \text{ Betriebsstunden} = 300 \text{ GWh}$; (2) konventionelles Kraftwerk: ca. 700 MW und ca 7000 Betriebsstunden pro Jahr = 4,9 TWh; (3) 09Energie konventionell / Energie Windpark = $4900 \text{ GWh} / 300 \text{ GWh} = 16,3$. Ca. 16 solcher Windparks können ein konventionelles Kraftwerk ersetzen.

4.6. Netzentwicklungsplan Strom

Mit dem Netzentwicklungsplan Strom 2021 wurde erstmalig der Kohleausstieg im Zusammenhang mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien für das Jahr 2035 vorausgeplant. Der Netzentwicklungsplan Strom 2023 für das Jahr 2037 (mit Ausblick auf das Jahr 2045) enthält erstmalig einen signifikanten Ausbau der Speicher im Netz [22]. Der Netzentwicklungsplan Strom wird von den Übertragungsnetzbetreibern erstellt und der Bundesnetzagentur (BNetzA) als Regulierungsbehörde zur Genehmigung vorgelegt. Der Netzentwicklungsplan bildet den Rahmen aller Investitionen für die Aufrüstung der Stromnetze.

Der aktuelle Netzentwicklungsplan Strom enthält folgende Eckpunkte zum Jahr 2037:

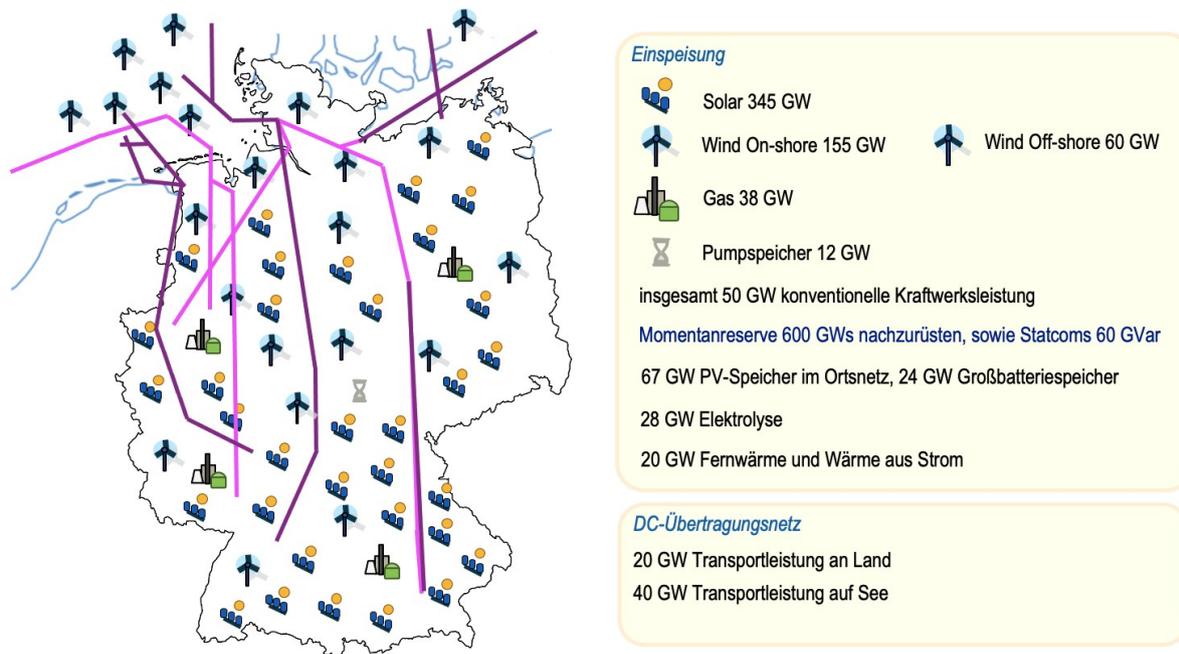
- Rückbau der Kernkraftwerke und Kohlekraftwerke
- Ausbau der Solarenergie bis 345 GW Anschlussleistung
- Ausbau der Windenergie bis 215 GW Anschlussleistung (hiervon ca. 60 GW off-shore)
- Ausbau der Gaskraftwerke auf 38 GW (von derzeit ca. 32 GW)
- Einsatz der vorhandenen Pumpspeicher von ca. 10 GW und Erweiterung auf 12 GW
- Somit Betrieb der Netze mit 50 GW konventioneller Kraftwerksleistung (Synchronmaschinen)
- Nachrüstung von 600 GWs an Momentanreserve zur Stabilisierung der Netze
- Einsatz von ca. 60 GVar an Kompensationsanlagen für Übertragungsleitungen
- Einsatz von 67 GW Anschlussleistung für Solarspeicher in den Verteilnetzen, damit Spitzen unverkäuflichen Solarstroms nicht in die Übertragungsnetze transportiert werden müssen
- Einsatz von 24 GW Anschlussleistung für Großbatteriespeicher im Netz
- Einsatz von ca. 28 GW Anschlussleistung für Elektrolyse (zur Produktion und Speicherung von Wasserstoff)
- Eine Anschlussleistung von 20 GW für Fernwärme und Wärmegewinnung aus Strom
- Einsatz von HGÜ-Strecken mit insgesamt 40 GW Transportleistung aus See (off-shore) und 20 GW an Land (on-shore).
- Außerdem sind un der Industrie Flexibilitäten im Umfang von 7 GW Anschlussleistung vorgesehen, die zur Anpassung der Nachfrage an das Angebot genutzt werden sollen.

Für das Jahr 2037 geht man hierbei von ca. 32 Mio. Elektrofahrzeugen und ca. 14 Mio. Wärmepumpen in Haushalten, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen aus. Diese Zahlen werden im Zuge der Energiewende weiter wachsen, ebenso die benötigte Anschlussleistung für Energiespeicher (Wärme, Elektrolyse und Brennstoffzellen). Hierzu enthält der Netzentwicklungsplan eine Prognose für das Jahr 2045.

Der Netzentwicklungsplan Strom ist an folgende Randbedingungen geknüpft:

- Einsatz nach heutigem Stand der Technik erprobter Technologien zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit.
- Planung der Übertragungsnetze. Für die Verteilnetze werden Randbedingungen definiert, jedoch erfolgt dort keine Planung.
- Beibehaltung der traditionellen Rollen zwischen Übertragungsnetzbetreibern und Verteilnetzbetreibern.

Folgende Abbildung zeigt eine Übersicht über das Stromnetz in Deutschland (Übertragungsnetz) zusammen mit den verbliebenen Kraftwerken. Hierbei steht jedes Symbol stellvertretend für eine Leistung von 10 GW.



Übertragungsnetz n Deutschland im Jahr 2037 nach dem Netzentwicklungsplan Strom

Frage 4.8.1: Welchen Zweck erfüllen die geplanten HGÜ-Strecken (DC-Übertragungsnetz)?

Lösung: Nach dem Plan folgt der Ausbau der Windenergie dem größeren Angebot in Küstennähe. Hierdurch ergibt sich ein Nord-Süd-Gefälle für das Angebot an Windenergie. Die HGÜ-Strecken transportieren diese Leistung in den Süden. Eine weitere Funktion ist die Vernetzung mit Staaten an der Küste (Niederlande, Dänemark, Frankreich, UK, ...).

Frage 4.8.2: Ausstieg aus Kernkraft und Kohle. Welche Unterschiede gibt es zwischen konventionellen Kraftwerken (Kernkraft, Kohle) und erneuerbaren Erzeugern? Wie zeigt sich das im Netzentwicklungsplan?

Lösung: Der wesentlicher Unterschied sind die Betriebsstunden: Ein konventionelles Kraftwerk wird mit ca 7600 Vollaststunden im Jahr betrieben, das Angebot an Wind beträgt ca. 3000 Stunden, das Angebot an Sonne ca 1000 Stunden (jeweils Vollaststunden im Jahr). Daher ist die Anschlussleistung der erneuerbaren Erzeuger am Netz größer, damit im Jahresmittel die gleiche Energiemenge erreicht wird. Anders ausgedrückt: Um ein konventionelles Kraftwerk der Leistung 1 GW zu ersetzen, wird das $7600/3000 \approx 2,5$ -fache an Windanlagen benötigt, also 2,5 GW.

Weitere Unterschiede: Die Leistung einzelner erneuerbare Erzeugungsanlagen ist kleiner. Die Anlagen verteilen sich daher im Netz als dezentrale Energiequellen. Die Standorte großer Anlagen richten sich

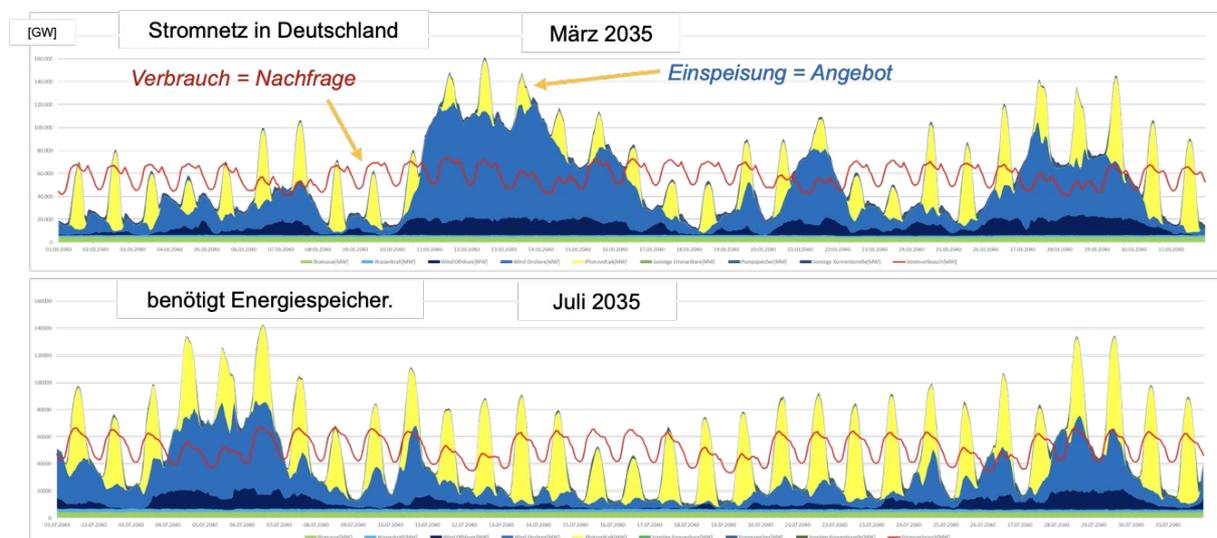
nach dem Angebot an Wind und Sonne, nicht nach der Nachfrage. Anlagen an günstigen Standorten gewinnen daher Ausschreibungen gegenüber Anlagen am Standort der Nachfrage.

Ein weiterer Unterschied besteht in der Betriebsweise der Anlagen: konventionelle Kraftwerke werden im Netz als Spannungsquellen eingesetzt: Sie stellen eine stabile Netzspannung bereit und liefern den jeweils benötigten Strom. Erneuerbare Erzeuger werden heute vorwiegend als reine Energiequellen betrieben, sie speisen Strom ins Netz und benötigen hierfür eine stabile Netzspannung. Ein Betrieb als Kraftwerk (der sogenannte spannungsgeführte oder netzbildende Betrieb) ist technisch möglich.

Der Netzentwicklungsplan berücksichtigt das Gefälle im Angebot an Windenergie durch die DC-Übertragungstrecken (siehe Frage 3.8.1). Die Anschlussleistung der erneuerbaren Erzeuger ist deutlich größer als die der rückgebauten Kraftwerke: 245 GW für Wind und Solar in 2035 (etwa ein Faktor 2 über dem heutigen Bestand) gegenüber ca. 60 GW rückgebauter Kraftwerksleistung.

Da der Netzentwicklungsplan Strom aus Gründen der Planungssicherheit den heutigen Stand der Technik verwenden muss, bleiben erneuerbare Erzeuger im stromgeführten Betrieb. Die Bereitstellung der Spannung übernehmen weiterhin konventionelle Kraftwerke: Gaskraftwerke (Bestand heute ca. 30 GW plus Neubau von ca. 15 GW), sowie die vorhandenen Pumpspeicherkraftwerke mit 10 GW. Zur Stabilisierung der Netze ist der Einsatz von 600 GWs an Momentanreserve vorgesehen, entsprechend einer Kraftwerksleistung von 60 GW mit einer Reserve von 10 s zum Ausgleich dynamischer Schwankungen, bis die Regler der Kraftwerke greifen. Diese Reserve kann durch schnelle Energiespeicher an geplanten Umrichtersystemen im Netz realisiert werden.

Frage 4.8.3: Energiespeicher. Rechnet man die heutigen Zahlen für das Angebot erneuerbarer Erzeuger (Wind und Solar) auf das Jahr 2035 hoch (indem man das Angebot nach heutigem Ausbau entsprechend dem geplanten Ausbau vervielfacht), so erhält man folgendes Bild. Die Zahlen für die heutige Basis sind hierbei [12] entnommen. Hochgerechnet wurde mit einem Faktor 2,5, etwas über dem Niveau des Netzentwicklungsplans, der einen Faktor 2 verwendet.



Angebot und Nachfrage bei Speisung durch erneuerbare Erzeuger

Welche Arten von Energiespeichern, gemessen an der Speicherdauer, werden künftig im Netz benötigt? Welche Anschlussleistung für Speicher schätzen Sie im Verhältnis zur Nachfrage an elektrischer Leistung (rote Kurve, Maximum bei ca 80 GW)? Wie beurteilen Sie den Bedarf an Energiespeichern zur Deckung von Versorgungslücken (Nachfrage übersteigt Angebot)? Wie beurteilen Sie diesbezüglich den Ausbau an Energiespeichern im Netzentwicklungsplan? Welche Menge an Windenergie sollte näherungsweise gespeichert werden?

Lösung: (1) Windenergie sollte über eine bis mehrere Wochen gespeichert werden können. Für Solarenergie reichen Speicher im Tageszyklus, die das Maximum von den Mittagsstunden in die Abendstunden verschieben (somit ca. 6 h Speicherdauer).

(2) Da die Spitzen von Wind und Sonne bis zur doppelten Nachfrage reichen, sollte die Anschlussleistung für Windspeicher und Solarspeicher jeweils etwa in der Größenordnung der Nachfrage liegen, also bei etwa 80 GW. Andernfalls muss man die nicht benötigte Leistung abregeln.

(3) Versorgungslücken lassen sich im Sommer teilweise durch kurzfristige Solarspeicher decken. Da das Angebot an Windenergie wochenweise schwankt, sind zum Ausgleich langfristige Energiequellen erforderlich, beispielsweise Gaskraftwerke und Brennstoffzellen, die aus überschüssiger Windenergie erzeugtes Gas verwenden, bzw. importiertes emissionsfreies Gas.

(4) Der geplante Ausbau von jeweils ca. 15 GW für Solarspeicher und Power-to-X, also Elektrolyse (Power-to-Gas) und Wärmespeicher (Power-to-Heat) erscheint nicht ausreichend und muss ggf. noch nach oben korrigiert werden. Mit 55 GW an konventioneller Kraftwerksleistung (45 GW Gaskraft und 10 GW Pumpspeicher) bleiben bei der vereinfachten Hochrechnung Versorgungslücken.

(5) Zu speichernde Energiemengen für Windanlagen: Näherungsweise ca. 80 GW über eine Woche, somit $80 \text{ GW} \cdot 24 \cdot 7 \text{ h} = 13 \text{ TWh}$. Dieser Wert muss um die Verluste bei der Elektrolyse, Methanisierung und erneuten Stromerzeugung nach oben korrigiert werden. Beispiel: Wirkungsgrad 80% Elektrolyse, 80% Methanisierung, 40% Verstromung im Gaskraftwerk = 25% Wirkungsgrad. Somit wäre für diesen Weg die 4-fache Menge an Windenergie erforderlich. Bei der Rückverstromung über Brennstoffzellen beträgt der elektrische Wirkungsgrad insgesamt etwa 64%, somit wäre etwa die doppelte Menge an Windenergie per Elektrolyse in Wasserstoff zu wandeln.

Frage 4.8.4: Elektrifizierung des Straßenverkehrs und Ersatz von Ölheizungen durch Wärmepumpen. Die Nachfrage nach elektrischer Energie wird durch den Mineralölausstieg in der Energieerzeugung wachsen. Welche Effekte ergeben sich hieraus auf die künftigen Netzentwicklungspläne?

Lösung: Im heutigen Netzentwicklungsplan für das Jahr 2037 geht man von ca. 32 Mio. Elektrofahrzeugen und ca. 14 Mio. Wärmepumpen aus. Der hierfür benötigte zusätzliche Strombedarf wurde in der Planung berücksichtigt. Ersetzt man den Fahrzeugbestand komplett durch Elektrofahrzeuge, muss man mit insgesamt 40 Mio. Fahrzeugen rechnen. Deutschland hat etwa 40 Mio. Haushalte. Ersetzt man verbliebene Ölheizung und Kohleheizungen durch Wärmepumpen, könnte sich der Ausbau gegenüber der Planung etwa verdoppeln.

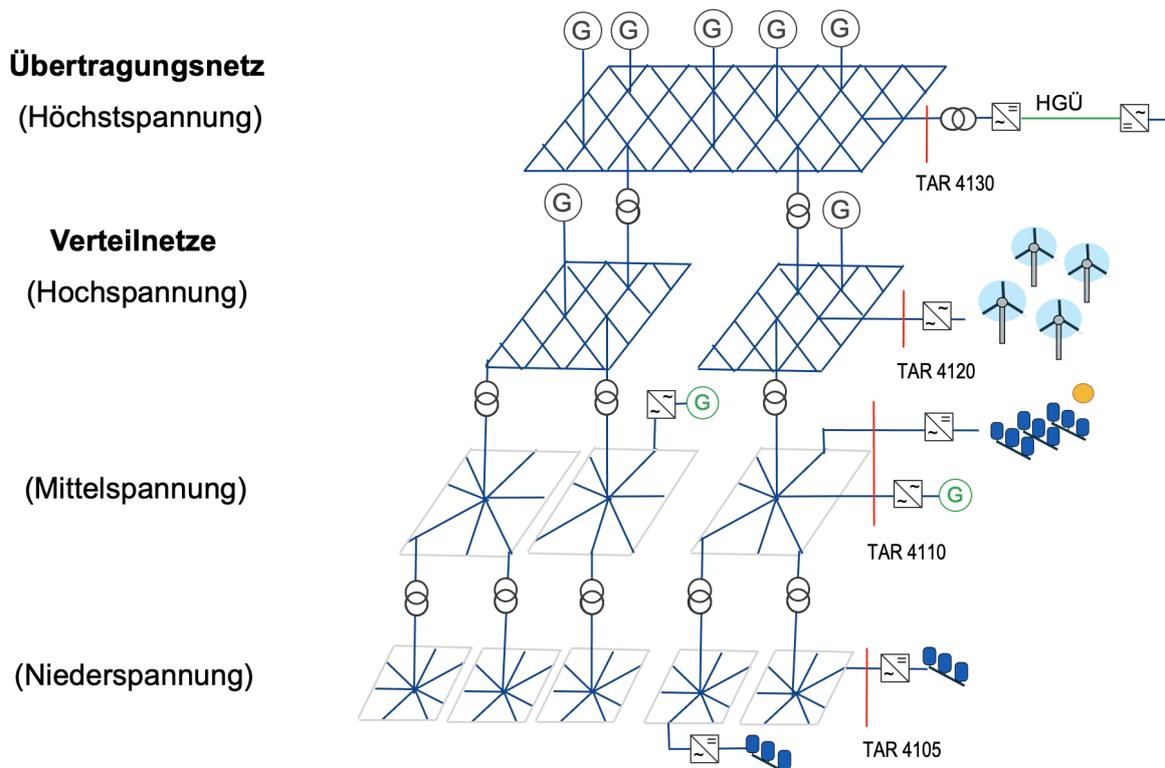
Die Energiebilanz für den Mineralölausstieg insgesamt erscheint effektiv und machbar, siehe Abschnitt 1.6. Da jeweils nur der Wirkanteil an elektrischer eingesetzt werden muss (ca 30%), steht einer großen Einsparung an Primärenergie und Emissionen (100%) ein vergleichsweise geringer Energieanteil gegenüber. Der Straßenverkehr in Deutschland benötigt heute ca. 700 TWh an Primärenergie. Die Stromnetze müssten einen Wirkanteil von ca. 30% hiervon bereitstellen, somit etwa 210 TWh.

Das Laden von Elektrofahrzeugen und die Heizung von Gebäuden findet in den untersten Ebenen der Verteilnetze statt, den Ortsnetzen. Hier ist der Einsatz lokaler Energieerzeuger (PV-Anlagen) und lokaler Speicher möglich, um die Netze zu entlasten, sowie um Wandlerverluste zu vermeiden. Als Alternative zur Wärmepumpe kommen außerdem Brennstoffzellen in Frage, die als Blockheizkraftwerke betrieben werden.

4.7. Anlagen am Netz

Für Anlagen, die am Netz betrieben werden, gelten technische Anforderungen, die in sogenannten Anschlussrichtlinien zusammengefasst werden. Als Anlagen werden Bezugsanlagen und Einspeiseanlagen unterschieden. Die Richtlinien (TAR = Technische Anschlussrichtlinien) fordern von den An-

lagen je nach Leistungsfähigkeit und Spannungsebene unterschiedliche Eigenschaften. Folgende Abbildung zeigt eine Übersicht.



Übersicht über die Struktur der Stromnetze

Die Netze unterteilen sich traditionell in Übertragungsnetze und Verteilnetze. Übertragungsnetze stellen die Versorgung über große Entfernungen bereit und sind mit der höchsten Spannungsebene verbunden (Höchstspannung, üblicherweise 380 kV). Leitungen im Übertragungsnetz erkennt man an den vielen Isolatoren an den Hochspannungsmasten, sowie an der Beseilung mit Viererbündeln an Leitern in den Leitungen. Ein solches Leitungssystem ist in der Lage, die Leistung eines großen Kraftwerks zu übertragen. Kraftwerke speisen traditionell direkt in die Übertragungsnetze ein. Die Betreiber der Übertragungsnetze kümmern sich auch um die Leistungsbilanz im Netz und um den Austausch mit benachbarten Übertragungsnetzen in Europa. Die Übertragungsnetze sind vermaschte Netze, d.h. dem Strom stehen mehrere Wege zur Verfügung.

Die Verteilnetze übernehmen traditionell die Aufgabe der Verteilung der Kraftwerksleistung in der Fläche. Wie bei einem Adersystem verästeln sich die Stromwege zu den kleineren Verbrauchern: große Leistungen werden über höhere Spannungsebenen verteilt, kleinere Leistungen mit kleineren Spannungen. Im Stromnetz bleibt die Stromstärke in einer Leitung hierbei gleich, es verästelt sich die elektrische Leistung. Übliche Spannungsebenen sind die Hochspannung (110 kV), Mittelspannung (20 kV bzw. 10 kV) und die Niederspannung (400 V). Hochspannungsleitungen erkennt man an der kleineren Bauform, den einfachen Isolatoren, und der einfachen Beseilung pro Leiter. Mittelspannungsnetze und Niederspannungsnetze werden zunehmend als Kabelnetze ausgeführt.

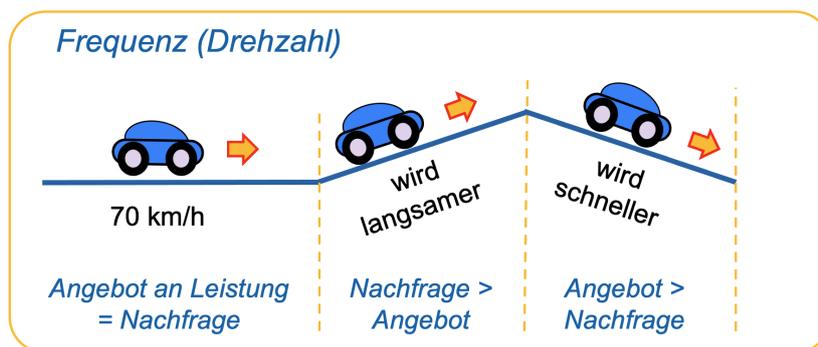
Die Darstellung in der Abbildung oben entspricht der Darstellung in Abschnitt 4.1. Große Verbraucher können an höhere Spannungsebenen angeschlossen werden. Ebenso werden erneuerbare Erzeugungsanlagen je nach ihrer Leistung an unterschiedliche Spannungsebenen angeschlossen. Als Daumenregel kann man davon ausgehen, dass die Transportleistung sich aus der Spannungsebene errechnet, wenn man mit einem Faktor 1000 multipliziert: 400 V transportieren bis zu 400 kW, 20 kV bis zu 20 MW, 110 kV bis zu 110 MW. Die Transportleistung der Übertragungsnetze beträgt wegen der Vierfachbeseilung der Leitungen das Vierfache: aus 380 kV errechnet man 1,5 GW. Anlagen am Netz

müssen technische Spielregeln einhalten, die in sogenannten technischen Anschlussrichtlinien (auf englisch: Grid Codes).

Leistungsregelung

Alle Kraftwerke im Netz (in der Abbildung mit einem Symbol „G“ für den Kraftwerksgenerator dargestellt) arbeiten gemeinsam und arbeitsteilig am Netz. Hierbei kommt die Frequenz im Netz (in Europa 50 Hz) durch die Drehzahl der Generatoren zustande. Somit arbeiten alle Generatoren im Netz synchron: Ihre Drehzahlen sind gleich.

Die Turbinen der Kraftwerke führen den Generatoren Leistung zu, die der Generator in elektrische Leistung wandelt und ins Netz speist. Von der Turbine zugeführte Leistung und ins Netz abgeführte Leistung sind hierbei immer im Gleichgewicht. Die Situation entspricht einem Fahrzeug, das sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegt, z.B. mit geringer Leistung auf ebener Strecke.



Prinzip der Leistungsregelung

Trifft dieses Fahrzeug auf eine Steigung, so wird mehr Leistung gefordert als der Motor zuführt: Das Fahrzeug wird langsamer. Der Fahrer (bzw. der Tempomat) geht aufs Gas, gleicht also die Motorleistung an die geforderte Leistung an. Diese Rolle übernimmt im Kraftwerk der Drehzahlregler der Turbine: Mit Hilfe der Drehzahl wird die Leistung geregelt. Diese Regelung funktioniert auch, wenn weniger Leistung gefordert wird, als die Turbine bereitstellt. In diesem Fall würde die Drehzahl höher.

Dieser Fall entspricht einem Fahrzeug, das auf ein Gefälle trifft: es wird weniger Leistung gefordert als zugeführt, der Fahrer drosselt die Motorleistung (ein Elektrofahrzeug würde Leistung rekuperieren). Die Drehzahl des Motors bzw. die Geschwindigkeit des Fahrzeugs liefert somit einen Indikator für die Bilanz der geforderten und zugeführten Leistung. Die Differenz zur geforderten Leistung wird aus dem Schwung des Fahrzeugs bzw. aus der Schwungmasse des Generator-Turbinensatzes erbracht. Diese Schwungmasse funktioniert als Energiespeicher der Leistungsregelung.

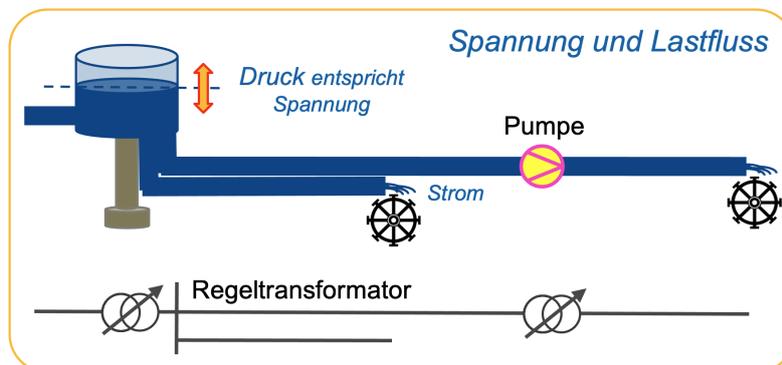
Für große Anlagen am Netz wird gefordert, dass sie sich konstruktiv bzw. netzdienlich verhalten: Übersteigt die Netzfrequenz eine vorgegebene Schwelle, soll die eingespeiste Leistung gedrosselt werden. Unterschreitet die Netzfrequenz eine weitere Schwelle, sollen Bezugsanlagen ihre Leistung reduzieren. Zwischen beiden Schwellen verhalten sich die Anlagen neutral (die Leistung bleibt unverändert): In diesem Bereich regeln die Kraftwerke die Leistung im Netz.

Spannung und Lastfluss

Bezugsanlagen entnehmen dem Netz Leistung. Mit dem Stromfluss verbunden ist ein Sinken der Spannung im Netz an den Leitungen und Transformatoren. Umgekehrt drücken Einspeiseanlagen mit wachsender Leistung durch ihren Strom die Spannung im Netz nach oben. Auch hierfür enthalten die Anschlussrichtlinien technische Vorschriften für Anlagen.

Die Spannung im Netz wird im Tagesverlauf mit Hilfe von Regeltransformatoren konstant gehalten. Bei der Wasserversorgung entspricht die Spannung im Netz dem Wasserdruck. Auch dieser muss in einem Wassernetz konstant gehalten werden, damit beim Öffnen eines Hahns ausreichend Wasser fließen kann. Im Wassernetz übernehmen diese Rolle Hochbehälter bzw. Druckbehälter.

Im Stromnetz entspricht diese Funktion der Regeltransformatoren: Sie passen im laufenden Betrieb ihr Übersetzungsverhältnis an, so dass das Spannungsgefälle über dem Transformator der Leistungsentnahme bzw. der Einspeisung folgt und die Spannungsunterschiede ausgleicht.



Prinzip der Spannungsregelung

Mit der Spannungsregelung verbunden ist eine Verbesserung des Lastflusses: Stimmt der Druck im Leitungsnetz, so kann das Wasser am besten fließen, wo es benötigt wird. Im Stromnetz kann der Strom bei geregelter Spannung überall dorthin fließen, wo er benötigt wird. Auf diese Weise ist die Regelung der Spannung mit einer Optimierung des Lastflusses verbunden.

4.8. Leistungsregelung

Die Leistungsregelung dient der Anpassung des Angebotes an Leistung im Netz an die aktuelle Nachfrage an Leistung im Netz. Angebot und Nachfrage wurden zwar für den Tagesverlauf im voraus geplant (siehe Abschnitt 1.2). Jedoch gibt es in der Realität Planabweichungen in der Größenordnung weniger Prozent. Die Leistungsregelung gleicht diese Planabweichungen aus.

Die Leistungsregelung erfolgt im Netz in verschiedenen Stufen:

- **Momentanreserve:** Stellt Leistung aus den Energiespeichern der Erzeugern bereit, bei konventionellen Kraftwerken aus der Schwingmasse bzw. kinetischen Energie der Generator-Turbinensätze. Der Effekt ist jedem Fahrradfahrer und Autofahrer bekannt: Eine Steigung rollt man ein Stück hinauf, jedoch wird man langsamer. Das Leistungsdefizit wird aus der kinetischen Energie gedeckt, die hierdurch sinkt. Die langsamere Geschwindigkeit (bzw. Drehzahl) veranlasst den Regler (Fahrradfahrer, Tempomat, Primärregler), mehr Gas zu geben.
- **Primärregelung:** Reagiert auf die Drehzahl (bzw. Netzfrequenz) und wirkt sofort bis wenige Minuten. Die Primärregelung erfolgt im Kollektiv durch das Kollektiv der großen Kraftwerke. Hierbei ist die Netzfrequenz ein Indikator für die Leistungsbilanz im Netz: Weicht die Netzfrequenz vom Sollwert 50 Hz (im europäischen Netzverbund) nach oben ab, wird weniger Leistung entnommen als geplant. Sinkt die Netzfrequenz unter den Sollwert von 50 Hz, wird mehr Leistung entnommen als geplant. In beiden Fällen erfolgt eine Anpassung der von den Kraftwerken abgegebenen Leistung (indem mehr oder weniger Dampf auf die Turbinen gegeben wird).
- **Sekundärregelung:** Wirkt ab 30 Sekunden bis 15 Minuten und löst die Primärregelung ab. Bei der Sekundärregelung muss derjenige Netzbetreiber die Leistungsbilanz ausgleichen, dessen Netz die Planabweichung verursacht hat. Der Leistungsausgleich erfolgt wiederum durch Anpassung der Kraftwerksleistung (durch erhöhte oder reduzierte Brennstoffzufuhr).
- **Minutenreserve:** Wirkt ab 15 Minuten und löst die Sekundärregelung ab. Hierzu werden zusätzliche Kraftwerke aktiviert, bzw. Kraftwerke heruntergefahren.

Frage 5.4.1: Welchen Sinn hat das Ausregeln im Kollektiv der Kraftwerke bei der Primärregelung?

Lösung: Der Ausgleich im Kollektiv dient der Stabilisierung des Netzes, unabhängig davon, welcher Betreiber die Leistungsabweichung verursacht hat. Alle Synchrongeneratoren im Netz sind miteinander

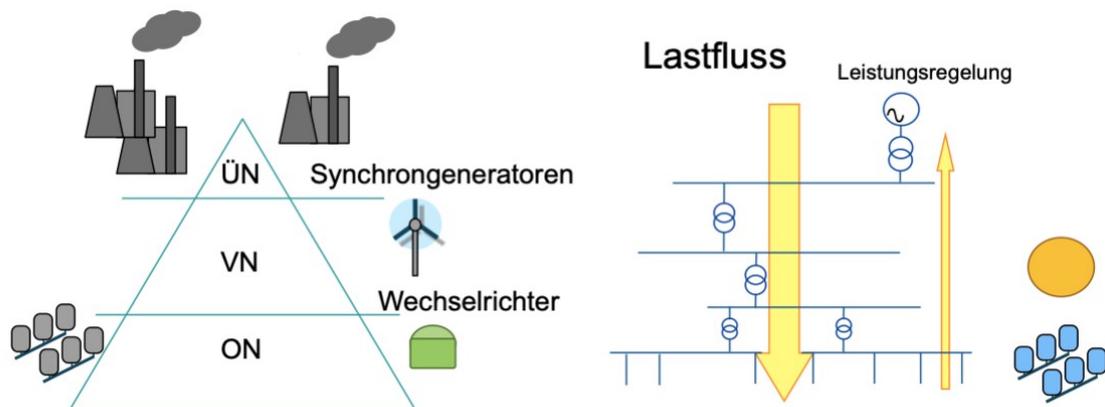
der an die Netzfrequenz gekoppelt. Die Änderung der Netzfrequenz mit der Abweichung der Leistung vom eingestellten Sollwert ist eine physikalische Eigenschaft der Synchrongeneratoren und wird durch deren Schwungmasse verursacht, in Kombination mit deren Leistungsreglern.

Frage 5.4.2: Welchen Sinn hat das Ausregeln der Leistungsbilanz durch den Verursacher bei der Sekundärregelung?

Lösung: Mehr Leistung ist mit höheren Kosten (für die Brennstoffe) verbunden. Jeder Netzbetreiber ist angehalten, seinen Bedarf möglichst genau zu planen. Für Planabweichungen kaufen die Netzbetreiber Regelleistung ein, die von den Kraftwerksbetreibern vorgehalten wird und von den Netzbetreibern bei Bedarf abgerufen wird.

Netzbetreiber sind hierbei die Übertragungsnetzbetreiber (siehe Abschnitt 1.3). An den Netzübergängen der Übertragungsnetzbetreiber befinden sich Leistungsmesser. Somit lässt sich jederzeit die Summe der zugeführten und abgeführten Leistung berechnen und feststellen, ob die Leistungsbilanz vom Plan abweicht. In diesem Sinne werden die Übertragungsnetze auch als Bilanzkreise bezeichnet.

Frage 5.4.3: Erzeuger erneuerbarer Energien sind grösstenteils im Vergleich zu den Kraftwerken wesentlich kleinere Anlagen, die sich in die unteren Netzebenen verteilen. Anlagen erneuerbarer Energien sind bisher in die Leistungsregelung nicht eingebunden. Folgende Abbildung zeigt links die Struktur der Netze (ÜN: Übertragungsnetze, VN: Verteilnetze, ON: Ortsnetze). Im rechten Teil der Abbildung ist der Lastfluss dargestellt. Ursprünglich wurden die Netze konzipiert für einen Lastfluss von den großen Kraftwerken in den Übertragungsnetzen zu den Verbrauchern in den unteren Netzebenen. Welche Änderungen bzgl. Des Lastflusses ergeben sich durch die erneuerbaren Energien?



Erzeuger und Lastfluss im Netz

Frage 5.4.4: Welche Konsequenzen ergeben sich für die Leistungsregelung, speziell für die Primärregelung, durch folgendes Szenario: Die Wolkendecke über Süddeutschland reißt auf, und 10 GW Leistung aus Photovoltaik werden zusätzlich ins Netz geliefert.

Frage 5.4.5: Welche Konsequenzen bzgl. der Leistungsregelung, speziell der Primärregelung, ergeben sich mit fortschreitendem Ausbau der erneuerbaren Energien im Netz? Diskutieren Sie ein Szenario mit 20% erneuerbaren Energien, 50% erneuerbaren Energien, sowie den weiteren Ausbau mit bis zu 80% erneuerbaren Energien.

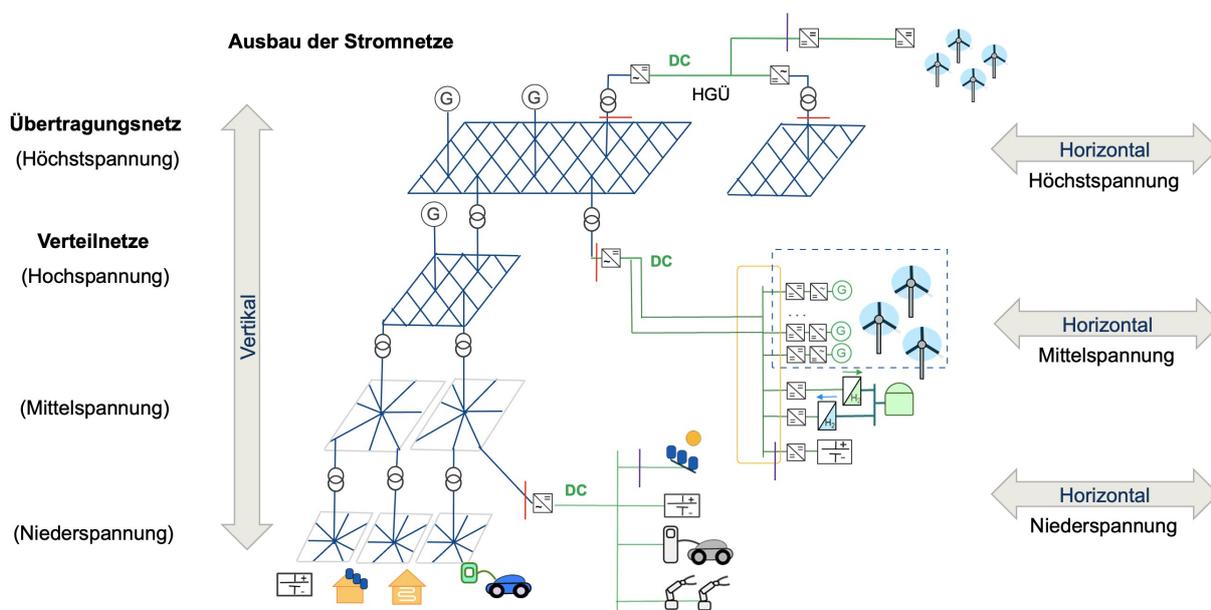
Frage 5.4.6: Halten Sie es für denkbar, Erzeuger erneuerbare Energien an der Primärregelung zu beteiligen? Könnte man das bisherige Konzept zur Leistungsregelung mit fortschreitendem Ausbau der erneuerbaren Energien auf Dauer beibehalten (Netzfrequenz als Indikator der Leistungsbilanz, Primärregelung im Kollektiv der Erzeuger, Bilanzkreise zur Sekundärregelung)?

4.9. Ausbau der Netze im Zuge der Energiewende

Im Zuge der Energiewende soll der Bedarf an elektrischer Energie um einen Faktor 2,5 steigen: Die Stromnetze sollen mehr als das Doppelte an Energie (gemessen in TWh) transportieren (siehe Abschnitt 2.2, Fahrplan für die Energiewende). Die jährliche Energiemenge einer Erzeugungsanlage errechnet sich aus der Anschlussleistung der Anlage und den Betriebsstunden der Anlage im Jahr: eine PV-Anlage mit 10 kW Spitzenleistung und 1000 Betriebsstunden (Vollaststunden) im Jahr liefert eine Energie von 10 MWh. Für Windräder rechnet man an Land mit ca. 2000 Betriebsstunden im Jahr, ein Windpark gleicher Anschlussleistung liefert also den doppelten Ertrag eines Solarparks.

Die im Zuge der Energiewende benötigte Anschlussleistung lässt sich mit Hilfe mittlerer Betriebsstunden aus der Energiemenge ableiten. Gemessen am heutigen Ausbau erneuerbarer Erzeuger beträgt der benötigte Ausbau nach den Plänen aus Abschnitt 2.2 einen Faktor von annähernd 10. Auch dieser Wert ist ein globaler Mittelwert. Im Einzelfall hängt der Faktor von der Startposition ab: In Ländern mit bereits signifikantem Ausbau erneuerbarer Erzeuger fällt die Steigerung geringer aus (in Europa um einen Faktor 6, Asien um einen Faktor 9 und Nordamerika um einen Faktor 12, siehe [31]). Entscheidend sind hierbei allerdings die absoluten Zahlen, nicht das relative Wachstum.

Für die Stromnetze bedeutet dies einen signifikanten Ausbau auf allen Spannungsebenen (vertikale Richtung), und innerhalb der Spannungsebenen (horizontaler Netzausbau). Folgende Abbildung zeigt eine Übersicht in der Darstellung zum Eingang des Kapitels.



Ausbau der Stromnetze im Zuge der Energiewende

Der Ausbau der Erzeuger erfolgt am besten in der Nähe der Verbraucher. Auf diese Weise bleibt der Netzausbau auf die Region begrenzt. In den konventionellen Netzen befanden sich hinreichend viele Kraftwerke in der Nähe der Verbraucherzentren (bei thermischen Kraftwerken wegen der Kühlung und der Brennstoffzufuhr an Flüssen). In Prinzip ließen sich mit PV und Windanlagen gespeiste Netze noch engmaschiger bauen. Allerdings sind die Windträge in Küstennähe sehr viel größer, daher ist ein Netzausbau hierfür abzuwägen gegen Anlagen mit geringeren Erträgen in Verbrauchernähe. In konventionellen Netzen verfügen die Kraftwerke über Energiespeicher: bei Kohlekraftwerken den Kohlebunker. Auf diese Weise kann das Angebot (= Stromproduktion) der Nachfrage (= Stromverbrauch) folgen.

Durch erneuerbare Erzeuger gespeiste Netze benötigen ebenfalls Energiespeicher, um ein Überangebot an Solarleistung von der Mittagszeit in die Abendstunden zu verschieben (Kurzzeitspeicher), bzw. um ein Überangebot an Windenergie in Zeiten der Flaute zu verschieben (Langzeitspeicher). Auch hier beeinflusst die Lage der Energiespeicher den Netzausbau: Grundsätzlich sollten

Speicher in der Nähe der Erzeugungsanlage aufgebaut werden. Andernfalls sind die Kosten des Netzausbaus gegen die Platzierung der Speicher in Nähe der Erzeuger abzuwägen.

Die meisten erneuerbaren Erzeuger und Speicher (wie Batteriespeicher sowie Elektrolyse und Brennstoffzellen für Wasserstoffspeicher) sind Gleichstromsysteme. Schließt man sie einzeln über AC/DC-Wandler an das Stromnetz an ergeben sich hohe Konverterverluste auf dem Weg des Stroms vom Erzeuger in den Speicher und von dort wieder ins Netz. Diese Verluste lassen sich vermeiden, wenn man Gleichstromsysteme direkt über Gleichspannungsnetze koppelt.

Eine solche Anordnung ist in der Abbildung oben für Anlagen der Niederspannung und Anlagen der Mittelspannung dargestellt:

- Niederspannung: Als Anlagen kommen größere Solaranlagen bis zu 2 MW in Frage, sowie Schnellladesysteme in Gewerbegebieten und Einkaufszentren, die durch Batteriespeichersysteme gekoppelt sind, bzw. die Kombination von PV-Anlagen mit Batteriespeichern und Fertigungsautomaten. Hier vermeidet man Konverterverluste durch die direkte Kopplung der Gleichstromsysteme über ein Gleichstromnetz. Hierdurch ergibt sich auch eine Entlastung am Einspeisepunkt ins Stromnetz.
- Mittelspannung: Hier kommen Windparks und große Solarparks in Frage mit Leistungen bis zu 40 MW. Als Energiespeicher dienen kurzfristig (im Bereich einer Stunde) Batteriespeicher zur Aufnahme bzw. Entnahme von Leistung, bis die langsameren Anlagen zur Elektrolyse bzw. Rückverstromung in Brennstoffzellen angelaufen sind. Als Langzeitspeicher dienen Wasserstofftanks und Wassertanks. Bei der Kopplung über Gleichspannungssysteme lassen sich DC/DC-Wandler als Gleichspannungstransformatoren einsetzen. Auch hier übersteigt die Anschlussleistung der einzelnen Systeme Windpark, Batteriespeicher, Anlagen für den Wasserstoffspeicher) die Leistung am Anschlusspunkt zum Stromnetz um ein Vielfaches.

Beim Ausbau in der obersten Spannungsebene kann man davon ausgehen, dass weiterhin HGÜ-Systeme zum Einsatz kommen, die aber in der Zukunft nicht nur als Punkt-zu-Punkt-Verbindungen eingesetzt werden, sondern als vermaschte Netze mit Sammelschienen in Gleichspannungstechnik. Über solche Systeme ließen sich dann auch Windparks auf See bzw. größere Anlagen an Land direkt in die Gleichspannungsebene im Übertragungsnetz einbinden.

Die Kopplung von Windparks bzw. großen Solarparks mit Energiespeichern ermöglicht in Kombination mit der direkten Anbindung an das Übertragungsnetz (mit Hilfe von Gleichspannungs-Verteilnetzen in der Mittelspannung) den Kraftwerksbetrieb mit erneuerbaren Erzeugern. Auf diese Art tragen ausgewählte Anlagen als Kraftwerke zur Stabilisierung der Netze bei.

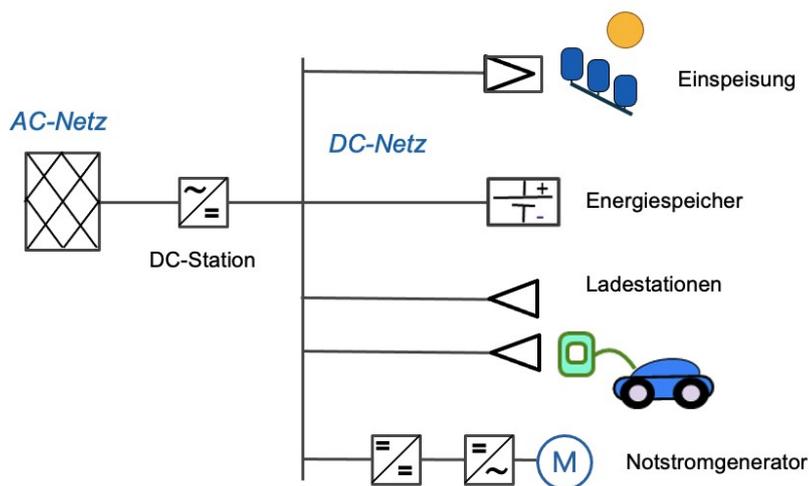
In Summe ist die fortschreitende Elektrifizierung im Zuge der Energiewende mit einem Ausbau der Stromnetze verbunden, der auch zu neuen Netzstrukturen führen wird. Hierdurch ergeben sich auch neue Anforderungen für die Richtlinien zu, Anschluss der Anlagen ans Netz, sowohl in der Wechselspannung als auch in der Gleichspannung.

4.10. Inselnetz mit Stromspeicher

Folgende Abbildung zeigt ein Inselnetz mit Fotovoltaik (PV-Generator) und Stromspeicher (Batterie), das durch einen Dieselgenerator (Back-up-Generator) unterstützt wird. Die Anlage soll folgende Anforderungen erfüllen:

- Jährliche Energiemenge: 100 MWh, hiervon 50% AC Verbraucher
- PV-Anlage: 900 kWh im Jahr pro kWp, Solarmodule mit Nennleistung 240 Wp (bei 40 VDC Spannung und 6 A Strom)
- Wechselrichter: 1000 V DC, Scheinleistung (AC): 24 kVA
- Batterie und Diesel sollen nur zur Pufferung nachts und bei schlechtem Wetter eingesetzt werden.

Der DC-Bus soll mit 1000 V betrieben werden.



Inselnetz mit Stromspeicher

Frage 4.10.1: Auslegung der PV-Anlage. Welche Leistung P_{vp} benötigt die PV-Anlage? Wie viele Solarmodule werden benötigt? Wie erfolgt die Beschaltung?

Lösung: (1) Mit einer Ausbeute von 900 kWh im Jahr pro kW_p werden für 100 MWh insgesamt $P_{vp} = 111 kW_p$ benötigt. (2) Dieser Wert entspricht $m = 111 kW_p / 240 W_p = 463$ Modulen. (3) Für eine DC-Spannung von 1000 V sind jeweils $s = 1000 V / 40 V = 25$ Module in Serie zu schalten (25 Module pro Strang). Es ergeben sich $463 / 25 = 18,5$ Stränge (strings). In der Praxis würde man 18 Stränge mit insgesamt 450 Modulen verwenden.

Frage 4.10.2: Auslegung der Wechselrichter. Wie viele Wechselrichter werden benötigt? Wie viele Solarmodule bzw. Stränge von Solarmodulen kann ein Wechselrichter bedienen? Wie erfolgt die Beschaltung?

Lösung: (1) Über Wechselrichter wird 50% der benötigten Leistung bereitgestellt (Anteil der AC-Verbraucher). Bezogen auf die Spitzenleistung $P_{vp} = 111 kW_p$ werden also ca. 55 kVA benötigt. Diese Leistung kann durch 2 Wechselrichter bereit gestellt werden: $2 \times 24 kVA = 48 kVA$. (2) Mit einer Nennleistung von 24 kVA kann ein Wechselrichter 100 Solarmodule bedienen. (3) Beschaltung: Über den DC-Bus mit 1000 V. Der Strangstrom beträgt jeweils 6 A. Die Leistung eines Strangs entspricht somit 6 kW. Ein Wechselrichter kann somit 4 Stränge bedienen (mit insgesamt 100 Solarmodulen).

Frage 4.10.3: Auslegung der Batterie. Als grobe Abschätzung entfällt ein Anteil von 20% des mittleren tägliches Energiebedarfs auf die Nachtstunden. Dieser Anteil ist durch die Batterie abzudecken. Welche Batteriekapazität wird benötigt (in kWh)? Wie viele Ladezyklen sind bei einer Betriebsdauer von 10 Jahren erforderlich?

Lösung: 20% des Jahresmittels: 20 MWh. Bei 365 Tagen im Jahr werden also täglich $20 MWh / 365 = 55 kWh$ Batteriekapazität benötigt. Ladezyklen: mindestens $10 \times 365 = 3650$.

Frage 4.10.4: Auslegung des Diesel-Generators. Der Dieselgenerator soll Schlechtwetter-Perioden von 2 Wochen abdecken. Welche Generatorleistung ist erforderlich, wenn die PV-Anlage bei schlechtem Wetter nur noch 50% ihrer Leistung bringt? Wie schätzen Sie die Kosten für den Diesel-Generator ein (Investitionskosten, Betriebskosten)? Was wären mögliche Alternativen?

Lösung: (1) Der Dieselgenerator benötigt zur Bereitstellung der halben Spitzenleistung der PV-Anlage eine Leistung von $P_{dp} = 0,5 P_{vp} = ca. 55 kVA$. (2) Investitionskosten: sehr hoch, Betriebskosten: gering, wenn selten in Betrieb, sehr hoch, wenn oft in Betrieb. (3) Alternativen: (a) Solaranlage überdimensionieren, so dass auch bei schlechten Wetter ein Beitrag geleistet werden kann. (b) Ggf. Ergänzung durch eine Windanlage.

5. Speicherung elektrischer Energie

5.1. Pumpspeicher

Pumpspeicherwerke pumpen im Speicherbetrieb Wasser von einem Tiefbecken in ein höher gelegenes Speicherbecken bzw. in einen Speichersee. Im Kraftwerksbetrieb arbeiten solche Anlagen als Speicherkraftwerke: Wasser aus dem Speicherbecken treibt mit Hilfe einer Turbine einen Generator an. Gespeichert wird die potentielle Energie des Wassers, die proportional zum Höhenunterschied zwischen dem Speicherbecken und dem Tiefbecken ist (der sogenannten Fallhöhe).

Pumpspeicher werden bis zu einer Leistung von ca 1 GW mit Speicherkapazitäten von bis zu 8 GWh realisiert. Der Wirkungsgrad wird durch Reibungsverluste (Strömungswiderstand, hydraulische Verluste) und den Wirkungsgrad der Pumpe bestimmt. Insgesamt sind Wirkungsgrade von 70% bis 80% realisierbar. Die potentielle Energie des Pumpspeichers lässt sich wie folgt berechnen:

$$E_{pp} = \rho V g h_p \quad (5.1)$$

Hierbei bezeichnet V das Abflussvolumen (in m^3), ρ die Wasserdichte (in kg/m^3), g die Erdbeschleunigung (in m/s^2) und h_p die Fallhöhe (in m).

Frage 6.1.1: Es soll eine Anlage mit 8 GWh Speicherkapazität realisiert werden. Diese Kapazität soll innerhalb von 8 Stunden abrufbar sein. Es steht eine Fallhöhe von 300 m zur Verfügung. Welche Wassermenge (welches Wasservolumen) muss eine solche Anlage bewegen? Wie viel Wasser fließt pro Sekunde?

Lösung: Gefragt ist das Volumen V aus der Gleichung oben: $V = \rho g h_p / E_{pp}$

Annahmen: $\rho = 1 \text{ kg/dm}^3$, $g = 10 \text{ m/s}^2$

Einsetzen zusammen mit $h = 300 \text{ m}$ ergibt: $V = 9,6 \text{ Mio. m}^3 \text{ Wasser} = \text{ca } 10 \text{ Mio. m}^3$

Angenommen, man verfügt über 10 m tiefe Becken, so beträgt die Fläche jeweils 1 Mio. m^2 (d.h. 1 km^2) für das Oberbecken sowie für das Unterbecken.

Es fließen 1,2 Mio. m^3 Wasser pro Stunde bzw. 333 m^3 Wasser pro Sekunde. Die Pumpen wären auf 1 GW mechanische Leistung auszulegen, die elektrische Leistung ist je nach Wirkungsgrad der Pumpe höher. Die Turbine ist ebenfalls auf 1 GW Leistung auszulegen. Je nach Wirkungsgrad der Turbine kann die Leistung des Generators etwas geringer ausfallen.

Frage 5.1.2: Das leistungsstärkste Pumpspeicherwerk in Baden-Württemberg (Kraftwerk Wehr) hat eine Generatorleistung von 910 Megawatt und eine Pumpleistung von 980 Megawatt. Das Oberbecken fasst 4,4 Millionen Kubikmeter Wasser und hat eine Fallhöhe von 630 Metern zum Unterbecken. Das Unterbecken fasst 4,1 Millionen Kubikmeter Wasser. Über welchen Zeitraum kann das Pumpspeicherwerk Leistung aufnehmen bzw. Leistung abgeben? Wie viel Wasser fließt hierbei pro Sekunde? Welche Speicherkapazität steht zur Verfügung?

Frage 5.1.3: Die in Deutschland verfügbare Gesamtleistung der Pumpspeicherwerke beträgt ca 7 GW mit einer Speicherkapazität von insgesamt ca 40 GWh. Der durchschnittliche Wirkungsgrad beträgt 70%. Die Bruttostromerzeugung beträgt jährlich ca 600 TWh. Wie schätzen Sie die Relevanz der in Deutschland verfügbaren Pumpspeicher als Energiespeicher im Zusammenhang mit erneuerbaren Energien ein?

Frage 5.1.4: Welche Einschränkungen bestehen für den weiteren Ausbau der Speicherkapazitäten durch Pumpspeicher?

5.2. Druckluftspeicher

Beim Druckluftspeicher wird Luft in unterirdische Kavernen (z.B. in Salzstöcken bzw. Bergwerken) gepumpt und hierbei komprimiert. Die durch die Kompression gespeicherte Energie berechnet sich zu:

$$E_{\text{Gas}} = V p = m R_S T \quad (6.2)$$

Hierbei bezeichnet V das Volumen des komprimierten Gases in der Kaverne (in m^3) und p den Druck des Gases (in $\text{bar} = 10^5 \text{ Pa} = 10^5 \text{ N/m}^2$). Bei einem Gas ist das Produkt aus Volumen gleich dem Produkt aus der Masse m , der Temperatur T (in Kelvin) und der spezifischen Gaskonstante R_S (für trockene Luft mit Wert $R_S = 287 \text{ J / kg K}$). Hier ist das Volumen vorgegeben. Den Druck kann man entweder mit Hilfe der Temperatur erhöhen, oder durch Zustrom von Gas mit der Masse m .

Bei der Kompression entstehende Wärme geht entweder an die Umgebung verloren oder wird für einen besseren Wirkungsgrad in einem Wärmespeicher zwischengespeichert. Die erreichbaren Wirkungsgrade bewegen sich deutlich unterhalb des Wirkungsgrades eines Pumpspeichers. Mit Nutzung der Wärme werden ca 70% erreicht, ohne mit Nutzung der Wärme ca 40%.

Frage 5.2.1: Für einen Druckluftspeicher stehen Kavernen mit einem Gesamtvolumen von 300000 m^3 zur Verfügung (ca. 120 m Höhe bei ca. 60 m Durchmesser). Die Luft lässt sich in der verfügbaren Anlage auf 70 bar komprimieren. Welche Energiemenge ließe sich in dieser Anlage speichern?

Lösung: $E_{\text{pd}} = 0,3 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \cdot 7 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 2,1 \cdot 10^{12} \text{ Js} = 2,1 \cdot 10^{12} / (3,6 \cdot 10^6) \text{ kWh} = 583 \text{ MWh}$.

Bemerkung: Mit Normaldruck der Luft von 1 bar wäre die Energiemenge gegenüber dem Normaldruck genau genommen mit der Druckdifferenz $\Delta p = 70 \text{ bar} - 1 \text{ bar} = 69 \text{ bar}$ zu bewerten.

Frage 5.2.2: Die Anlage aus Aufgabe 6.2.1 soll ihre Kapazität innerhalb von 8 Stunden auffüllen können. Für welche Leistung sind die Kompressoren auszulegen?

Lösung: Um eine Energiemenge von 583 MWh in 8 Stunden zu erbringen, würde eine Leistung von insgesamt 73 MW benötigt.

Frage 5.2.3: Die Speicherkapazität der Anlage aus Aufgabe 6.2.1 soll innerhalb von 2 Stunden ausgeschöpft werden können. Hierzu wird die komprimierte Luft in die Brennkammer einer Gasturbine gegeben und mit Erdgas aus einer Gasleitung verbrannt. Die komprimierte Luft leistet hierbei 2/3 der Gesamtarbeit der Turbine (diese Arbeit müsste sonst durch einen Verdichter geleistet werden). Für welche Leistung sind Gasturbine und Generator auszulegen?

Lösung: Wenn die komprimierte Luft 2/3 der Gesamtarbeit leistet, ergänzt die Verbrennung in der Gasturbine 1/3 der Gesamtarbeit. Die Arbeit ist also bezogen auf die komprimierte Luft 50% höher anzusetzen (Verhältnis 1/3 zu 2/3). Gasturbine und Generator leisten also $583 \text{ MWh} \cdot 1,5 / 2 \text{ h} = 437 \text{ MW}$.

Frage 5.2.4: Welche Energiedichte (in kWh/kg) erreicht der Druckluftspeicher?

Lösung: Für die Energiedichte θ erhält man $\theta = E_{\text{Gas}} / m = (V p) / m = R_S T$.

Die Energiedichte hängt somit nur von der spezifischen Gaskonstante und der Temperatur ab. Mit den oben genannten Werten ergibt sich $\theta = 287 \text{ J/(kg K)} \cdot 273 \text{ K} = 78350 \text{ J/kg} = 0,021 \text{ kWh/kg}$.

Bemerkung: Für Luft mit Normaldruck $p = 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 10^5 \text{ N/m}^2$ bei 273 K erhält man eine Dichte von $\rho_0 = 10^5 / (287 \cdot 273) \text{ (N kg / J m}^2) = 1,28 \text{ kg/m}^3$. Bei einem Druck von 70 bar ist die Luft entsprechend dichter.

5.3. Schwungmassen

Wenn mit Hilfe elektrische Energie ein Schwungrad angetrieben wird, dient die Schwungmasse als Speicher für kinetische Energie (Rotationsenergie). Mit dem Trägheitsmoment J (in kg m^2) der Schwungmasse, sowie der Kreisfrequenz ω (in 1/s) berechnet sich die kinetische Energie zu:

$$E_{kr} = (1/2) J \omega^2 \quad (6.3)$$

Da die Drehzahl quadratisch in die Rotationsenergie eingeht, werden solche Schwungräder (engl. flywheels) mit hohen Drehzahlen angetrieben. Solche elektromechanische Speicher vertragen grundsätzlich mehr Ladezyklen als Batteriespeicher. Sie eignen sich beispielsweise zum Speichern von Bremsenergie von Antrieben bzw. Bahnfahrzeugen, die in Netz zurück gespeist wird, bzw. als schnelle Speicher für erneuerbare Energien.

Frage 5.3.1: Ein rotierender Speicher soll als Hohlzylinder ausgeführt werden und bis zu einer Drehzahl von 800 Umdrehungen pro Sekunde betrieben werden. Der Zylinder soll eine Energie von 10 kWh speichern. Welches Trägheitsmoment wäre erforderlich? Halten Sie eine solche Konstruktion für durchführbar?

Frage 5.3.2: Der Speicher soll aus dem Stillstand innerhalb von 15 Minuten vollständig aufgeladen werden können. Über welche Leistung muss der Antrieb verfügen?

Frage 5.3.3: Wie wäre der Generatorbetrieb zu realisieren? Welche Leistung hätte der Generator?

Frage 5.3.4: Wie schätzen Sie den Wirkungsgrad eines solchen Speichers ein? Wäre eine dauerhafte Speicherung möglich? Gibt es eine Begrenzung der möglichen Lastzyklen?

5.4. Wärmespeicher

Im einfachsten Fall erfolgt die Speicherung durch Erwärmung eines festen oder flüssigen Speichermediums. Bei solchen sensiblen Wärmespeichern verändert sich die Temperatur. Die gespeicherte Energie errechnet sich zu:

$$E_{th} = m c_{th} \Delta T = \rho V c_{th} \Delta T \quad (5.4)$$

Hierbei bezeichnet m die Masse des Speichermediums (in kg), c_{th} dessen spezifische Wärmekapazität (in J/(kg K)), und ΔT die Temperaturdifferenz (in K). Die Masse m (in kg) lässt sich auch als Produkt der Dichte ρ (in kg/m³) und des Volumens V (in m³) des Mediums darstellen.

Frage 5.4.1: Überschüssige elektrische Energie soll einem Heisswasserspeicher zugeführt werden. Welche Energie liesse sich in einem isolierten Wassertank von 3 m³ speichern bei einer Umgebungstemperatur von 20 Grad C?

Frage 5.4.2: Welche Energiemenge könnte ein Betonblock von 3 m³ unter den gleichen Bedingungen aufnehmen? Welche Vorteile hätte ein Festkörper wie Beton oder Keramik im Vergleich zu einer Flüssigkeit (Wasser)?

Frage 5.4.3: Wie kann die gespeicherte Energie zurück gewonnen werden? Für welche Einsatzgebiete eignen sich einfache sensible Speicher?

Frage 5.4.4: Sogenannte Latentwärmespeicher speichern Wärme in reversiblen Zustandsänderungen (z.B. zwischen eines festen und flüssigen Phasen) des Speichermediums. Thermochemische Speicher speichern Wärme in einer reversiblen chemischen Reaktion. Welche Vorteile besitzen solche Wärmespeicher gegenüber einfachen sensiblen Speichern?

5.5. Batteriespeicher

Batteriespeicher werden zum Puffern vergleichsweise geringer Energiemengen eingesetzt, z.B. in einer unterbrechungsfreien Stromversorgung bzw. bis in den Bereich einiger kWh bei Elektrofahrzeugen. Als elektrochemische Speicher besitzen Sie kurze Reaktionszeiten und können damit auch zur Stabilisierung transienter Vorgänge im Netz eingesetzt werden.

Für anspruchsvolle Anwendungen mit hoher Energiedichte werden vorwiegend Li-Ionen Batterien eingesetzt, bzw. traditionell als Starterbatterie in Fahrzeugen Bleibatterien (wenig umweltverträglich), oder Ni-Ca Batterien (begrenzte Ladezyklen).

Zur Realisierung größeren Kapazitäten im Zusammenhang mit erneuerbaren Energien sind Redox-Fluss-Batterien (Flüssigbatterien) ein interessanter Ansatz. In solchen Batterien erfolgt die Spei-

cherung in einer umkehrbaren chemischen Reaktion durch Aufnahme von Elektronen (Reduktion) bzw. Abgabe von Elektronen (Oxidation).

Frage 5.5.1: Welche Vorteile bieten Redox-Flussbatterien gegenüber konventionellen Batteriesystemen bzgl. der Energiemenge und bzgl. der Leistung?

Frage 5.5.2: Wie schätzen Sie den Wirkungsgrad und die Lebensdauer einer Redox-Fluss-Batterie gegenüber anderen Speichertechnologien ein?

Frage 5.5.3: Batterien für Elektrofahrzeuge und synthetische Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren werden gelegentlich als emissionsfreie Alternativen genannt. Welche Unterschiede bestehen bzgl. Energieausbeute und Energieaufwand, unabhängig von der technologischen Reife? Welche Konsequenzen ergeben sich für die Stromnetze, wenn Strom zum Laden von Batterien bzw. zur Erzeugung synthetische Kraftstoffe aus Strom eingesetzt werden soll?

Frage 5.5.4: Welchen Vorteil hätte die Speicherung von Solarenergie am Ort der Erzeugung? Welche Anforderungen gibt es für Solarspeicher?

5.6. Brennstoffzellen

Wasserstoffspeicher basieren auf dem einfachen Prinzip der Elektrolyse von Wasser. Beim Aufbau als Brennstoffzelle stellen Sie eine besondere Art einer Redox-Fluss-Batterie dar. Allerdings lässt sich der bei der Elektrolyse gewonnene Wasserstoff auch als Brennstoff abzweigen und z.B. in Form von Methan direkt in die Gasnetze einspeisen und so z.B. für Gasfahrzeuge nutzen.

Frage 5.6.1: Bei der Elektrolyse gilt die Bilanz $4 \text{ H}_2\text{O} \Rightarrow 4 \text{ H}_2 + 2 \text{ O}_2$. Die Reaktionsenthalpie beträgt 1143 kJ/mol. 1 Mol Wasser entspricht ca 18g. Wie viel elektrische Energie muss zur Elektrolyse von 1 kg Wasser aufgewendet werden? Lässt sich diese Energie zurück gewinnen?

Frage 5.6.2: Wie schätzen Sie den Wirkungsgrad der in Aufgabe 5.6.1 genannten Elektrolyse ein? Worin besteht die Schwierigkeit bei der Speicherung von Wasserstoff?

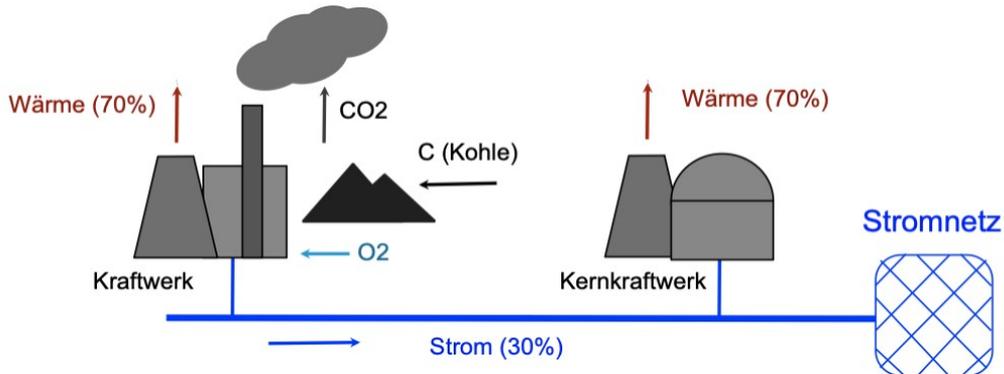
Frage 5.6.3: Wasserstoff lässt sich mit Hilfe von CO_2 zu Methan (Erdgas) verbrennen. Die chemische Bilanz hierfür lautet: $4 \text{ H}_2 + \text{CO}_2 = \text{CH}_4 + 2 \text{ H}_2\text{O}$. Hierbei werden 253 kJ/Mol an Energie frei. Gegenüber dem Wasserstoff lässt sich Methan leichter speichern und kann direkt in die Gasnetze eingespeist werden. Wie viel Energie verbleibt pro Mol Methan? Welcher Wirkungsgrad ergibt sich für das Methan im Verhältnis zur für die Elektrolyse (Frage 5.6.1) aufgewendeten elektrische Energie? Hinweis: Verwenden Sie die Energie pro Mol. Wie lässt sich die bei der Verbrennung von Wasserstoff zu Methan gewonnene Energie sinnvoll nutzen?

Frage 5.6.4: Welchen Nutzen hätte die Gewinnung von Methan aus der Elektrolyse von Wasser? Wie schätzen Sie den gesamten Wirkungsgrad ein (von der Elektrolyse über die Umwandlung in Methan bis zum Antrieb einer Gasturbine zur Gewinnung elektrischer Energie)?

6. Stoffkreisläufe

6.1. Fossile und nukleare Brennstoffe

Fossile Brennstoffe wie Braunkohle, Steinkohle und Erdöl und Erdgas belasten die CO₂-Bilanz der Erde, da hier in lange vergangenen Zeiten geschaffene Kohlenstoffvorräte in kürzester Zeit wieder in Umlauf gebracht werden. Diese Vorräte sind ausserdem begrenzt und können somit keine dauerhafte Versorgung bieten. Nukleare Brennstoffe sind CO₂-neutral, die Vorräte jedoch ebenfalls limitiert.



Fossiler Kohlenstoff wird im Industriezeitalter freigesetzt

Weiteres Kohlendioxid ist in Sedimentgestein gebunden und somit ebenfalls fossilen Ursprungs. Durch das Brennen von Kalkstein (Kalziumkarbonat, CaCO₃) zu gebranntem Kalk (CaO) werden bei der Gewinnung von Zement weitere CO₂-Emissionen in die Atmosphäre freigesetzt.

Die zur Nutzung fossiler und nuklearer Brennstoffe eingesetzten thermischen Kraftwerke haben nur einen geringen Wirkungsgrad bezüglich der Ausbeute an elektrischer Energie aus der in den Brennstoffen gewonnenen thermischen Energie: Ca. 2/3 der Energie wird als Wärme über die Kühltürme an die Umgebung abgegeben, wie in der Abbildung oben dargestellt. Der in den Brennstoffen enthaltene Kohlenstoff wird mit dem in der Luft enthaltenen Sauerstoff zu Kohlendioxid verbrannt.

Frage 6.1.1: Nukleare Energieträger. Welche Stoffe sind mit nuklearen Energieträgern bzw. Kernbrennstoffen gemeint? Wie brennt ein Kernbrennstoff?

Lösung: Materialien, die zur Kernspaltung geeignet sind, vorwiegend angereichertes Uran bzw. Plutonium. Kernbrennstoffe zerfallen in einer gesteuerten Kettenreaktion (einer thermonuklearen Reaktion, d.h. Kernenergie statt chemischer Energie).

Frage 6.1.2: Einsatz nuklearer Energieträger. Nennen Sie drei Probleme, die mit dem Einsatz nuklearer Energieträger verbunden sind.

Lösung: radioaktive Abfälle, begrenzte Vorräte, Risiko nuklearer Unfälle

Frage 6.1.3: Nutzenergie und Primärenergie inklusive Heizung, Prozesswärme und Verkehr. Wie hoch schätzen Sie in Deutschland der Anteil der Nutzenergie bezogen auf die eingesetzte Primärenergie, und bezogen auf die Gesamtenergie, wenn als Energieträger die in Aufgabe 2.4 eingesetzt werden? Welches Einsparpotenzial an Energie ergibt sich?

Lösung: Bei Straßenverkehr und bei der Stromproduktion mit Hilfe von Wärmekraftmaschinen beträgt der Anteil der Nutzenergie etwa 1/3. Heizwärme und Prozesswärme ließen sich mit Hilfe von Wärmepumpen mit 1/3 des Energieeinsatzes gewinnen. Mit den Zahlen der Aufgabe 2.4 für das Jahr 2018 stellt der überwiegende Anteil (über 80%) nicht erneuerbare Energieträger dar. Für diese beträgt der

Anteil der Nutzenergie etwa $1/3$. Bezogen auf den gesamten Energiebedarf beträgt den Anteil der Nutzenergie $4/5 * 1/3 + 1/5 = 4/15 + 1/5 = 7/15 \approx 46\%$. Somit kann etwas mehr als die Hälfte des Energiebedarfs eingespart werden.

Frage 6.1.4: Primärenergiebedarf in Steinkohleeinheiten. Wie viele Tonnen Steinkohle würden durchschnittlich benötigt, wenn der Primärenergiebedarf in Deutschland für einen Tag ausschließlich mit Steinkohle gedeckt werden sollte? Als Primärenergiebedarf werden 14000 PJ angenommen (Bedarf im Jahr 2013).

Lösung: Primärenergiebedarf in Deutschland pro Tag:

$$14000 \text{ PJ} / 365 = 38,36 \text{ PJ pro Tag.}$$

Energiegehalt von Steinkohle (1 kg SKE): 8,14 kWh/kg;

mit 1kWh = 3,6 MJ ergibt sich für einen Tag:

$$m = 38,36 \text{ PJ} / 8,14 \text{ kWh/kg} = 1.309.036,3 \text{ t}$$

Frage 6.1.5: Strombedarf in Steinkohle. Der jährliche Bedarf an elektrischer Energie in Deutschland beträgt ca 600 TWh (Tera Wattstunden). Wie vielen Tonnen entspricht diese Energiemenge, wenn der Strom ausschliesslich aus Kohle erzeugt würde? Berechnen Sie die durchschnittlich benötigte Menge an Steinkohle pro Tag.

Lösung: 1 Ws = 1 J, somit entspricht eine Wattstunde 3600 J.

$$600 \text{ TWh} = 600 \cdot 10^{12} \text{ Wh} = 600 * 3,6 \cdot 10^{15} \text{ J} = 2160 \text{ PJ.}$$

Zur Erzeugung dieser elektrischen Energiemenge wäre ca. die dreifache Menge an thermischer Energie nötig: Man erhält 6480 PJ pro Jahr. Hiervon kann im Falle von Heizkraftwerken ein Teil zur Heizung bzw. für Prozesswärme verwendet werden.

Durchschnittlicher Energiebedarf pro Tag: $6480 \text{ PJ} / 365 = 17,75 \text{ PJ}$

$$\text{Menge an Steinkohle: } m = 17,75 \text{ PJ} / 8,14 \text{ kWh/kg} = 606.000 \text{ t}$$

Frage 6.1.6: CO₂-Bilanz der Stromversorgung. Wie viele Kubikmeter CO₂ würden täglich umgesetzt, wenn zur Stromerzeugung in Deutschland ausschließlich Kohlekraftwerke eingesetzt würden?

Lösung: Wenn man davon ausgeht, dass der Kohlenstoffgehalt der Kohle am Gewicht 80% beträgt, entspricht der in Frage 4.1.5 berechnete Wert von 606.000 t Steinkohle pro Tag 485.000 t Kohlenstoff. 1 Mol Kohlenstoff wiegt 12 g. Die tägliche Menge an Kohlenstoff entspricht also $485 \cdot 10^9 \text{ g} / 12 \text{ g/Mol} = 40,4 \cdot 10^9 \text{ Mol}$.

Das molare Volumen eines Gases beträgt unter normalen Bedingungen ca. 22,4 Liter pro Mol. Die oben berechnete Menge von $40,4 \cdot 10^9 \text{ Mol}$ entspricht also $22,4 \cdot 40,4 \cdot 10^9 \text{ Liter} = 905 \cdot 10^9 \text{ Liter} = 905 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Somit würden pro Tag 905 Mio. m³ CO₂ freigesetzt.

Bemerkung: Bei der Verbrennung zu CO₂ werden pro Mol Kohlenstoff 2 Mol Sauerstoff benötigt. Sauerstoff besitzt eine molare Masse von 16 g. Somit besitzt CO₂ eine molare Masse von 44 g. Die Stoffmenge von $40,4 \cdot 10^9 \text{ Mol CO}_2$ ergibt also eine Masse $40,4 \cdot 10^9 \text{ Mol} * 44 \text{ g / Mol} = 1.777 \cdot 10^9 \text{ g} = 1.777.000 \text{ t CO}_2 = 1,78 \text{ Mio. t CO}_2$.

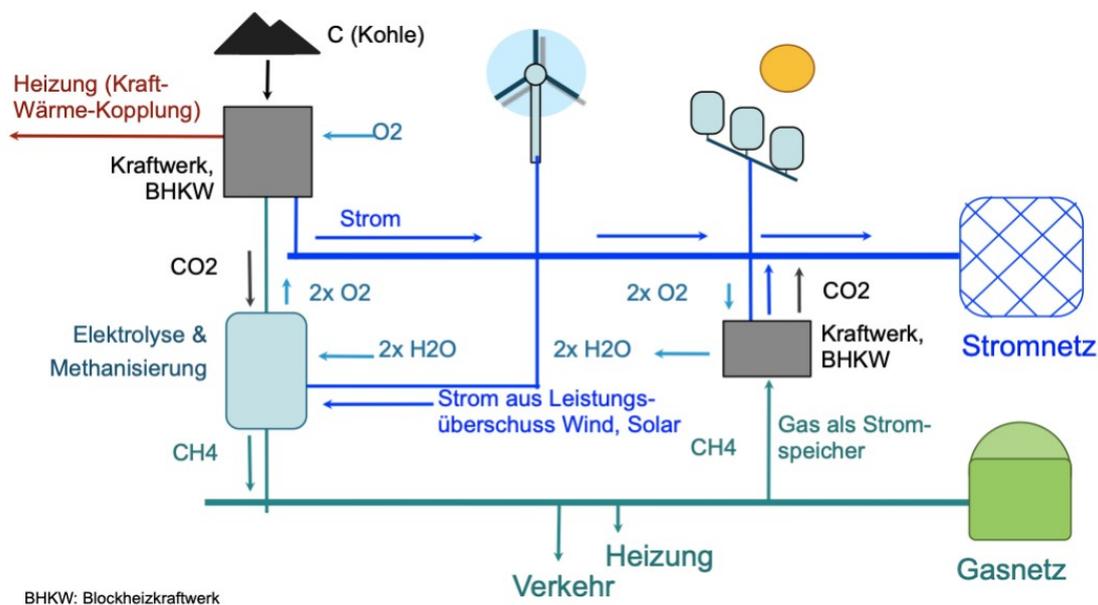
6.2. CO₂-Kreislauf

Das Problem fossiler Energieträger ist der durchbrochene Stoffkreislauf: Es wird aus den gespeicherten fossilen Vorräten viel mehr CO₂ in die Atmosphäre freigesetzt, als im gleichen Zeitraum aus der Atmosphäre gebunden wird. Würde man zur Energieerzeugung beispielsweise Holz in dem Umfang verwenden, indem Holz im gleichen Zeitraum nachwächst, wäre der Stoffkreislauf CO₂ neu-

tral. In diesem Fall wäre der zur Verbrennung von Kohlenstoff zu CO_2 entgegengesetzte Prozess die Bindung von CO_2 in Pflanzen durch die Photosynthese.

Folgende Abbildung zeigt einen geschlossenen Stoffkreislauf, in dem statt der Photosynthese ein industrieller Prozess zur Bindung des CO_2 eingesetzt wird. Der Prozess basiert auf der Kopplung des elektrischen Energienetzes mit den Gasnetzen. Mit Hilfe der Gasnetze werden Kraftwerke mit Gasturbinen zur Erzeugung elektrischer Energie sowie zur Erzeugung von Wärme eingesetzt. Dieser Prozess ist nicht CO_2 -neutral. Ein geschlossener Stoffkreislauf ergibt sich in dem Umfang, in dem ein Überangebot an Strom aus Solaranlagen und Windanlagen dazu genutzt wird, um CO_2 aus der Atmosphäre zu binden.

Ein solcher Prozess ist links unten in folgender Abbildung dargestellt: Wasser wird mit Hilfe der Elektrolyse zerlegt in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff. Der Wasserstoff wird zusammen mit Kohlendioxid verbrannt zu Methan (CH_4). Das Methan wird als Erdgas dem Gasnetz zugeführt. Der bei der Elektrolyse entstandene Sauerstoff kann wiederum bei der Verbrennung des Erdgases in Kraftwerken genutzt werden. Somit ist der Stoffkreislauf in dem Umfang geschlossen, in dem CO_2 gebunden wird.



Ein Stoffkreislauf für Kohlenstoff

Frage 6.2.1: Die Elektrolyse als Basis dieses Stoffkreislaufs ist sehr energieaufwändig. Wie kann es sich lohnen, Strom zur Elektrolyse einzusetzen?

Lösung: Nur dann, wenn es ein Überangebot an Strom gibt, das nicht mit Kosten verbunden ist. Da bei Solarstrom und Windstrom keine Primärenergiekosten (Brennstoffkosten) anfallen, ist dieser Strom im Grunde genommen kostenlos, bis auf die Kosten der Investitionen, d.h. Kapitalzinsen, die durch den Verkauf des Stroms erwirtschaftet werden müssen. Im Falle eines Überangebotes an Strom lassen sich durch den Verkauf von Strom keine Einnahmen generieren. In diesem Fall kann ein Überangebot zur Elektrolyse genutzt werden. Zusammen mit der folgenden Einführung des erzeugten Erdgases ins Gasnetz funktioniert dieser Prozess als Energiespeicher.

Frage 6.2.2: Bei der auf die Elektrolyse folgenden Verbrennung des Wasserstoffs mit CO_2 zu Methan (CH_4) wird Energie freigesetzt. Wie liesse sich diese Energie sinnvoll nutzen?

Lösung: Indem man die freiwerdende Wärme zur Heizung bzw. als Prozesswärme für die Industrie nutzt. Wie bereits in Abschnitt im Zusammenhang mit der Kraft-Wärme Kopplung bei der Erzeugung

elektrischer Energie dargestellt, ist die Nutzung von Wärme immer die bessere Lösung, als Wärme nochmals aus anderen Energieträgern zu erzeugen.

Frage 6.2.3: Welche Vorteile hätte das Gasnetz als Energiespeicher?

Lösung: Große Speicherkapazität: Das Gasnetz hat Reserven für mehrere Monate und kann als langfristiges Speichermedium dienen, um beispielsweise eine Inversionswetterlage im Februar zu überbrücken, bei der es weder ausreichend Wind noch Sonne gibt. Das Speichervolumen geht weit über alle anderen Energiespeicher hinaus, auch weit über die bereits vorhandenen Pumpkraftwerke.

Ein anderer Vorteil ist die Transportkapazität des Gasnetzes: Es lässt sich mit Hilfe der Gasleitungen Energie weiträumig verteilen. Schliesslich erlaubt das Gasnetz auch eine enge Kopplung des elektrischen Energieversorgungsnetzes an das Wärmenetz und das Verkehrsnetz (Gasfahrzeuge).

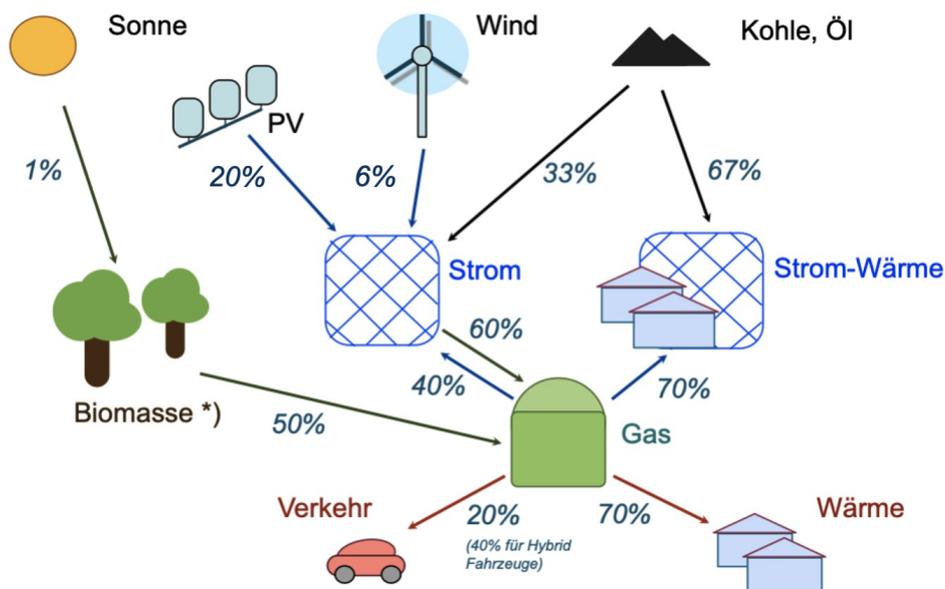
Frage 6.2.4: In Deutschland wird derzeit noch ca. 50% der elektrischen Energie aus fossilen Vorräten erzeugt. Nach der Berechnung aus Abschnitt 6.1 entspricht das einer täglichen Menge von pro Tag 905 Mio. m³ CO₂. Welche elektrische Leistung müsste eine Anlage besitzen, die diese Menge zu CH₄ verarbeitet?

Lösung: Bei der Elektrolyse von Wasser wird eine Energiemenge von ca 1140 kJ/ Mol benötigt. Ein Gas füllt unter Normalbedingungen ca. 22,4 Liter pro Mol. Die tägliche Menge von 905 10⁶ m³ CO₂ entspricht somit einer Stoffmenge von $905 \cdot 10^6 \text{ m}^3 / (22,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{Mol}) = 40,4 \cdot 10^9 \text{ Mol}$.

Somit wäre eine Energiemenge von $(1140 \text{ kJ/ Mol}) \cdot 40,4 \cdot 10^9 \text{ Mol} = 46 \cdot 10^{12} \text{ kJ}$. Umgerechnet in elektrische Leistung ergeben sich $(46 / 3600) \cdot 10^{12} \text{ kWh} = 12,8 \cdot 10^9 \text{ kWh} = 12,8 \text{ TWh}$. Eine Anlage, die 24 h am Tag arbeitet, benötigt also eine Leistung von $12,8 \text{ TWh} / 24 \text{ h} = 533 \text{ GW}$. Dieser Wert liegt weit über der derzeit verfügbaren Kraftwerksleistung von 80 GW.

6.3. Wirkungsgrade

Folgende Abbildung gibt eine grobe Übersicht über die Wirkungsgrade der bisher dargestellten Prozesse. Bereits in Abschnitt 6.1 diskutiert wurden die Wirkungsgrade der thermischen bzw. elektrischen Nutzung fossiler Brennstoffe: Die Kopplung von Kraft (Strom) und Wärme ist immer sinnvoll.



Wirkungsgrade der Energiewandlung

Photovoltaik-Anlagen werden in dieser Übersicht mit ca 20% Wirkungsgrad eingeschätzt, Windanlagen mit ca. 5% Wirkungsgrad, beide bezogen auf die Solareinstrahlung pro Fläche. Die Photosynthese hinterlässt ca 1% der verfügbaren Sonnenenergie in den abgestorbenen Resten der Pflanzen (Biomasse). Hiervon lassen sich ca 50% in Biogase verwandeln. Die Wandlung von Strom zu Gas (durch Elektrolyse und Methanisierung) wird mit 60% eingeschätzt.

Aus Gas gewonnener Strom (Gasturbinen, Gaskraftwerke) wird mit ca 40% Wirkungsgrad eingeschätzt, in Kombination Kraft-Wärme mit ca 70%. Grund für diese geringfügig höheren Wirkungsgrade gegenüber Kraftwerken mit Brennstoffen und Kesseln ist der bei der Gasturbine unmittelbare Prozess. Die Wandlung von Gas in kinetische Energie für Fahrzeuge wird mit 20% eingeschätzt. Für Hybridfahrzeuge verdoppelt sich dieser Wert, da Bremsenergie zurück gewonnen werden kann. Die direkte Nutzung in Wärme wird schliesslich mit 70% eingeschätzt.

Frage 6.3.1: Welche Rolle spielt der Wirkungsgrad bei erneuerbaren Energien, speziell bei Photovoltaik, Wind und Biomasse?

Lösung: Keine. Hier gibt es keine Primärenergiekosten (Brennstoffkosten). Sonne und Wind stehen kostenlos zur Verfügung. Bei genauerer Betrachtung müssen die Anlagenkosten durch den Verkauf der gewonnenen Energie über die Zeit erwirtschaftet werden. Sind die Anlagen abgeschrieben, ist die Energie kostenlos.

Frage 6.3.2: Welchen Wirkungsgrad hätte der in Abschnitt 6.2 beschriebene Kreisprozess, bei dem Strom aus einem Überangebot erneuerbarer Quellen in Gase gewandelt wird und das Gas anschliessend wieder in Strom bzw. Kraft-Wärme verwandelt wird?

Lösung: Wegen der nicht vorhandenen Primärenergiekosten und wegen des Überangebotes an Strom wählt man den Strom als Startpunkt (unabhängig vom Wirkungsgrad der erneuerbaren Erzeuger). Die Umwandlung von Strom in Gas wurde mit 60% = 0,6 eingeschätzt. Die Verbrennung des Gases in einem Gaskraftwerk wurde mit 40% für die reine Stromerzeugung bzw. mit 70% für die Kraft-Wärme-Kopplung eingeschätzt. Insgesamt ergibt sich also $0,6 * 0,4 = 0,24 = 24%$ für den Kreislauf Strom -> Gas -> Strom und $0,6 * 0,7 = 42%$ für den Kreislauf Strom -> Gas -> Strom/Wärme.

Frage 6.3.3: Flächenertrag von Biomasse gegen Photovoltaik. Gemessen am Flächenertrag spielt der Wirkungsgrad bei der Photosynthese und der Photovoltaik doch eine Rolle: Wenn man sich die Frage stellt, ob man seine Fläche lieber mit einer Solaranlage oder Pflanzen bestellt. Wie wären die Erträge in Wh pro Fläche, wenn die Pflanzen ausschliesslich für Biomasse genutzt wurden, im Vergleich zu einer direkten Nutzung mit Photovoltaik?

Lösung: Endprodukt wäre somit elektrische Energie. Die Photovoltaik wandelt das Sonnenlicht mit ca 10% Ausbeute in elektrische Energie. Pflanzen hinterlassen 1% der Sonnenenergie in ihrer abgestorbenen Masse. Die Biomasse lässt sich entweder direkt verheizen und mit einem Wirkungsgrad von 30% in elektrische Energie verwandeln. In diesem Fall beträgt der gesamte Wirkungsgrad 0,3%. Bei Vergärung der Biomasse in Biogas ergeben sich insgesamt 0,2%. Während die Verwertung von Pflanzenresten grundsätzlich sinnvoll ist, wäre also der gezielte Anbau von Pflanzen zur Stromerzeugung gegenüber der Nutzung der Flächen für Photovoltaik wenig sinnvoll.

Frage 6.3.4: Hybridfahrzeuge und Elektrofahrzeuge. Welchen Grundsätzlichen Vorteil bieten diese Fahrzeuge gegenüber Fahrzeugen mit reinem Verbrennungsmotor? Wenn man die Speicherkapazität (Batterie) eines Elektrofahrzeugs (bzw. Hybridfahrzeugs) mit 100 kWh bemisst, welche Speicherkapazität bieten 1 Million Elektrofahrzeuge? Ist diese Kapazität relevant im Vergleich zum Tagesbedarf im deutschen Strom Netz?

Lösung: Hybridfahrzeuge (Verbrennungsmotor in Kombination mit einem Elektromotor) und Elektrofahrzeuge können Bremsenergie wieder gewinnen, benötigen also grundsätzlich viel weniger Energie. Wenn die Orte A und B auf gleicher Höhe liegen, wird grundsätzlich überhaupt keine Energie benötigt, um von A nach B zu kommen, unabhängig von der Entfernung und unabhängig von allen Gebirgen auf der Strecke. Energie wird nur für Verluste (Reibung, Wirkungsgrad) benötigt.

Speicherkapazität: $100 \text{ kWh} \cdot 10^6 = 100 \text{ GWh}$. Jährlich werden im deutschen Netz ca. 600 TWh Energie erzeugt. Pro Tag ergibt sich also ein Energiebedarf von $(600 / 365) \text{ TWh} = 1640 \text{ GWh}$. Die Speicherkapazität von 100 GWh reicht also für ca. 1,5 Stunden. Insbesondere das direkte Laden der Fahrzeuge mit Solarstrom wäre eine naheliegende Möglichkeit, Sonnenenergie zu nutzen.

6.4. Energiebilanzen

Der Energieaufwand bei chemischen Reaktionen lässt sich mit Hilfe von Enthalpietabellen bestimmen. Hierzu wird nur die Strukturformel der Zusammensetzung der Stoffe benötigt. Folgende Abbildung stellt die Energiemengen dar, die für eine chemische Reaktion aufzuwenden ist, bzw. die bei einer chemischen Reaktion freigesetzt wird.

Energiemengen	Mengenformel	ΔH [kJ/Mol]
Verbrennung C	$\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$	-394
Elektrolyse von H ₂ O	$4 \text{ H}_2\text{O} = 4 \text{ H}_2 + 2 \text{ O}_2$	1143
Methanisierung (Sabatier-Prozess)	$4 \text{ H}_2 + \text{CO}_2 = \text{CH}_4 + 2 \text{ H}_2\text{O}$	-253
Verbrennung CH ₄	$\text{CH}_4 + 2 \text{ O}_2 = \text{CO}_2 + 2 \text{ H}_2\text{O}$	-890
Photosynthese (CO ₂ Reduktion durch Wasser)	$6 \text{ CO}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O} = \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{ O}_2$ pro CO ₂	2826 471

Energiebilanzen aus der Strukturformel

Die Enthalpien von Verbindungen (Produkte) lassen aus den Enthalpien ihrer Ausgangsstoffe (Edukte) mit Hilfe der Tabellen ermitteln. Bei mehreren Prozessschritten sind die Schritte einzeln bezüglich ihrer Energiebilanz zu bewerten. Die Abbildung stellt einige aus solchen Tabellen ermittelte Energiebilanzen für die in diesem Abschnitt diskutierten Verbindungen zusammen.

Frage 6.4.1: Bei der Verbrennung von Kohlenstoff werden pro Mol 394 kJ frei (negatives Vorzeichen). Wie viel Energie lässt sich aus der Verbrennung von 1 kg Kohlenstoff gewinnen? Wie viel CO₂ (in Masse und in Volumen) wird hierbei freigesetzt? Vergleichen Sie mit der Energiedichte elektrischer Energiespeicher (Batterien).

Lösung: Kohlenstoff besitzt eine molare Masse von 12 g. Die Masse von 1 kg Kohlenstoff enthält also 83,3 Mol. Somit werden bei der Verbrennung mit Sauerstoff $32.833 \text{ kJ} = 32.833 \text{ kWh}$ frei. Diese Energiemenge entspricht 9,1 kWh. Elektrische Energiespeicher: siehe Abschnitt 6.3.4.

Frage 6.4.2: Elektrolyse. Für die Elektrolyse von Wasser (2 H₂O) in Wasserstoff (2 H₂) und Sauerstoff (O₂) sind nach der Tabelle oben $1143/4 \text{ kJ}$ pro Mol Wasser = 285,75 kJ pro Mol Wasser aufzuwenden. Wie viel Energie wird für die Elektrolyse von einem Liter Wasser benötigt? Welche Gasmenge entsteht hierbei?

Lösung: Für einen Liter Wasser wird eine Masse von 1 kg angenommen. Die molare Masse von Wasser ermittelt man aus 1 Mol Sauerstoff (16 g) und 2 Mol Wasserstoff (2 g) zu 18 g/Mol. Ein kg Wasser enthält somit 55,5 Mol. Somit sind für die Elektrolyse 15.860 kJ aufzuwenden. Umgerechnet in elektrische Energie sind also 4,4 kWh aufzuwenden.

Pro Mol Wasser entstehen als Gase 1 Mol Wasserstoff H₂ und 1/2 Mol Sauerstoff O₂. Ein Mol Gas beansprucht bei Normalbedingungen 22,4 Liter. Aus 55,5 Mol Wasser ergeben sich also 55,5 Mol

Wasserstoff H_2 mit einem Volumen von $1,24 \text{ m}^3$ und $27,75 \text{ Mol}$ Sauerstoff O_2 mit einem Volumen von $0,62 \text{ m}^3$.

Frage 6.4.3: Strom zu Gas. Die Mengenformel für die Elektrolyse wurde so gewählt, dass die Stoffmengen zum folgenden Prozess der Methanisierung passen: Während man für die Elektrolyse von $4 \text{ Mol } H_2O$ 1143 kJ aufwenden muss, werden bei der Verbrennung des entstandenen Wasserstoffs aus dem erhaltenen Knallgas mit Kohlendioxid 253 kJ frei. Welche Wärmemenge erhält man pro Liter Wasser aus der vorausgegangenen Elektrolyse? Welche Menge an Methan erhält man pro Liter Wasser? Welche Menge an CO_2 wird hierfür aufgewendet? Welcher Anteil der bei der Elektrolyse aufgewendeten Energie verbleibt im entstandenen Methan (CH_4)?

Lösung: Pro Liter Wasser wurden per Elektrolyse $1 \text{ Mol } H_2$ erzeugt (siehe Abschnitt 6.4.2). Für die Gewinnung von $1 \text{ Mol } CH_4$ sind nach der Mengenformel $4 \text{ Mol } H_2$ erforderlich. Pro $\text{Mol } CH_4$ werden somit 4 Mol Wasser benötigt. Ein Liter Wasser enthält $55,5 \text{ Mol}$. Somit gewinnt man pro Liter Wasser $(55,5 \text{ Mol} / 4) * 253 \text{ kJ} / \text{Mol} = 3.510 \text{ kJ} = 0,975 \text{ kWh}$.

Es entstehen aus einem Liter Wasser $(55,5/4) \text{ Mol} = 13,875 \text{ Mol}$ Methan (CH_4), entsprechend einem Gasvolumen von $0,31 \text{ m}^3$. Pro $\text{Mol } CH_4$ wird nach der Mengenformel ein $\text{Mol } CO_2$ benötigt. Die benötigte Gasmenge an CO_2 entspricht also ebenfalls $0,31 \text{ m}^3$.

Von den pro Liter Wasser für die Elektrolyse aufgewendeten $4,4 \text{ kWh}$ wurden durch die Methanisierung $0,975 \text{ kWh}$ verbrannt (in Wärme umgewandelt). Es verbleiben somit $3,425 \text{ kWh}$ im erhaltenen Methangas. Der Anteil lässt sich unmittelbar aus der Enthalpietabelle ablesen: $253/1143 = 22\%$. Es verbleiben somit von 100% der zur Elektrolyse aufgewendeten Energie 78% im Methangas.

Frage 6.4.4: Photosynthese. Bei der unter dem Stichwort Photosynthese aufgeführten Mengenformel wird aus Kohlendioxid und Wasser ein Glukosemolekül erzeugt, sowie Sauerstoff. Dieser Prozess findet in Pflanzen statt. Welche Energiemenge wird bei der Photosynthese für die Reduktion von CO_2 mit Wasser pro $\text{Mol } CO_2$ aufgewendet? Wenn man die Photosynthese industriell einsetzen könnte, welchen Stoffkreislauf könnte man anstelle des Methan-Kreislaufs verwenden (Methan-Kreislauf: Elektrolyse von Wasser und Methanisierung vom Kohlendioxid, Verbrennung des Methans zu Kohlendioxid)? Wie wäre die Energiebilanz im Vergleich zum Methan-Kreislauf?

Lösung: Pro Glukosemolekül sind $6 \text{ Moleküle } CO_2$ erforderlich. Pro $\text{Mol } CO_2$ müssen somit 471 kJ an Energie aufgewendet werden.

In einem Glukose-Kreislauf würde man Glukose anstelle des Methans als Energieträger verwenden. Durch Photosynthese wird Glukose aus CO_2 und Wasser erzeugt. Durch Verbrennung der Glukose wird wiederum CO_2 freigesetzt. Die Verbrennung von Methan setzt 890 kJ pro $\text{Mol } CO_2$ frei, die Verbrennung von Glukose 471 kJ pro $\text{Mol } CO_2$. Im Unterschied zu Methan wäre Glukose allerdings unter Normalbedingungen nicht gasförmig, hätte also pro Volumen die höhere Energiedichte.

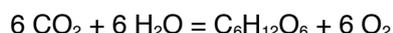
6.5. Photosynthese und Biomasse

Bei der Photosynthese wird Wasser (H_2O) nach einer Wandlung in Wasserstoff ($2H^+ + 2e^-$) und Sauerstoff O_2 zusammen mit Kohlendioxid CO_2 aus der Luft in Glukose ($C_6H_{12}O_6$) umgewandelt.

Für die Bildungsenthalpien der beteiligten Substanzen finden sich folgende Werte:

- (1) Kohlendioxid (gasförmig) CO_2 : -394 kJ/Mol
- (2) Wasser (flüssig) H_2O : -286 kJ/Mol
- (3) Glukose (fest) $C_6H_{12}O_6$: -1271 kJ/Mol

Die Fotosynthese (bzw. ihr Umkehrprozess) lässt sich auf folgende Bilanzformel bringen:



Frage 6.5.1: Energiebedarf der Fotosynthese. Wie viel Energie wird für diese Reaktion (bzw. für Ihren Umkehrprozess) pro Mol Glukose benötigt?

Lösung: Bei der Fotosynthese wird Glukose aus Wasser und Kohlendioxid erzeugt. Der Aufwand berechnet sich also aus (3) abzüglich der 6-fachen Summe von (1) und (2):

$$- 1271 \text{ kJ/Mol} - 6 \cdot (-394) \text{ kJ/Mol} - 6 \cdot (-286) \text{ kJ/Mol} = 2809 \text{ kJ/Mol.}$$

Pro Mol Glukose muss eine Energie von 2809 kJ aufgewendet werden. Für den Umkehrprozess wird diese Menge an Energie pro Mol Glukose frei.

Frage 6.5.2: Energiegehalt der Glukose. Welchen Energiegehalt hat 1 kg Zucker (Glukose, molare Masse 180 g/Mol)?

Lösung: Pro Mol Glukose (=180 g) werden 2809 kJ/Mol frei. Umgerechnet auf 1000 Gramm somit $1000 \text{ g} \cdot (2809 \text{ kJ /Mol}) / (180 \text{ g/Mol}) = 15,6 \text{ MJ}$ (= 3730 Kilokalorien). Glukose besitzt somit einen Brennwert von 15,6 MJ/kg.

Frage 6.5.3: Biomasse. Wenn eine Pflanze stirbt, steht der in ihrer Biomasse verbliebene Brennstoff als Nahrungsmittel bzw. zur Energieerzeugung zur Verfügung. In Deutschland geht man von einem jährlichen Ertrag von etwa 10 Tonnen Trockenmasse pro Hektar (ha) aus. Welcher Energieertrag pro Hektar ist möglich, wenn die Trockenmasse einen vergleichbaren Brennwert wie Torf hat (ca 4 kWh/kg)? Welcher Ertrag wäre bei insgesamt 15 Millionen ha Nutzfläche in Deutschland möglich?

Lösung: Vorgabe: Torf ca. 4 kWh/kg = 14 MJ/kg

Energieertrag pro Hektar: $10.000 \text{ kg/ha} \cdot 4 \text{ kWh/kg} = 40 \text{ MWh/ha}$ im Jahr

Energieertrag insgesamt: $15.000.000 \text{ ha} \cdot 40 \text{ MWh/ha} = 600 \text{ TWh}$ im Jahr

Bemerkung: Alle Energiewerte sind thermische Energie. Zur Umwandlung in elektrische Energie müssten die Wirkungsgrade der Generatoren berücksichtigt werden.

Frage 6.5.4: Stromerzeugung aus Biomasse. Welcher Ertrag ergibt sich pro Hektar in MWh pro Jahr, wenn man diese Energie z.B. in einer Biogasanlage in elektrische Energie wandelt? Welchem Wirkungsgrad entspricht die aus Biomasse erzeugbare Energie bezogen auf die Sonneneinstrahlung? Hinweis: Verwenden Sie für die Sonneneinstrahlung einen Wert von 100 W/m^2 im Jahresmittel. Wann erscheint die Nutzung von Biomasse zur Erzeugung elektrischer Energie im Vergleich mit anderen erneuerbaren Energien als sinnvoll?

Lösung: Annahme: Wirkungsgrad des Biogas-Kraftwerks 40% (für die Umwandlung in elektrische Energie). Somit erhält man 16 MWh/ha im Jahr.

Wirkungsgrad: bei mittlerer Sonneneinstrahlung von 100 W/m^2 ergeben sich im Jahresverlauf $365 \cdot 24 \text{ h} \cdot 100 \text{ W/m}^2 \approx 0,9 \text{ MWh/m}^2 = 9000 \text{ MWh/ha}$. Der Wirkungsgrad ist somit sehr bescheiden: $40/9000 \approx 0,5\%$ thermisch bzw. $16/9000 \approx 0,2\%$ elektrisch.

Eine Photovoltaik-Anlage oder Windanlage hätte einen deutlichen besseren Wirkungsgrad und somit einen deutlich besseren Ertrag pro Fläche. Die Nutzung der Biomasse erscheint immer dort sinnvoll, wo Biomasse sowieso anfällt, z.B. bei der Produktion von Nahrungsmitteln bzw. bei der Bewirtschaftung von Wäldern.

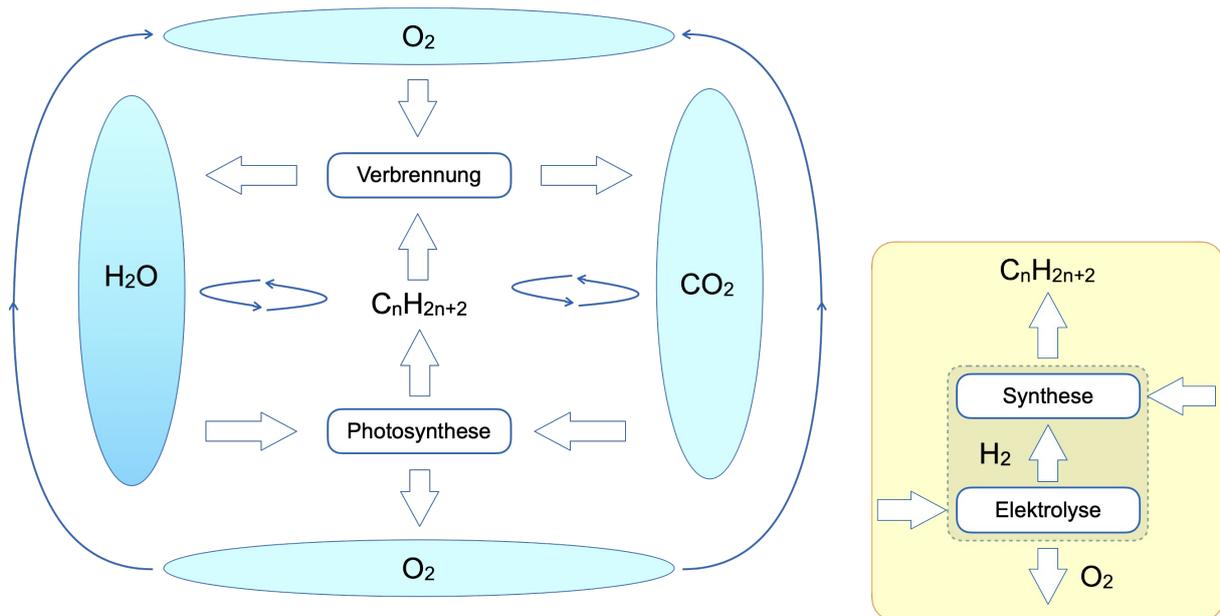
6.6. Synthetische Kraftstoffe

Unter synthetischen Kraftstoffen versteht man Kohlenwasserstoffe, die nicht aus gelagerten fossilen Brennstoffen gewonnen werden, sondern aus Wasserstoff und Kohlenstoff erzeugt werden. Der natürliche Syntheseprozess, aus dem auch die fossilen Brennstoffe entstanden sind, ist die Photosyn-

these. Für die Synthese muss Energie aufgewendet werden. Als primäre Energiequelle dient hierbei die Sonnenenergie. Die Kohlenwasserstoffe dienen als Energiespeicher.

Der gegenläufige Prozess zur Synthese ist die Verbrennung: Bei der Verbrennung mit Hilfe von Sauerstoff wird Energie freigesetzt. Die Verbrennung kann auch als Prozess in einer Brennstoffzelle ausgeführt werden. Folgende Abbildung zeigt eine Übersicht über den Stoffkreislauf.

Die Kohlenwasserstoffe sind hierbei durch ihre Strukturformel dargestellt (C_nH_{2n+2}). Spezialfälle wären reiner Kohlenstoff (C, ohne Wasserstoffanteil), Erdgas (CH_4) und Diesel ($C_{16}H_{34}$). Diese als Kraftstoffe verwendeten Kohlenwasserstoffe sind das Endprodukt biologischer Prozesse, die in er Photosynthese mit Kohlenhydraten starten (Zucker, Stärke).



Stoffkreislauf bei der Synthese und der Verbrennung

Kohlendioxid wird hierbei in der Atmosphäre gespeichert. Als weiterer Speicher für Kohlendioxid dienen Sedimente, die aus Ablagerungen der Kalkgerüste ($CaCO_3$, Kalziumkarbonat) von Lebewesen gebildet werden. Das Kalziumkarbonat entsteht durch Bindung von Kohlendioxid an Kalzium in einem biologischen Prozess.

Sauerstoff wird ebenfalls in der Atmosphäre gespeichert. Wasser hat einen eigenen Kreislauf als Wasserdampf in der Atmosphäre, sowie als Regen, Oberflächenwasser, Grundwasser, in Flüssen, Seen und Meeren. Der Wasserkreislauf wird ebenfalls durch die Sonnenenergie getrieben.

Frage 6.6.1: Wärmeerzeugung. Welche Wirkungsgrade erzielt man, wenn synthetische Kraftstoffe zur Wärmeerzeugung eingesetzt werden (Heizung, Prozesswärme)? Welche Alternativen gäbe es?

Lösung: Die Verbrennung von Kohlenwasserstoffen gelingt mit annähernd 100%. Es verbleibt somit der Wirkungsgrad der Synthese. Gerechnet ab der eingesetzten elektrischen Energie wären das die Wirkungsgrade der Wasser-Elektrolyse und der Synthese des Wasserstoffs mit Kohlenstoff. Für die Elektrolyse lassen sich maximal 80% erzielen, der Prozess der Methanisierung erhält 80% der Energie im Methangas (CH_4). Somit sind hier maximal 64% zu erreichen.

Alternativen: Die Wärmeerzeugung direkt aus elektrischer Energie wäre wirtschaftlicher. Mit Hilfe einer elektrischen Wärmepumpe wäre der Einsatz elektrischer Energie nur $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{3}$ der erzeugten Wärme. Somit ergäbe sich im Vergleich zum synthetischen Brennstoff eine um einen Faktor 4 bis 6 bessere Energieausbeute.

Allerdings muss ein Überschuss elektrischer Energie aus erneuerbaren Erzeugern gespeichert werden. Für die langfristige Speicherung stellen die Wasser-Elektrolyse und Methanisierung geeignete Verfahren dar. Weitere technische Alternativen wären Wärmespeicher, z.B. Solarkollektoren bzw. elektrische betriebene Wärmespeicher, die ein Überangebot an elektrischer Leistung lokal direkt in Form von Wärme speichern.

Frage 6.6.2: Krafterzeugung. Welche Wirkungsgrade erzielt man, wenn synthetische Kraftstoffe zur Krafterzeugung eingesetzt werden (Bewegung oder elektrische Energie aus Wärmekraftmaschinen)? Welche Alternativen gäbe es?

Lösung: Die Verbrennung von Kohlenwasserstoffen gelingt mit annähernd 100%. Beim Einsatz von Wärmekraftmaschinen geht allerdings der Großteil der Wärmeenergie verloren. Der Wirkungsgrad ist bestimmt durch die Differenz zwischen Verbrennungstemperatur und Außentemperatur im Verhältnis zur Verbrennungstemperatur (als absolute Temperaturen, gemessen auf der Kelvin-Skala). In der Praxis wird nur ein Anteil zwischen $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{3}$ in kinetische Energie gewandelt. Die Wandlung kinetischer Energie in elektrische Energie durch elektrische Maschinen gelingt wiederum nahezu vollständig.

Möchte man also synthetische Kraftstoffe zur Krafterzeugung einsetzen, bemisst sich der Wirkungsgrad aus dem Wirkungsgrad der Erzeugung der Kraftstoffe und dem o.g. Wirkungsgrad bei der Verbrennung. Für synthetisches Erdgas erzielt man auf der Erzeugungsseite maximal 64%.

Multipliziert mit dem Wirkungsgrad der Wandlung von Wärme in Kraft erhält man insgesamt eine Ausbeute zwischen 16% und 21%.

Alternativen: Wo es möglich ist, sollte der Umweg über Wärmekraftmaschinen vermieden werden.

- Elektrofahrzeuge: setzen mit Hilfe elektrischer Maschinen annähernd die vollständige elektrische Energie in Bewegungsenergie um. Das gilt für Schienenfahrzeuge am Stromnetz, sowie eingeschränkt für batteriebetriebene Fahrzeuge. Bei der Batterie besteht die Einschränkung in den Wandlerverlusten bei der Speicherung. Allerdings gestatten batteriebetriebene Elektrofahrzeuge die Speicherung überschüssiger elektrischer Energie.
- Elektrofahrzeuge mit Wasserstoff-Brennstoffzelle: Als Speichermedium dient Wasserstoff. Für die Gewinnung von Wasserstoff durch Elektrolyse und für den Umkehrprozess in der Brennstoffzelle lassen sich insgesamt maximal 80% Wirkungsgrad erzielen.
- Einsatz von CH_4 -Brennstoffzellen: Hier entstehen beim Verbrennungsprozess Wärme und elektrische Energie. Die Zelle kann somit als Blockheizkraftwerk eingesetzt werden (ohne bewegte Teile). Man erspart sich hierdurch den Umweg über Wärmekraftmaschinen. Die Verbrennung gelingt nahezu vollständig: Wärme und elektrische Energie werden genutzt. Es verbleibt somit der Wirkungsgrad der Elektrolyse und Methanisierung von insgesamt maximal 64%.

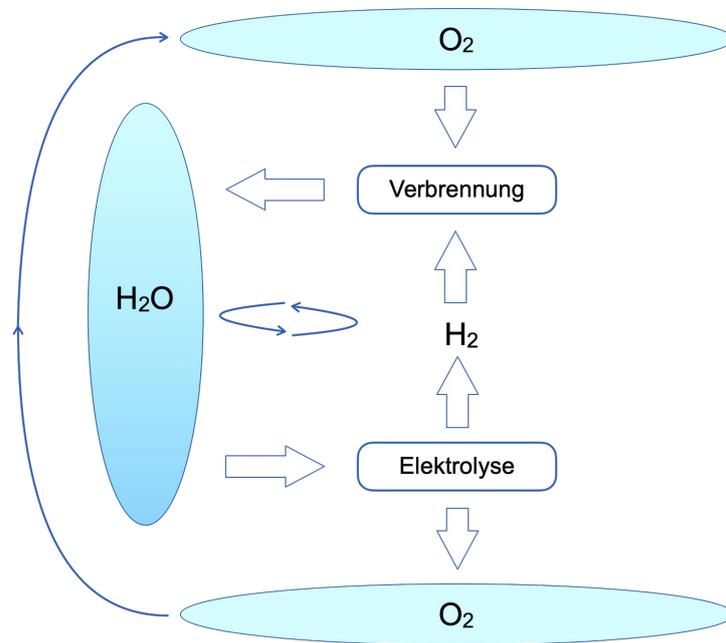
Obwohl der Wirkungsgrad beim Einsatz emissionsfreier, überschüssiger elektrischer Energie grundsätzlich keine Rolle spielt, stehen die als Alternativen genannten Verfahren zur Energiewandlung miteinander im Wettbewerb, und somit im Wettbewerb zur Wärmekraftmaschine. Weiterhin stehen elektrochemische Verfahren hier im Wettbewerb mit elektromechanischen Anlagen.

Frage 6.6.3: H_2 -Brennstoffzelle. Wie sind Wasserstoff-Brennstoffzellen in den in der Abbildung gezeigten Kreislauf einzuordnen? Welche technischen Herausforderungen stellt diese Technologie?

Lösung: Es wird auf den Kohlenstoff-Anteil und den CO_2 -Kreislauf verzichtet, sie folgende Skizze.

Es verbleiben die Elektrolyse von Wasser mit Hilfe elektrische Energie und die Verbrennung in der Wasserstoff-Brennstoffzelle als Umkehrreaktion. Die Stoffkreisläufe von Sauerstoff und Wasser verbleiben.

Eine wesentliche technische Herausforderung ist die Speicherung von Wasserstoff: Die kleinen Moleküle sind leicht flüchtig. Hierzu werden gasdichte Speicher, Speicher für flüssigen Wasserstoff benötigt, bzw. Verfahren zur Speicherung des Wasserstoffs in Flüssigkeiten.



Stoffkreislauf bei Wasserstoff als Energieträger

Frage 6.6.4: Energiedichten. Vergleichen Sie die Energiedichten für Kohlenstoff (Kohle), Wasserstoff und Kohlenwasserstoffe. Hinweis: verwenden Sie Strukturformeln und Enthalpietabellen.

Lösung:

- Kohlenstoff: $C + O_2 \leftrightarrow CO_2$; Kohlendioxid (gasförmig) CO_2 : -394 kJ/Mol
Bei einer molaren Masse von 12 g enthält 1 kg reiner Kohlenstoff somit eine Energie von 32.833 kJ \approx 9,1 kWh.
- Wasserstoff: $H_2 + O \leftrightarrow H_2O$; Wasserdampf (ca. 25 °C) H_2O : -242 kJ/Mol
Bei einer molaren Masse von 2 g enthält 1 kg reiner Wasserstoff somit eine Energie von 197.000 kJ \approx 54,7 kWh.
- Kohlenwasserstoffe: Anteilige Mischung aus o.g. Energiebeiträgen.
 - Erdgas: $CH_4 + 2 O_2 \leftrightarrow CO_2 + 2 H_2O$
 - allgemein: $C_n H_{2n+2} + (n+1) O_2 \leftrightarrow n CO_2 + (n+1) H_2O$
 - somit gelten für die Energieanteile (n 394) kJ/Mol + (n+1) 242 kJ/Mol, bezogen auf eine molekulare Masse von (n 12) g/Mol + (n+1) 2 g/Mol
 - für 1 kg Erdgas (n = 1) ergeben sich: 54.875 kJ \approx 15,2 kWh
 - für 1 kg Dieselkraftstoff (n = 16) ergeben sich: 46.097 kJ \approx 12,8 kWh
 - Entsprechend dem relativen Anteil an Wasserstoff sinkt die Energiedichte mit längeren Ketten an Kohlenwasserstoffen.
 - Bemerkung zum Dieselkraftstoff: Bei einer Dichte von ca. 0,83 kg/l erhält man die Volumenbezogene Energiedichte von 0,83 kg/l * 12,8 kWh/kg \approx 10 kWh/l. Ein Liter Diesel entspricht somit ca 10 kWh. Bei Einsatz in einem Elektrofahrzeug würde man unter Berücksichtigung

sichtigung des Wirkungsgrades der Wärmekraftmaschine pro Liter Diesel etwa 2,5 kWh an elektrischer Energie benötigen. Auf dieser Basis lassen sich Energiekosten für Elektrofahrzeuge mit Brennstoffkosten für Wärmekraftmaschinen vergleichen.

7. Strommarkt

7.1. Investitionsrechnung

Für ein Wohnhaus steht eine Entscheidung über die Anschaffung einer Fotovoltaikanlage an. Die Anlage besitzt eine Leistung von 20 kWp und hat einen Anschaffungspreis von 30.000 €. Das benötigte Kapital wird mit Zinsfaktor $q = 1,03$ aufgenommen (d.h. 3% Zinsen).

Die Teuerungsrate wird nicht berücksichtigt (Preisänderungsfaktor = 1). Die Anlage soll 10 Jahre betrieben werden. Hinweis: Der Annuitätenfaktor über eine Zeit von T Jahren berechnet sich zu $a = (q - 1) / (1 - q^{-T})$. Hinweis: Eine Tabellenkalkulation mit dem Rechenschema findet sich hier: https://www.s-rupp.de/ENT/EE_Vorlage.xlsx

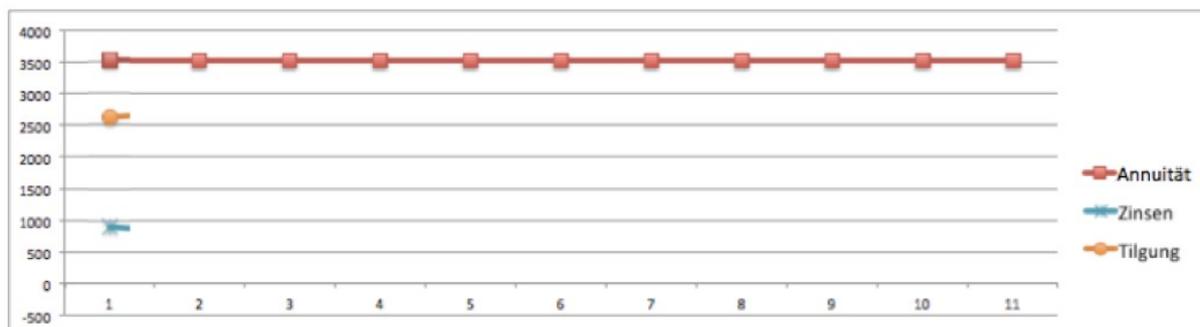
Frage 7.1.1: Zinsrechnung. Ein Kapital K soll mit einem Zinssatz $p = 5\%$ über einen Zeitraum $T = 10$ Jahre angelegt werden. Welches Wachstum wird erzielt? Welcher Zinssatz würde benötigt, um das Kapital in dieser Zeit zu verdoppeln?

Lösung: Der Zinsfaktor beträgt $q = 1 + p = 1,05$. Nach einer Zeit T beträgt das Kapital $K_T = K q^T$, somit das Kapitalwachstum $K_T/K = q^T$. Mit den gegebenen Zahlen beträgt das Wachstum 1,63. Für ein Wachstum von $q^T = 2$ würde ein Zinsfaktor $q = 2^{1/T} = \sqrt[10]{2}$ benötigt, somit $p \approx 7,2\%$.

Frage 7.1.2: Annuität. Wie hoch ist die Annuität der Fotovoltaikanlage? Welche Summe wird insgesamt gezahlt?

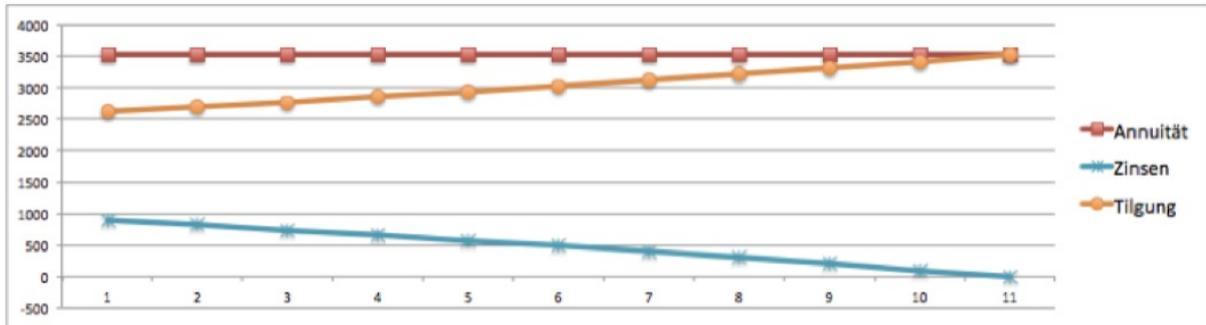
Lösung: Annuitätenfaktor $a = 0,1172$, Annuität 3517 Euro. In 10 Jahren wird somit eine Summe von 35.170 Euro gezahlt.

Frage 7.1.3: Zinsen und Tilgung. Welchen Anteil haben Zinsen und Tilgung in der anfänglichen Annuität? Skizzieren Sie den groben Verlauf der Anteile von Zinsen und Tilgung über die Jahre. Begründen Sie Ihre Skizze. Hinweis: Verwenden Sie folgende Abbildung auf dem Arbeitsblatt, bzw. laden Sie die oben genannte Tabellenkalkulation.



Annuität als feste Rate

Lösung: Anfängliche Zinsen: 9% von 30.000 € = 900 €. Somit verbleiben für die Tilgung 2617 €. Mit sinkender Kapitalschuld verringert sich im Laufe der Jahre der Zinsanteil zugunsten der Tilgung, siehe folgende Abbildung.



Annuität als feste Rate mit variablem Anteil Tilgung und Zinsen

Frage 7.1.4: Stromgestehungskosten. Wie hoch sind die Stromgestehungskosten, wenn die Anlage jährlich 18000 kWh erzeugt?

Lösung: In den ersten 10 Jahren: $3517 \text{ €} / 18000 \text{ kWh} = 0,20 \text{ €/kWh}$ (20 Cent /kWh).

Frage 7.1.5: Betrieb über 20 Jahre. Wie ändern sich die Annuität und Stromgestehungskosten, wenn die Anlage zu den gleichen Konditionen über 20 Jahre finanziert und betrieben wird?

Lösung: Annuität: 2016 €, somit Stromgestehungskosten $2016 \text{ €} / 18000 \text{ kWh} = 0,11 \text{ €/kWh}$ (35 Cent /kWh).

Frage 7.1.6: Einfluss des Zinssatzes. Die Anlage wird mit variablen Zinsen über 20 Jahre finanziert. Nach Ablauf der ersten 10 Jahre mit Zinsen von 3% verdreifachen sich die Zinsen auf 9%. Schätzen Sie den Einfluss der erhöhten Zinsen auf die Stromgestehungskosten ab.

Lösung: Würde man die Anlage von Anfang an über 20 Jahre mit 9% Zinsen finanzieren, ergäben sich Gestehungskosten von $3286 \text{ €} / 18000 \text{ kWh} = 0,18 \text{ €/kWh}$.

Nach Ablauf der ersten 10 Jahre mit Finanzierung zu 3% Zinsen ist aber bereits über ein Drittel der Kapitalschuld getilgt, es verbleiben ca. 18700 €. Diese über weitere 10 Jahre finanziert mit 9% ergeben Gestehungskosten von $2914 \text{ €} / 18000 \text{ kWh} = 0,16 \text{ €/kWh}$.

7.2. Stromgestehungskosten

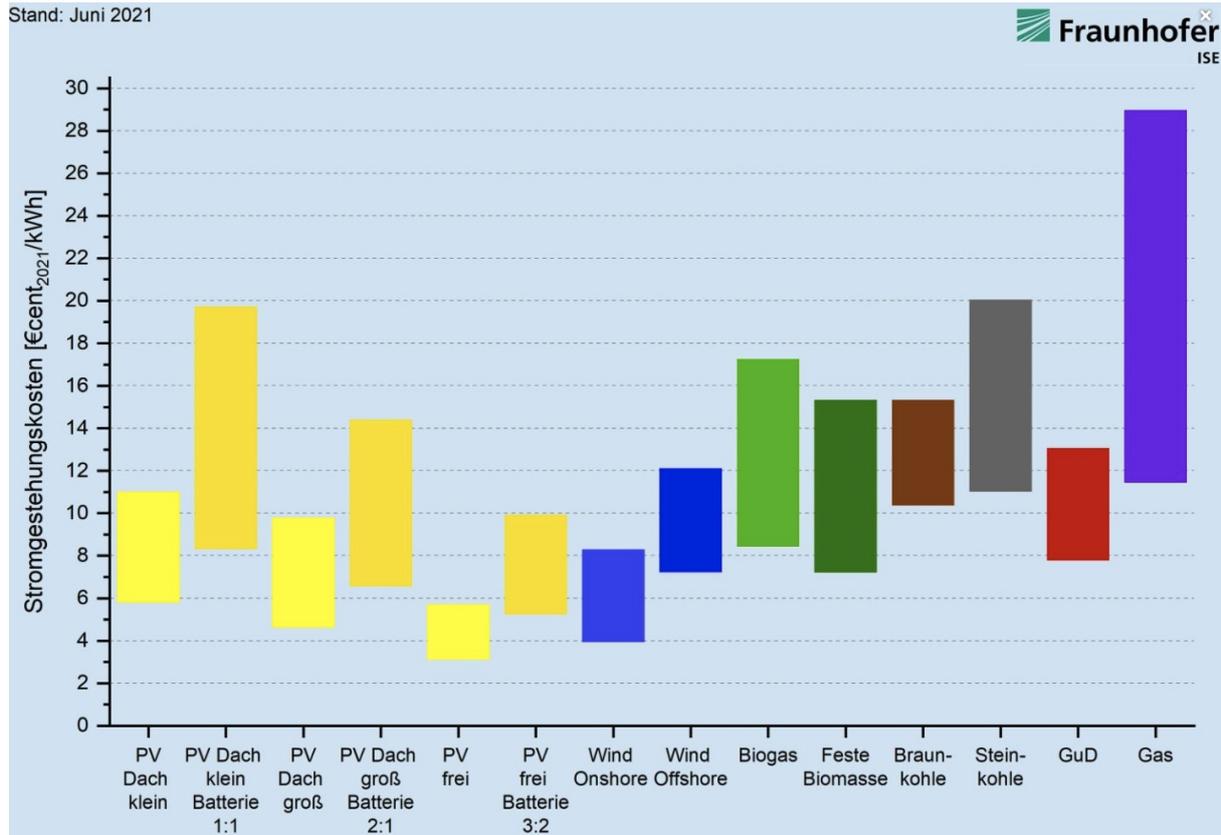
Die Stromgestehungskosten (engl. LCOE für Levelized Costs of Electricity) erlauben den Vergleich unterschiedlicher Erzeuger. Folgende Abbildung zeigt eine Übersicht für das Jahr 2021.

Frage 7.2.1: Welche Kosten gehen in die Stromgestehungskosten ein? Wie lassen sich variable Kosten und feste Kosten miteinander vergleichen?

Lösung: Laufende Kosten (z.B. Brennstoffkosten, Wartung, Betrieb der Anlagen, Miete oder Pacht) und feste Kosten (Investitionskosten der Anlagen, Erwerb der Grundstücke). Die Kosten werden über einen Betrachtungszeitraum gesammelt, der der gewünschten bzw. minimalen Betriebsdauer der Anlagen entspricht. Wahlweise lassen sich die Investitionskosten nach der Annuitätenmethode aus Aufgabe 7.1 pro Jahr berechnen, um einen Vergleich mit den jährlichen laufenden Kosten zu ermöglichen (bzw. mit den jährlichen Erträgen).

Frage 7.2.2: Welche Bezugsgröße haben die Stromgestehungskosten? Wie lassen sich sie folglich berechnen?

Lösung: Bezugsgröße ist die im Betrachtungszeitraum (z.B. dem Abschreibungszeitraum) erbrachte Energiemenge, also kWh. Die Stromgestehungskosten sind die Kosten der mit der Anlage produzierten Energiemenge über den Betrachtungszeitraum. Berechnet werden sie aus den laufenden Kosten und festen Kosten der Anlagen, bezogen auf die produzierte Energiemenge.



Vergleich der Stromgestehungskosten (2021, siehe [32])

Frage 7.2.3: Für die Stromgestehungskosten wird folgende Berechnungsformel angegeben:

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{i=1}^T \frac{B_i}{q^i}}{\sum_{i=1}^T \frac{E_i}{q^i}} \quad (7.2.1)$$

Hierbei bezeichnen I_0 die Investitionsausgaben (feste Kosten) und B_i die Betriebskosten (variablen Kosten) im Jahr i . Alle Kosten werden z.B. in Euro angegeben. Die Erträge im Jahr i sind mit E_i bezeichnet und werden z.B. in kWh bemessen. Die Anlage soll über eine Dauer von T Jahren kalkuliert werden. Hierbei werden die jährlichen Kosten und Erträge nach der Kapitalwertmethode jeweils um einen Faktor $1/q^i$ korrigiert, so dass sich ein Bezugspunkt zu den Investitionen I_0 ergibt. Auf diese Weise ergeben sich die Gesamtkosten pro kWh.

Welche Vereinfachung lässt sich verwenden, wenn alle laufenden Kosten B_i und laufenden Erträge E_i über die Jahre konstant sind und man die mittleren jährlichen Investitionskosten zur Berechnung verwenden möchte?

Lösung: Man kann die mit Hilfe der Annuitätsfaktor a berechneten jährlichen Investitionskosten I_0 verwenden:

$$LCOE = \frac{a \cdot I_0 + B_i}{E_i} \quad (7.2.2)$$

Dass diese plausible Vereinfachung aus Gleichung (7.2.1) hervorgeht, zeigt folgende Rechnung. Die Reihenentwicklung ergibt:

Der Markt funktioniert mit Angebot und Nachfrage: Zwischen Stromanbietern (Erzeugern) und Verbrauchern agieren Händler bzw. werden Lieferungen gehandelt. In der Abbildung bedeuten OTC: Over the counter (Handel über den Ladentisch), Großhandel: Strombörse (im sogenannten „day ahead“, und „intraday“-Geschäft), sowie EPEX die European Energy Exchange (Strombörse für den Außenhandel) . Eine Übersicht mit einigen Details findet sich in [3].

Frage 7.3.1: Ideales Stromnetz. Im Marktmodell kann Strom unabhängig vom Netz gehandelt werden, d.h. man geht davon aus dass der Transport gelingt. Welche Voraussetzungen und welche Konsequenzen hat dieses Marktmodell?

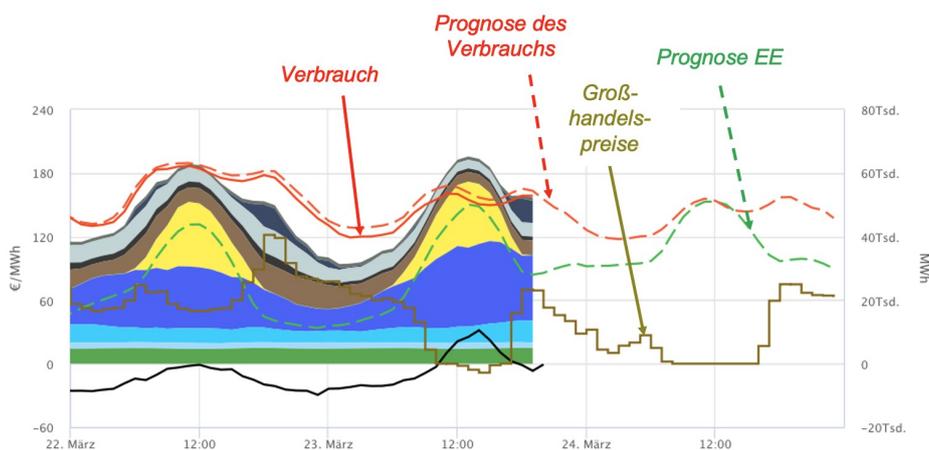
Lösung: Voraussetzung wäre ein enges Netz von Erzeugern und Verbrauchern, so dass es kurze Wege für den Strom gibt, und darüber hinaus keine Netzengpässe für Stromlieferungen. Gibt es in der Nähe der Kunden keine Erzeuger, so muss der Strom über größere Entfernungen im Netz transportiert werden. Dieser Transport ist mit Kosten verbunden, die die Stromnetzbetreiber als Netzentgelte fordern. Das Marktmodell ist aus einer Situation mit hinreichend Kraftwerken in der Nähe der Erzeuger und hierfür ausgebautem Netz gestartet (zur Entwicklung des Strommarktes siehe [3]).

Idealerweise soll der Markt Anreize schaffen für den Ausbau der Stromnetze an allen Stellen und Strecken, über die Strom transportiert werden muss. Das gelingt nicht unmittelbar: Mangels Wettbewerb im Transportgeschäft führen steigende Netzentgelte nicht notwendigerweise zu einem Netzausbau bzw. zur lokalen Ansiedelung von Erzeugern. Netzausbaupläne legen nach derzeitiger Regulierung nur die Übertragungsnetzbetreiber vor (siehe Abschnitt 4.6).

Frage 7.3.2: Lieferverträge und Börse. In Deutschland erfolgt der größte Teil (etwa 80%) des Handels über feste Lieferverträge zwischen Erzeugern und Verbrauchern. Nur etwa 20% des Stroms werden an der Börse gehandelt. Welchen Einfluss hat diese Verteilung des Handels auf die Strombörse?

Lösung: Die Differenz zwischen Angebot und Nachfrage wird über die Börse geregelt. Deren geringer Anteil am Gesamtvolumen führt zu starken Schwankungen in den Großhandelspreisen.

Frage 7.3.3: Großhandelspreise. Folgende Abbildung zeigt einen Ausschnitt aus dem Angebot und der Nachfrage im Tagesverlauf zusammen mit den im Voraus (day ahead) verhandelten Großhandelspreisen. (Quelle: [12]). Welche Funktion soll der Handel erfüllen? Wie erklärt sich die Preisentwicklung? Wie wird ein Defizit im Angebot ausgeglichen?



Lösung: (1) Der Großhandel mit Strom soll das Monopolstellung eines Stromerzeugers mit Netz auflösen, indem der Handel unabhängig vom Transportweg erfolgt. Strom bleibt hierbei ein Rohstoff, der unabhängig vom tatsächlichen Erzeuger gehandelt wird. Im physikalischen Netz erfolgt die Zustellung immer aus der nächstmöglichen Umgebung, sofern es dort hinreichend Erzeuger hat. (2) Die Preisentwicklung erklärt sich durch Angebot und Nachfrage: Bei einem Überangebot sinken die Preise. (3) Die Differenz im Angebot zur Nachfrage wird durch den Außenhandel ausgeglichen.

Frage 7.3.4: Eine Besonderheit des Stromhandels besteht darin, dass die Großhändler über keine Lagerhäuser oder Warenlager verfügen. Dabei muss im Netz zu jedem Zeitpunkt das Gleichgewicht von Erzeugung und Verbrauch erhalten werden. Wie wird im konventionellen Netz dieses Gleichgewicht erhalten? Welchen Unterschied machen erneuerbare Erzeuger?

Lösung: Im konventionellen Netz erfolgt der Abgleich auf der Angebotsseite in Form von Schichtplänen und Vorhaltung von Regelleistung für Planabweichungen. Da konventionelle Kraftwerke aus einem fossilen (bzw. nuklearen) Brennstoffspeicher arbeiten, lässt sich das Angebot grundsätzlich an die Nachfrage anpassen.

Das Angebot erneuerbarer Erzeuger lässt sich zwar vorhersagen, jedoch nicht an die Nachfrage anpassen: Abregeln bei einem Überangebot funktioniert zwar, ist jedoch keine wirtschaftlich sinnvolle Lösung. „Aufregeln“ bei Unterdeckung funktioniert nicht. Energiespeicher wären eine naheliegende Lösung, sind aber als Warenhaus im bisherigen Zuschnitt des Stromhandels nicht vorgesehen.

7.4. Kapazitäten und Flexibilitäten

Kraftwerkskapazitäten als Reserve bei Netzengpässen, unvorhergesehenem Überangebot oder Unterangebot, bzw. als Sicherheitsbereitschaft für die Versorgung stellen einen zusätzlichen Markt für Erzeuger dar, der bis zur heutigen Zeit ausschließlich von Betreibern konventionelle Kraftwerke genutzt wird. Eine Flexibilität in Form von Lagerhäusern für Strom, d.h. Energiespeicher ist im derzeitigen Marktmodell nicht vorgesehen. Kapazitäten zum Einspeisemanagement, zum Lastmanagement nach § 14 ENWG und als Netzreserve zum Redispatch bei Netzengpässen werden als Systemdienstleistungen außerhalb des Strombörse gehandelt.

Frage 7.4.1: Versorgung bei Netzengpässen. In Zeiten eines hohen Angebotes an Windenergie ist der Strom besonders günstig. Windstrom aus dem Norden ist von einem Käufer im Süden des Landes beschafft worden. Wie wird der Strom geliefert, wenn die Trassen im Netz hierfür nicht hinreichend ausgebaut sind? Wer trägt die Kosten?

Lösung: Für den Handel existieren keine Netzengpässe (Stromnetz = Kupferplatte). Wenn das Netz den Strom nicht transportieren kann, werden die Windanlagen (Einspeisemanagement gegen Vergütung) abgeregelt. Der benötigte Strom wird vor Ort aus Gaskraftwerken erzeugt, die zu diesem Zweck als vorgehalten werden und als Systemdienstleistungen über dem Börsentarif vergütet.

Die Mehrkosten werden den Netzentgelten zugeschlagen. Sie stellen die Kosten des mangelnden Netzausbaus dar: Der Regionalverkehr erbringt die Leistungen des Fernverkehrs mit regionaler Ware für einen pauschalen Mehraufwand, der außerhalb der Börse verhandelt wird. Auf diese Weise führen niedrige Börsenpreise zu höheren Stromkosten (Netzengpassmanagement siehe [33]).

Frage 7.4.2: Anreize für Energiespeicher. Der wachsendem Ausbau erneuerbarer Erzeuger wird zu periodischen Intervallen mit einem Überangebot bzw. mit Unterdeckung führen (siehe Abschnitt 4.8), wobei die Solarperioden im Tageszyklus wechseln und gut in die Nachfrage passen, während die Windperioden im Wochentakt gut in den generell erhöhten Bedarf in der kalten Jahreszeit passen. Welche Anreize schafft der Stromhandel für den Betrieb von Energiespeichern?

Lösung: Derzeit keine. Im Kapazitätsmarkt finden sich bisher keine erneuerbaren Erzeuger. An der Strombörse ließe sich bei Überangebot günstig Strom einkaufen, jedoch ist der Börsenstrompreis auf die variablen Kosten (= Brennstoffkosten) ausgerichtet und sinkt folglich mit dem Ausbau erneuerbarer Erzeuger auf einen Betrag, der die Investitionen in neue Anlagen (einschließlich Speicher) nicht deckt.

Frage 7.4.3: Anreize für einen flächendeckenden Ausbau der Erzeuger. Welche Anreize schafft der Markt für eine Ansiedlung der Erzeuger in der Nähe der Verbraucher, so dass Netzengpässe vermieden werden und der Netzausbau reduziert werden kann.

Lösung: Derzeit keine. Der Strommarkt basiert auf einem idealen Netz. Zwar führt die Installation von PV in Haushalten und Industriebetrieben zu einem steigenden Eigenanteil der Stromversorgung, je-

doch steigt der Strombedarf insgesamt durch die Elektrifizierung des Straßenverkehrs und der Wärmeerzeugung. Ausschreibungen großer PV-Anlagen oder Windparks berücksichtigen nur Anlagenertrag und Anlagekosten, keine Kosten für den Netzausbau. Eine Anlage mit integriertem Speicher führt zu höheren Kosten, die sich auf dem Markt kaum Erlösen lassen. Es gibt auch keine Bevorzugung kommunaler Energieinitiativen. Ebenso fehlt die Möglichkeit zum Austausch von Strom innerhalb der Gemeinde außerhalb der Regularien der Netzbetreiber (keine Netzentgelte für kommunalen Strom).

Frage 7.4.4: Bilanzkreise. Netzbetreiber als Stromhändler müssen in ihrem sogenannten Bilanzkreis für einen Ausgleich von Angebot und Nachfrage sorgen. Physikalisch erfolgte der Ausgleich von Regelenergie (Regelleistung), die im Bilanzkreis kommerziell durch Ausgleichsenergie abgebildet wird. Ein Bilanzkreis enthält Einspeisestellen und Entnahmestellen innerhalb des Netzes (innerhalb der Regelzonen der Übertragungsnetzbetreiber). Die Ausgleichsenergie wird auf dem Markt kommerziell beschafft und im 1/4-Stundentakt gehandelt. Welchen Effekt hat die Aufteilung des Netzes in etwa 100 Bilanzkreise? Schafft die Ausgleichsenergie Anreize für Flexibilität im Netz?

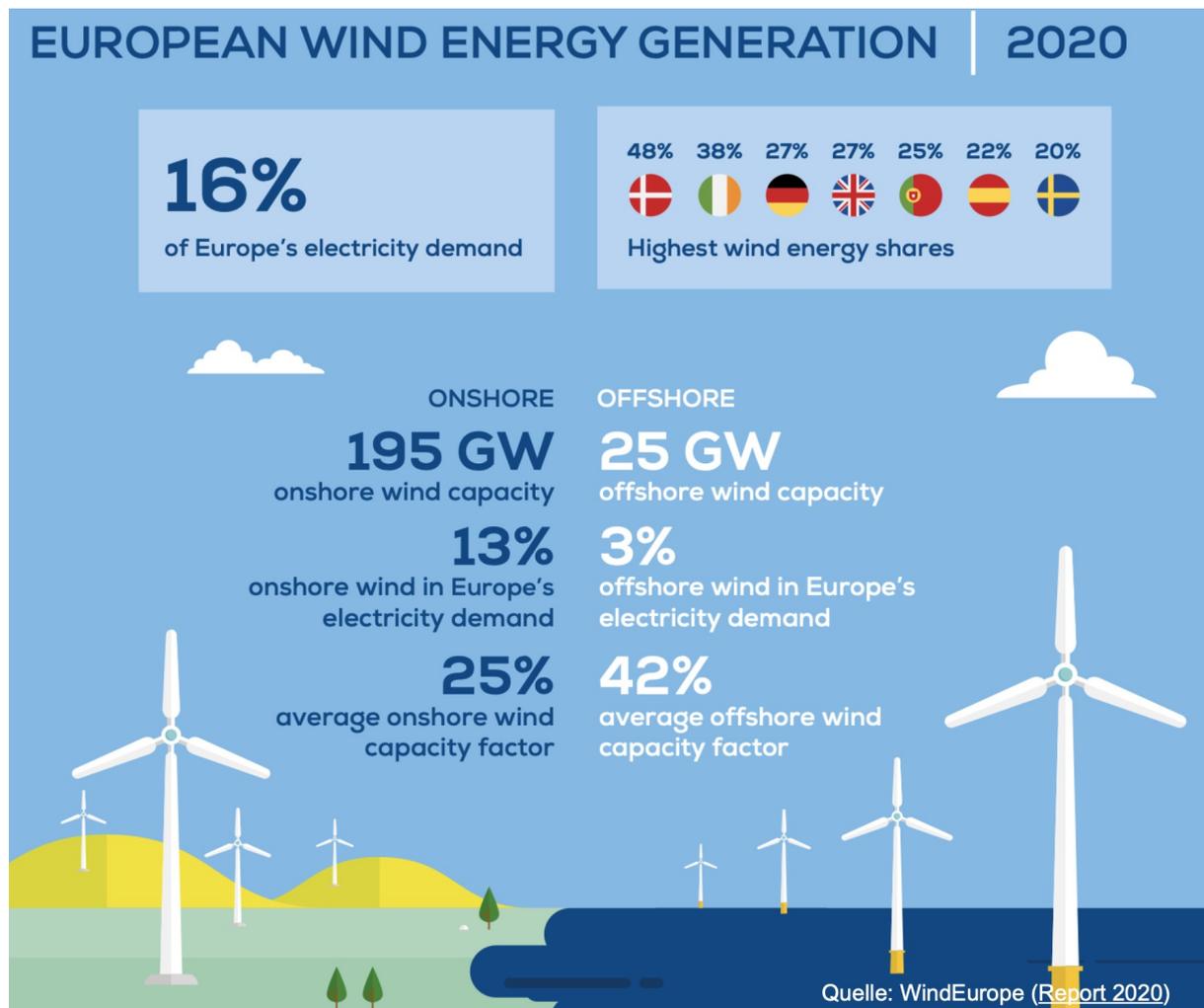
Lösung: Der Effekt ist die Überprovisionierung mit Ausgleichsenergie, da die Schwankungen in den einzelnen Bilanzkreisen höher sind als im gesamten Netz, wo sich Schwankungen gegenseitig kompensieren können (der Mittelwert einer großen Messreihe fällt stabiler aus als der einer kleinen). Je größer die Anzahl der Bilanzkreise (und somit der Stromhändler), desto größer wird der Bedarf an Ausgleichsenergie.

Anreize für Energiespeicher: Als Quelle oder Senke für Ausgleichsenergie wäre ein Speicher eine Ausnahme. Bei konventionellen Kraftwerken war der Speicher (= Kohlebunker bzw. Brennstäbe) ursprünglich Teil des regulären Stromhandels, und nur ausnahmsweise Teil der Kapazitätsreserve (als Regelleistung oder Ausgleichsenergie). Energiespeicher als Voraussetzung für eine Versorgung aus erneuerbaren Erzeugern wären daher im regulären Stromhandel besser aufgehoben. Voraussetzung hierfür wäre ein fairer Stromhandel, der die kompletten Stromgestehungskosten (einschließlich der Investitionskosten) berücksichtigt.

8. Klausuraufgaben

8.1. Windenergie in Europa

Für den Ausbau der Windanlagen wurden für das Jahr 2020 die in folgender Abbildung dargestellten Werte veröffentlicht.



Frage 8.1.1: Leistung und Energie. Als gesamter Bedarf an elektrischer Energie in Europa werden für das Jahr 2020 insgesamt ca. 2.800 TWh angegeben. Dieser Wert soll als Bezugspunkt dienen. (1) Wie groß ist der Anteil an Windenergie somit als absoluter Wert? (2) Welche Anzahl an Betriebsstunden mit dem Anschlusswert der Windanlagen ergibt sich hieraus insgesamt? (3) Wie viele Betriebsstunden pro Jahr ergeben sich bei getrennter Betrachtung für On-Shore-Anlagen und Off-Shore-Anlagen? (4) Welchen Ertrag bringen Off-Shore Anlagen somit im Verhältnis zu On-Shore-Anlagen?

Lösung: (1) 16% Anteil an der gesamten Energie entsprechen 448 TWh.

(2) Betriebsstunden insgesamt: $448 \text{ TWh} / 220 \text{ GW} = 2036 \text{ h}$

(3) bei getrennter Betrachtung erhält man

(3a) On-Shore: 13% Anteil entsprechend $364 \text{ TWh} / 195 \text{ GW} = 1867 \text{ h}$

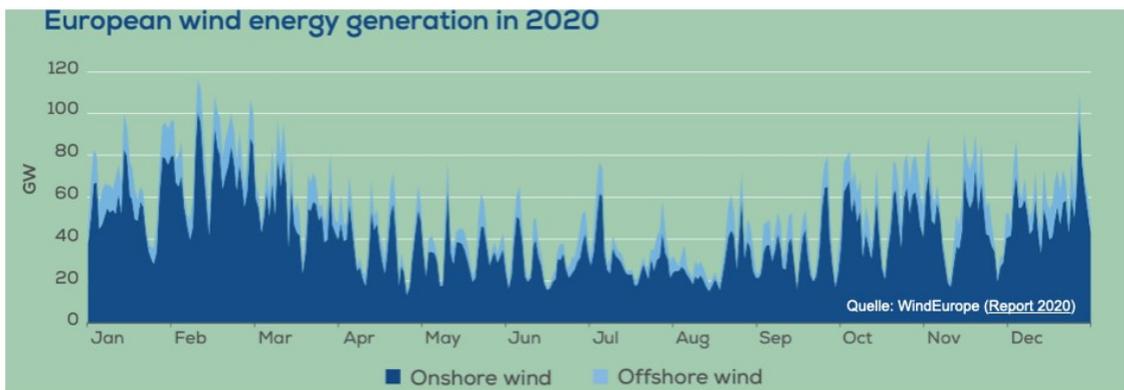
(3b) Off-Shore: 3% Anteil entsprechend 84 TWh/25 GW = 3360 h

(4) Ertrag Off-Shore/On-Shore: 3360 h/ 1867 h = 1,8.

Frage 8.1.2: Ertrag. Gemessen am Ertrag schneiden Off-Shore-Anlagen deutlich besser ab als On-Shore-Anlagen. Was spricht aus Gesamtsicht (einschließlich Stromnetze und Verbraucher) für On-Shore-Anlagen? Wie lässt sich der Ausbau steuern?

Lösung: Aus Sicht der Anlagenbetreiber: Off-Shore-Anlagen sind teurer zu errichten. Aus Sicht des Netzes: Off-Shore-Anlagen sind weit entfernt von dem Verbrauchern und erfordern daher einen Netzausbau. Eine Steuerung kann durch staatliche Regulierung erfolgen, z.B. durch Ausschreibungen.

Frage 8.1.3: Versorgung aus schwankendem Angebot. Das Angebot an elektrischer Energie aus Wind ist Schwankungen unterworfen, wie folgende Abbildung zeigt.

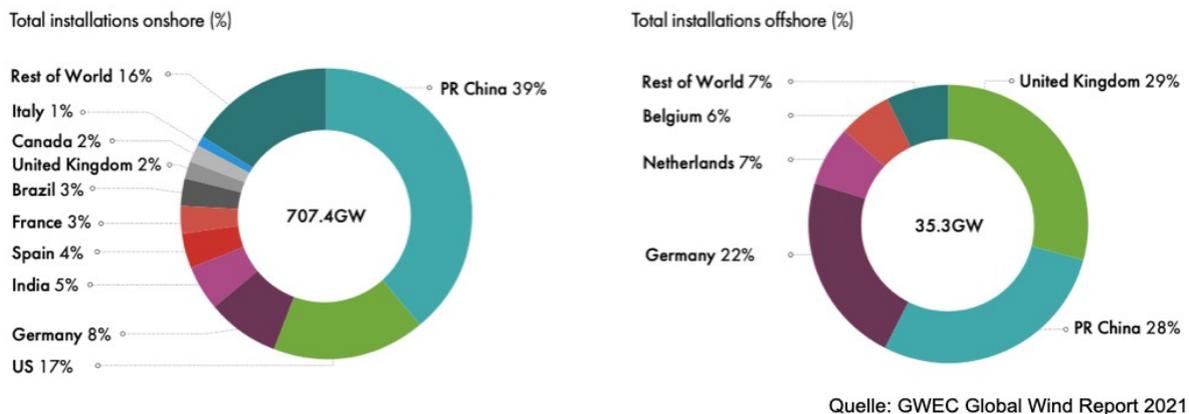


Welche Auswirkungen haben die dargestellten Schwankungen auf das Stromnetz (a) beim heutigen Ausbau und (b) bei weiterem Ausbau der Windenergie in Europa um einen Faktor 2,5?

Lösung: (a) Mit konventionellen Kraftwerken bei 7600 Betriebsstunden errechnet sich der Leistungsbedarf in der Hauptbetriebsstunde zu 2800 TWh/7600 h = 370 GW, und schätzungsweise der Hälfte dieses Wertes bei Schwachlast. Wenn es gelingt, konventionelle Erzeuger abzuregeln, könnte das derzeitige Angebot an Wind insgesamt vom Netz aufgenommen werden. Besonders vorteilhaft ist der Umstand, dass das Angebot an Windenergie in der kalten Jahreszeit (mit dem größten Energiebedarf) am größten ist.

(b) Mit dem künftigen Ausbau wird das Angebot an Windenergie den Bedarf häufiger überschreiten. Die Schwankungen zur Anpassung der Leistung zur Deckung von Bedarfslücken werden größer. Um ein Abregeln überschüssiger Energie zu verhindern und die rasche Bereitstellung von Energie bei Angebotslücken zu unterstützen, werden Energiespeicher erforderlich (z.B. Elektrolyse von Gas in Kombination mit Brennstoffzellen bzw. Gaskraftwerken).

Frage 8.1.4: Ausbau weltweit. Folgende Abbildung zeigt den Windausbau zum Jahr 2021.



(1) Wie beurteilen Sie den Startpunkt der Windenergie in Europa? Hinweis: Zahlen zum Ausbau der Windenergie in Europa findet sich die der Abbildung direkt unter Aufgabe 1. (2) Im Jahr 2020 wurden weltweit ca. 90 GW an Windanlagen neu gebaut. Wann würde sich die installierte Basis bei einem Zubau in dieser Größenordnung annähernd verdoppeln? (3) Welche jährlichen Wachstumsraten wäre insgesamt nötig, um gemäß der Szenarien der IEA über 20 Jahre die weltweit installierte Kapazität von Windanlagen zu vervierfachen bzw. zu versechsfachen?

Lösung:

(1) Startpunkt in Europa: In Europa finden sich nach der Übersicht zu Beginn von Aufgabe 1 im Jahr 2020 eine installierte Leistung 195 GW on-shore und 25 GW off-shore, bezogen auf 707 GW somit Anteile von 27% bzw. 71%. Bei Off-shore-Anlagen ist Europa somit zum heutigen Zeitpunkt weltweit führend. Bei den On-Shore-Anlagen folgt Europa unmittelbar nach China.

Bemerkung: Diese Berechnung verwendet den Ausbau weltweit im Jahr 2021 und den Ausbau in Europa zum Jahr 2020. Der Ausbau im Jahr 2020 in Europa ist somit nicht berücksichtigt. Hierdurch fallen die Anteile für Europa zu klein aus.

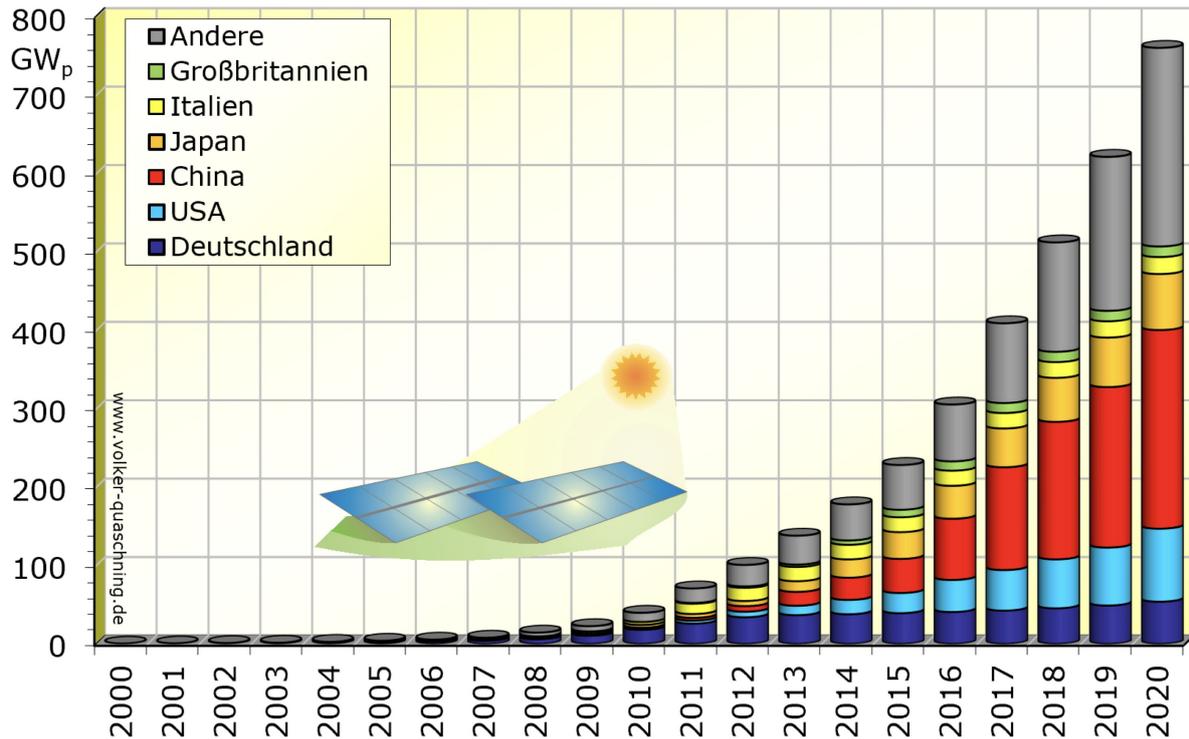
(2) Bezogen auf den Stand 2020 betragen $90 \text{ GW} / (742 - 90) \text{ GW} = 14\%$. Mit 90 GW konstantem Ausbau pro Jahr hätte sich die installierte Basis in ca. 8 Jahren verdoppelt (wobei der Rückbau ausgedienter Anlagen nicht einkalkuliert ist).

(3a) Ein Wachstum um 400% über 20 Jahre lässt sich mit 7,5% pro Jahr erzielen. Hierbei fällt der Zuwachs zu Beginn geringer als der Ausbau von 90 GW in 2020 (siehe Teil (2)). Nach 10 Jahren hätte sich die Basis verdoppelt. Im Endausbau wären ca. $4 \times 700 \text{ GW} = 2800 \text{ GW}$ an Windanlagen installiert.

(3b) Ein Wachstum von 600% über 20 Jahre bedeutet eine Zuwachsrate von 9,5% pro Jahr, wobei sich die Kapazität im 8. Jahr verdoppelt. Im Endausbau wären ca. $6 \times 700 \text{ GW} = 4200 \text{ GW}$ an Windanlagen installiert.

8.2. Solarausbau weltweit

Der Ausbau der Solarenergie (PV-Anlagen) erreicht im Jahr 2020 weltweit eine installierte Leistung von knapp 800 GW, wie in folgender Abbildung dargestellt (Quelle, Volker Quaschnig, [Web-Seite](#)).



Frage 9.2.1: Angebot an Solarenergie. (1) Welche Energiemenge lässt sich mit einer Solarleistung von 800 GW erzeugen, wenn man im Mittel mit 1200 Betriebsstunden pro Jahr rechnet? (2) Welchem Anteil am weltweiten Energiebedarf entspricht diese Energiemenge (a) im Verhältnis zu einem Bedarf an elektrischer Energie von 27.000 TWh bzw. (b) an einem gesamten Energiebedarf von 170.000 TWh? Bemerkung: Die Zahlen repräsentieren den Stand 2018 aus dem Vorlesungsskript.

Lösung: (1) $800 \text{ GW} \cdot 1200 \text{ h} = 960 \text{ TWh} \approx 1000 \text{ TWh}$.

(2a) Anteil an der weltweiten Stromproduktion: $960 / 27.000 = 3,5 \%$

(2b) Anteil am weltweiten Gesamtenergiebedarf: $960 / 170.000 = 0,6\%$.

Frage 8.2.2: Wachstumsraten. Es wird angenommen, dass der weltweite Bedarf an elektrischer Energie in den kommenden 20 Jahren weltweit um ca. 50% steigen wird. (1) Welche installierte Leistung wäre erforderlich, um die Solarenergie mit einen Anteil von 30% an der weltweiten elektrischen Energie zu beteiligen? (2) Welcher Zuwachs wäre hierfür erforderlich und welche jährliche Wachstumsrate ergibt sich über 20 Jahre? (3) Welche Wachstumsrate ergibt sich für den Solarausbau in der Zeit von 2011 bis 2020 (siehe Abbildung oben)?

Lösung: (1) Künftiger Bedarf an elektrischer Energie: $1,5 \cdot 27.000 \text{ TWh} = 41.000 \text{ TWh}$

(2) Anteil 30% von 41.000 TWh: 12.300 TWh. Gegenüber dem heutigen Anteil von ca. 1000 TWh (Frage 2.1) entspricht das einem Faktor von 12,3. Die installierte Leistung wäre um diesen Faktor zu steigern: $800 \text{ GW} \cdot 12,3 \approx 10.000 \text{ GW}$. Einen solchen Zuwachs erreicht man über 20 Jahre mit einem jährlichen Wachstum von ca. 14%. Der Zuwachs im vergangenen Jahr (siehe Abbildung) betrug mit ca 125 GW gemessen an der Basis 600 GW ca. 21%.

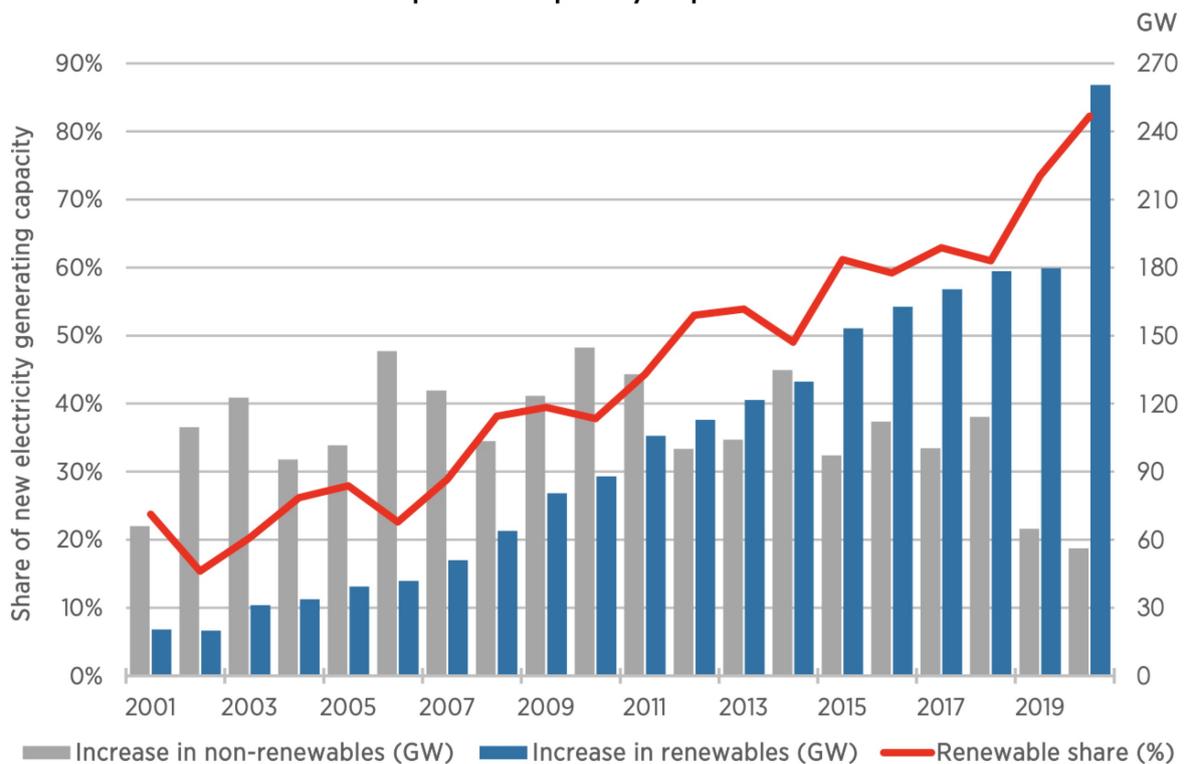
(3) In den vergangenen 10 Jahren ist die installierte Solarleistung weltweit von ca. 80 GW auf 800 GW gestiegen und hat sich somit verzehnfacht. Hieran gemessen, erscheint ein Wachstum um einen weiteren Faktor 12 nicht unrealistisch. Die jährliche Wachstumsrate der vergangenen 10 Jahre entspricht ca. 25%.

Frage 8.2.3: Energiemix. Die weltweit installierte Leistung erneuerbare Erzeuger beträgt im Jahr 2020 ca. 2800 GW und setzt sich folgendermaßen zusammen: Solar ca. 25%, Wind ca 25%, Laufwasser ca. 45%, Sonstige ca. 5% (Quelle: [IRENA](#)). (1) Welche Energiemenge liefern diese Energieträger bei folgenden Annahmen für die Betriebsstunden pro Jahr: Sonne: 1200 h, Wind 2400 h, Laufwasser und Sonstige 4800 h?

Lösung: Gegenüber der Solarenergie wären der Beitrag der Windenergie zu verdoppeln und der von Laufwasser (und sonstigen) zu vervierfachen: 0,25 Anteile Solar + 0,50 Anteile Wind + 2 Anteile Laufwasser und sonstige = 2,75 Anteile. In Betriebsstunden ergibt der Mix $2,75 \cdot 1200$ Betriebsstunden = 3300 Betriebsstunden. Mit einer Leistung von insgesamt 2,8 TW erhält man hieraus 9,200 TWh.

Frage 8.2.4: Ausbau der elektrischen Generatorleistung. In den vergangenen Jahren wurden weltweit vorwiegend erneuerbare Erzeuger ausgebaut, wie in folgender Grafik dargestellt ((Quelle: [IRENA](#))).

Renewable share of annual power capacity expansion



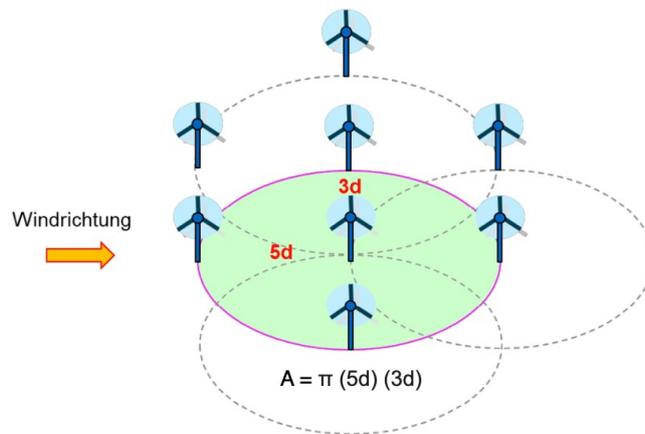
(1) Welcher Zuwachs wäre erforderlich, um den Anteil der erneuerbaren Erzeuger (Solar, Wind, Laufwasser und sonstige außer Kernkraft) an der elektrischen Energieversorgung von heute ca. 30% auf 80% zu steigern, wenn gleichzeitig der Bedarf an elektrischer Energie in dieser Zeit um 50% wächst?
(2) Halten Sie ein solches Wachstum über einen Zeitraum von 20 Jahren für realistisch?

Lösung: (1) Basis heute: 30 Anteile. Ziel: $1,5 \cdot 80\% = 120$ Anteile. Folglich wäre eine Steigerung um einen Faktor 4 über 20 Jahre erforderlich, d.h. eine Vervielfachung gemessen an der heutigen Basis. Mit heute ca. 2800 GW installierter Leistung (Frage 2.3) wäre ein Zuwachs um insgesamt 8400 GW erforderlich.

(2) Linear ergeben sich über 20 Jahre 420 GW pro Jahr, exponentiell ein jährliches Wachstum von ca. 6%. Gemessen an den Erweiterungen um ca. 260 GW im Jahr 2020 erscheint das nicht unrealistisch, vor allem, wenn Investitionen aus konventionellen Anlagen in Anlagen erneuerbarer Erzeuger umgeleitet werden.

8.3. Windpark

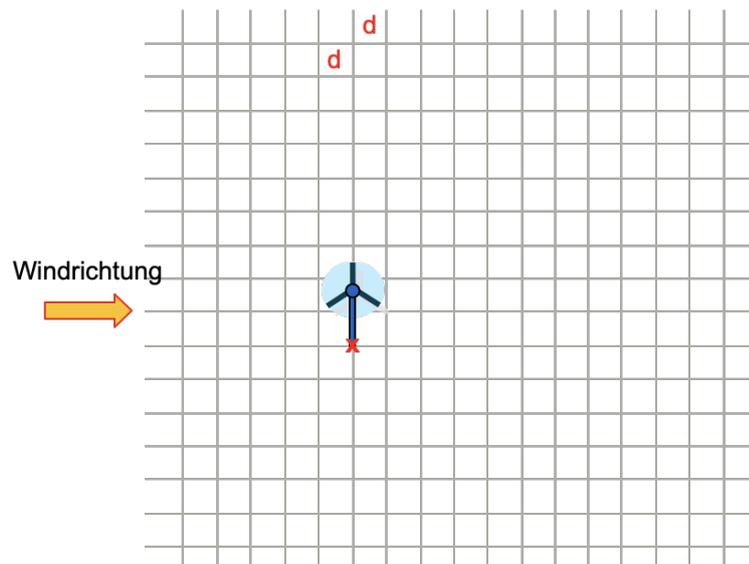
Um Windräder außerhalb ihres Windschattens aufzustellen, sind Mindestabstände vorgesehen. Diese hängen vom Rotordurchmesser d ab, wie in folgender Abbildung dargestellt. Die von einem Windpark benötigte Fläche wird als Windfläche bezeichnet und errechnet sich aus der benötigten Fläche zwischen den Windrädern.



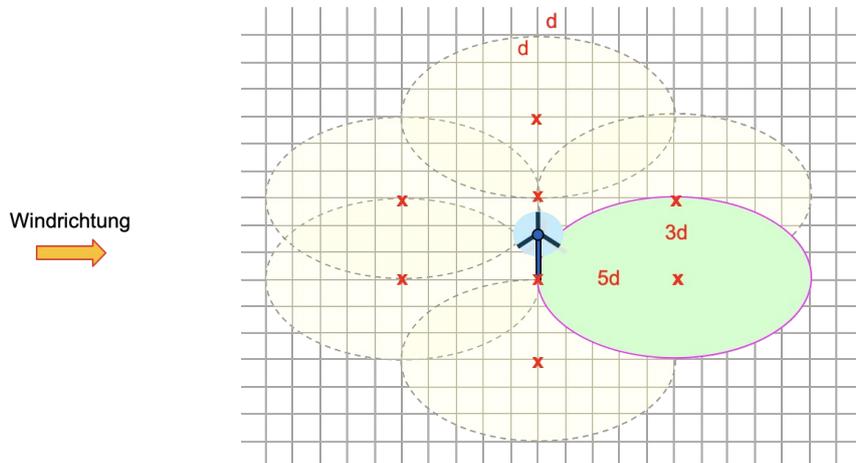
Frage 8.3.1: Windfläche eines einzelnen Windrades. Es sollen Windräder mit einem Rotordurchmesser von $d = 120$ m eingesetzt werden. Ein solches Windrad besitzt eine Leistung von 6 MW und eine Nabenhöhe von 130 m. Welche Windfläche A benötigt ein einzelnes Windrad nach der in der Zeichnung oben genannten Formel? Berechnen Sie die Fläche bezogen auf die Rotorfläche, sowie als absoluter Wert.

Lösung: Die Fläche der Ellipse berechnet sich nach der in der Zeichnung angegebenen Formel zu $A = \pi (5d) (3d) = 15 \pi d^2$. Die Rotorfläche A_R berechnet sich aus dem Rotordurchmesser zu $A_R = \frac{1}{4} \pi d^2$. Somit beträgt die Windfläche bezogen auf die Rotorfläche $A/A_R = 60$: Es wird die 60-fache Rotorfläche benötigt. Mit einer Rotorfläche von $A_R = \frac{1}{4} \pi d^2 = 11\,300 \text{ m}^2$ die Windfläche somit $A = 678\,000 \text{ m}^2 \approx 68 \text{ ha}$. Bemerkung: 1 ha entspricht 100 m x 100 m.

Frage 8.3.2: Windfläche eines Windparks. Für einen On-Shore Windpark sollen insgesamt 8 Windräder der in Frage 1.1 genannten Bauart aufgestellt werden. Welche Fläche wird insgesamt benötigt? Wählen Sie hierzu eine geeignete Anordnung der Windräder aus, wie in der Skizze unten dargestellt. Welche Fläche wird pro Windrad benötigt? Hinweis: Eine überschlägige Berechnung genügt.



Lösungsbeispiel: Die Windräder werden nach der Regel $5d$ in Windrichtung und $3d$ orthogonal hierzu aufgestellt, beispielsweise wie in der Skizze unten dargestellt. Es ergibt sich schätzungsweise der 4 fache Flächenbedarf der Windfläche aus Frage 1.1 für insgesamt 8 Windräder. Pro Windrad wäre also etwa die halbe Windfläche zu veranschlagen.



Überschlägig ergibt sich für den Windpark ein Flächenbedarf von insgesamt 250 ha.

Frage 8.3.3: Leistungsdichte und Ertrag. Der Windpark besitzt eine Spitzenleistung von $8 \cdot 6 \text{ MW} = 48 \text{ MW}$. Im Jahr lässt er sich mit 2500 Vollaststunden betreiben. Berechnen Sie die Leistung pro Fläche und den jährlichen Ertrag an Energie. Welcher Ertrag ergibt sich bezogen auf die Fläche?

Lösung: (1) Leistungsdichte: $48 \text{ MW}/250 \text{ ha} = 190 \text{ kW/ha}$. (2) Ertrag: $48 \text{ MW} \cdot 2500 \text{ h} \approx 120 \text{ GWh}$. (3) Flächenertrag: 480 MWh/ha .

Frage 8.3.4: Nutzung der Windfläche. Die Windfläche kann weiterhin landwirtschaftlich genutzt werden, beispielsweise zum Anbau von Mais für Biogasanlagen (Grünmais, Silomais). Für Silomais rechnet man mit einem Ertrag von 40 t/ha Frischmasse. Der Biogasertrag beträgt ca. 200 m^3 pro Tonne, wobei der Methangehalt 50% beträgt. Als Energiegehalt von Methan rechnet man mit 10 kWh/m^3 . Berechnen Sie den Energieertrag pro Anbaufläche (thermisch und elektrisch). Vergleichen Sie den Ertrag an Energie aus Biomasse mit dem Ertrag aus Windkraft.

Lösung: Für das Biogas erhält man die Hälfte des Energieertrags von Methan: ca. 5 kWh/m^3 . Pro Hektar errechnen sich $40 \text{ t} \cdot 200 \text{ m}^3/\text{t} = 8000 \text{ m}^3$ Biogas. Für den Energieertrag berechnet sich hiermit 40 MWh/ha thermisch. In einem Blockheizkraftwerk lässt sich hieraus eine elektrische Energiemenge von ca. $1/3$ gewinnen, somit 13 MWh/ha .

Gemessen am Ertrag an Windstrom (von 480 MWh , siehe Frage 1.3) erhält man einen Anteil von $13 \text{ MWh} / 480 \text{ MWh} = 3\%$.

Frage 8.3.5: Solarleistung als Bezugsgröße. Die Sonneneinstrahlung in Deutschland wird mit 1000 W/m^2 und etwa 1000 Sonnenstunden im Jahr abgeschätzt. PV-Anlagen werden mit einem Wirkungsgrad von 20% angeboten. Welche Flächenerträge bieten PV-Anlagen, Windanlagen und der Anbau von Mais für Biogas bezogen auf die Sonneneinstrahlung im Vergleich?

Lösung: (1) Bezugsgröße: $1000 \text{ h} \cdot 1000 \text{ W/m}^2 = 1 \text{ MWh/m}^2 = 10000 \text{ MWh/ha} = 10 \text{ GWh/ha}$. Demnach bringt eine PV-Anlage einen Ertrag von 2 GWh/ha (20%), der Windpark 480 MWh/ha ($4,8\%$) und Mais für Biogas 13 MWh/ha ($0,13\%$) elektrisch.

Frage 8.3.6: Off-shore Windparks. Für Off-shore Windparks verwendet man größere Windräder (mit Rotordurchmessern bis zu 160 m und 15 MW Leistung) und erreicht deutlich mehr Betriebsstunden im Jahr (ca. 4500 h). Welche Flächenerträge ergeben sich hiermit im Vergleich zu einem

On-Shore Windpark? Welche Nachteile haben Off-Shore-Anlagen im Vergleich mit On-Shore Anlagen bezüglich der Versorgung mit elektrischer Energie?

Lösung: Der Flächenbedarf verhält sich im Verhältnis der Quadrate der Rotordurchmesser: $A_{off}/A_{on} = (d_{off}/d_{on})^2$. Somit benötigt ein Windrad Off-shore eine um $(160/120)^2 = (4/3)^2 = 16/9 \approx 2$ mal größere Fläche. Der Ertrag pro Windrad im Jahr errechnet sich zu $4500h * 15 MW / (2500 h * 6 MW) = 4,5$ fach.

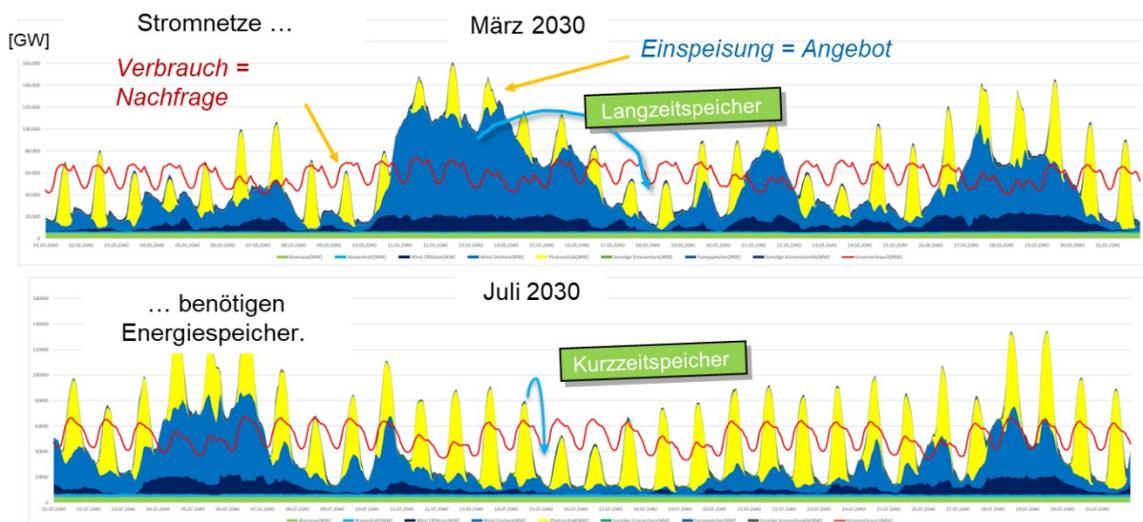
Im Vergleich zum On-Shore Windpark erhält man somit bezogen auf die Fläche einen Faktor $4,5/2 = 2,3$ -fach höheren Ertrag. Auf See spielt die Fläche jedoch weniger eine Rolle; entscheidend ist der absolute Ertrag bezogen auf die Baukosten.

Off-Shore Windparks befinden sich als Erzeuger weit weg von den Verbrauchern. Der Transport der elektrischen Energie ist also mit einem Ausbau der Netze bis zu den Verbrauchern verbunden. Insofern sind Off-Shore Windparks der zentralen Energieversorgung zuzuordnen. Ob der Windparkbetreiber eine Beteiligung an den Kosten für den Netzausbau einkalkuliert, hängt von den regulatorischen Randbedingungen ab.

On-Shore Windparks lassen sich grundsätzlich dezentral im Netz platzieren, somit näher an den Verbrauchern. Bei Ausschreibungen von Windanlagen liefern Off-Shore Anlagen und On-Shore Anlagen in Küstennähe grundsätzlich die höheren Erträge. Der erforderliche Ausbau der Netze wird hierbei nicht berücksichtigt.

8.4. Wasserstoffspeicher

Ein Windpark soll mit einem Wasserstoff-Speicher ausgestattet werden, so dass überschüssige Windenergie zur Erzeugung von Wasserstoff durch Elektrolyse von Wasser verwendet werden kann. Der Wasserstoff soll in Druckbehältern gespeichert werden. In Zeiten der Flaute soll der gespeicherte Wasserstoff mit Hilfe von Brennstoffzellen zurück verstromt werden. Der Windpark besitzt eine Leistung von 40 MW.



Die Abbildung illustriert den absehbaren Verlauf von Angebot und Nachfrage an elektrischer Energie. In Blau dargestellt ist das Angebot an Windenergie (hochgerechnet aus dem heutigen Angebot in Deutschland mit einem Faktor 2.5). Die rote Linie zeigt den Verlauf der Nachfrage. Man erkennt, dass das Angebot den doppelten Wert der Nachfrage erreicht. Der Wasserstoffspeicher soll als Langzeitspeicher für Windenergie dienen.

Frage 8.4.1: Energiemengen. Der Speicher soll für eine Dauer von 15 Tage Energie speichern können. Überschlägig wird hierbei von der Hälfte der Anschlussleistung des Windparks (also 20 MW) über die genannte Zeit ausgegangen. Die Elektrolyse besitzt einen Wirkungsgrad von

70%; Wasserstoff einen Energiegehalt von 33 kWh/kg. Welche Menge an Wasserstoff wird erzeugt? Welche Menge an Wasser wird hierzu benötigt?

Lösung: (1) benötigte Energiemenge: 15 Tage * 24 h/Tag * 20 MW = 7,2 GWh. (2) Energie des erzeugten Wasserstoffs: Nach der Elektrolyse verbleibt ein Anteil von 70% hiervon im Wasserstoff. Es verbleiben 5 GWh Energie im Wasserstoff. (3) Diese Energiemenge entspricht einer Masse von (5 GWh / 33 kWh) kg = 150 t Wasserstoff.

(4) Aus 1 Mol Wasser (H₂O) mit einer Masse von 18 g entsteht ein Mol H₂ mit einer Masse von 2 g. Somit wird die 9-fache Masse an Wasser benötigt, insgesamt also 1350 t.

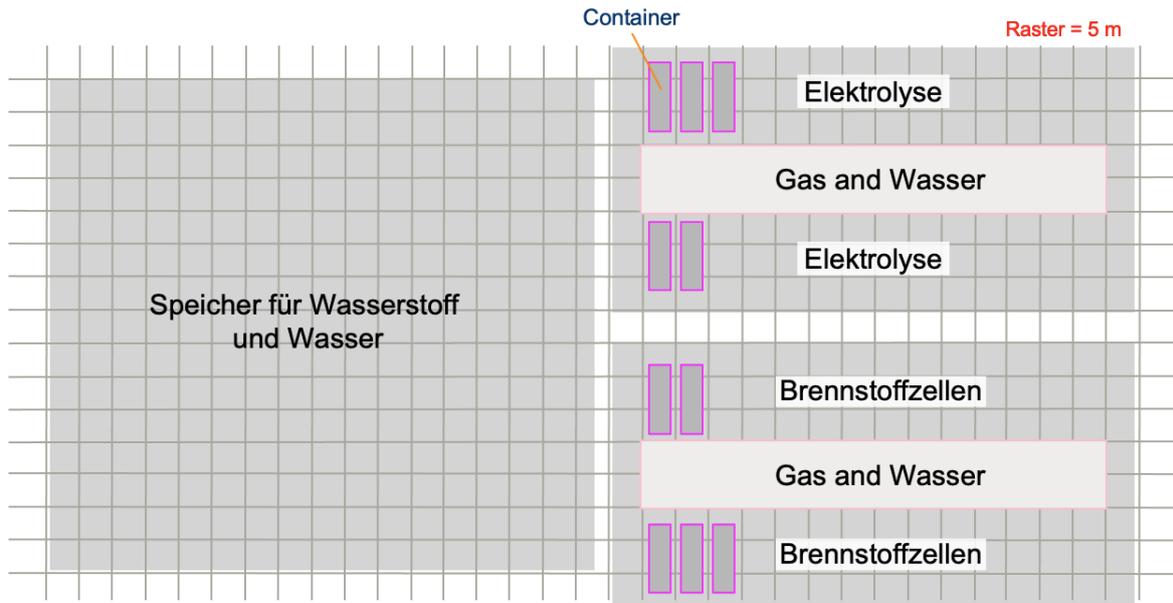
Frage 8.4.2: Wasserstofftanks. Folgender Übersicht über Energiedichten entnimmt das für die Energiemenge benötigte Volumen. Der Wasserstoff soll in Druckbehältern mit 20 MPa (200 bar) gespeichert werden. Es stehen Druckbehälter mit 75 m³ Fassungsvermögen zur Verfügung. Die Druckbehälter sind zylindrisch mit einer Höhe von ca. 6 m und einen Durchmesser von 4 m. Wie viele Drucktanks werden benötigt? Welche Grundfläche wird benötigt, wenn man die Tanks aufrecht stellt? Zusatzfrage: Welche Fläche benötigt der Wassertank bzw. das Wasserbecken?

Energiedichte	kWh/kg	kWh/Liter	Bemerkung
H ₂	33,3	0,003	Gas bei Normaldruck
		0,53	20 MPa (200 bar)
		1,86	70 MPa (700 bar)
		2,36	flüssig (bei -253 °C)
Erdgas (CH ₄)	13,9	2,58	20 MPa (200 bar)
Li-Ionen-Batterie	0,2	0,25 bis 0,68	
Dieselmotorkraftstoff	11,8	9,7	

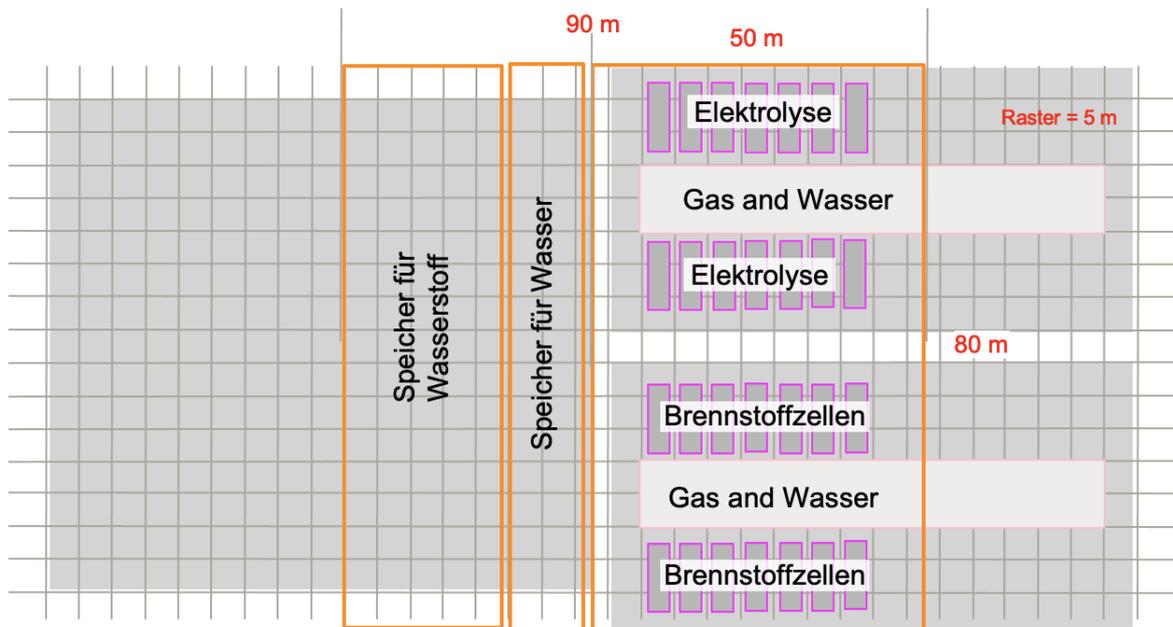
Lösung: (1) Aus der Tabelle entnimmt man eine Energiedichte von 0,54 kWh/Liter. Für die Energiemenge von 5 GWh werden somit (5 GWh / 0,54 kWh) Liter = 9,2 · 10⁶ Liter = 9200 m³ benötigt. (2) Hierfür werden 9200 / 75 ≈ 120 Drucktanks benötigt. (3) Bei aufrechter Aufstellung in 12 Reihen a 10 Tanks wird hierfür eine Grundfläche von 48 m x 40 m benötigt, also ca. 2000 m².

(2) Zusatzfrage: 1350 t Wasser (aus Frage 2.1) entsprechen ca. 1350 m³, bzw. etwa 1/7 des Volumens an komprimiertem Wasserstoff. Ein Tank bzw. Becken mit 3,38 m Tiefe hätte eine Stellfläche von 400 m², also etwa 40 m x 10 m.

Frage 8.4.3: Anlagen zur Elektrolyse und Brennstoffzellen. Damit Wasserstoff mit einer Leistung von 20 MW durch Elektrolyse erzeugt werden kann, werden Anlagen zur Elektrolyse benötigt. Diese stehen in Containerbauweise mit einer Leistung von 1,5 MW pro Container zur Verfügung. Ein Standardcontainer besitzt eine Größe von B x H x T = 2,5 m x 3 m x 12 m, wobei die Container in einem Raster von 5 m aufgereiht werden sollen, also mit etwas Platz zwischen den Containern. Es sollen 2 Reihen von Containern um eine Werkhalle aufgestellt werden, innerhalb derer die Verarbeitung der Gase und des Wassers erfolgt. Für die Rückverstromung stehen Brennstoffzellen in Containerbauweise mit einer Leistung von 1,5 MW pro Container zur Verfügung. Folgende Abbildung zeigt den Aufriss der Anlage. (1) Ergänzen Sie die benötigten Anlagen und die benötigten Flächen. Begründen Sie Ihre Auslegung stichwortartig. (2) Setzen Sie den Flächenbedarf der Anlagen ins Verhältnis zur Fläche des Windparks.



Lösung: Für 20 MW Leistung werden jeweils $20 \text{ MW} / 1.5 \text{ MW} = 14$ Container benötigt, sowohl für die Elektrolyse als für die Rückverstromung. Die Stellflächen für Wasserstoff und Wasser wurden in Frage 2.2 berechnet. Hiermit ergibt sich der unten dargestellte Platzbedarf.



(1) Elektrolyse und Brennstoffzellen lassen sich auf einer Fläche von $50 \text{ m} \times 80 \text{ m}$ unterbringen. Zusammen mit den Speichern für Wasserstoff und Wasser beträgt der Flächenbedarf weniger als $100 \text{ m} \times 100 \text{ m} = 1 \text{ ha}$. (2) Gemessen an der Windfläche des Windparks von ca. 250 ha beträgt der Anteil für die Anlagen somit weniger als 0,4%.

Frage 8.4.4: Biogasanlage. Auf einer Fläche von ca. 200 ha wird im Windpark Mais angebaut. Man rechnet mit einem Ertrag von 40 t/ha Frischmasse. Der Biogasertrag beträgt ca. 200 m³ pro Tonne, das Biogas hat einen Brennwert von ca. 5 kWh/m³. Zur Erzeugung des Biogases soll im Windpark eine Anlage errichtet werden. (1) Welche Menge an Biomasse fällt an? (2) Welche Menge an Biogas erhält man hieraus? (3) Welchen Ertrag an Energie liefert die Anlage im Vergleich zum Windpark? (4) Die Anlage soll mit 4000 Betriebsstunden pro Jahr betrieben werden.

Welche Leistung benötigt der Generator? Welches Fassungsvermögen benötigt der Gasspeicher für das Biogas schätzungsweise, wenn er Gas für einen Tagesbedarf produzieren soll? (5) Welche Fläche benötigt die Anlage schätzungsweise? Bemerkung: 1 m³ Silomais wiegt ca. 250 kg.

Lösung: (1) Menge an Biomasse: 200 ha * 40 t/ha = 8.000 t Mais. (2) Menge an Biogas: 200 m³/t * 8.000 t = 1,6 Millionen m³ Biogas. Bezogen auf die Fläche erhält man 8.000 m³ Biogas pro Hektar Anbaufläche.

(3) Ertrag an Energie: 200 m³/t * 8.000 t * 5 kWh/m³ = 8 GWh thermische Energie bzw. 3 GWh (ca. 1/3 hiervon) elektrische Energie. Diese Menge ist kleiner als die Größe des Wasserstoffspeichers im Windpark aus Aufgabe 1, stellt allerdings die Jahresproduktion an Energie aus Biomasse dar. Der Windpark produziert bei 40 MW Leistung und 2500 Betriebsstunden im Jahr eine Energiemenge von 100 GWh. Somit wäre der Ertrag an Strom aus Biomasse ca. 3% des Ertrags an Wind.

(4) Leistung des Generators: 3 GWh/4000 h = 0,75 MW. Soll der Gasspeicher die Menge für einen Tag liefern, wäre die Energiemenge 24 h * 0,75 MW = 18 MWh. Diese Energiemenge entspricht bei einer Energiedichte des Biogases von 5 kWh/m³ einem Volumen von (18 MWh / 5 kWh) m³ = 3.600 m³.

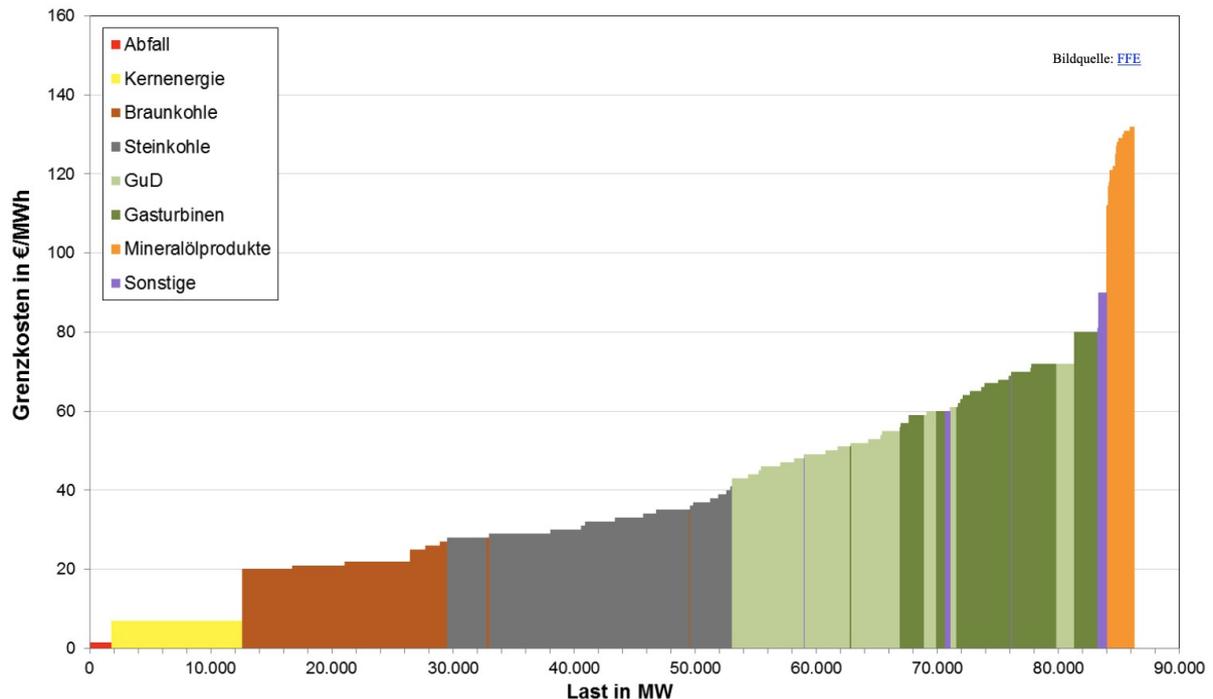
(5) Flächenbedarf der Anlage: Biomasse 8.000 t. Bei 4 m³/t wäre somit ein Volumen von 32.000 m³. Bei einer Schichtung von 2 m Höhe würde somit eine Fläche von 160 m x 100 m = 1,6 ha benötigt. Beträgt die Höhe des Gasspeichers 3 m, so benötigt dieser eine Stellfläche 1200 m² = 0,12 ha.

Bemerkung: Obwohl der Jahresertrag an elektrischer Energie aus Biogas bezogen auf den Ertrag des Windparks nur 3% beträgt, ist der Flächenbedarf der Biogasanlage größer als der Bedarf für den Wasserstoffspeicher (plus die Türme der Windräder). Rechnet man den landwirtschaftlichen Betrieb mit Dünger und Maschinen ein, gilt Energie aus Biogas auch nicht als komplett emissionsfrei.

8.5. Strommarkt

Auf dem Strommarkt werden einen Tag voraus nach einer stündlichen Lastprognose Angebote über Energie eingeholt. Hierbei sollen die günstigsten Anbieter zuerst zum Einsatz kommen. Folgende Abbildung zeigt die sich hierbei ergebende Einsatzreihenfolge konventioneller Kraftwerke (englisch Merit-Order). Die Reihenfolge ergibt sich aus den Grenzkosten der Stromerzeugung je nach Kraftwerkstyp. Dieses Marktmodell wird auch für den Handel mit Strom aus erneuerbaren Erzeugern beibehalten.

Merit Order konventioneller Kraftwerke in Deutschland Durchschnitt 2018



Frage 8.5.1: Erläuterung des Modells. Welcher Strompreis ergibt sich nach der Abbildung oben für einen Bedarfs von 80 GW in der Mittagszeit (z.B. 12:00 mittags im Februar)? Welcher Marktpreis ergibt sich bei einem Energiebedarf von 40 GW (z.B. nachts im Februar)? Welcher Kraftwerkstyp profitiert von diesem Modell am meisten?

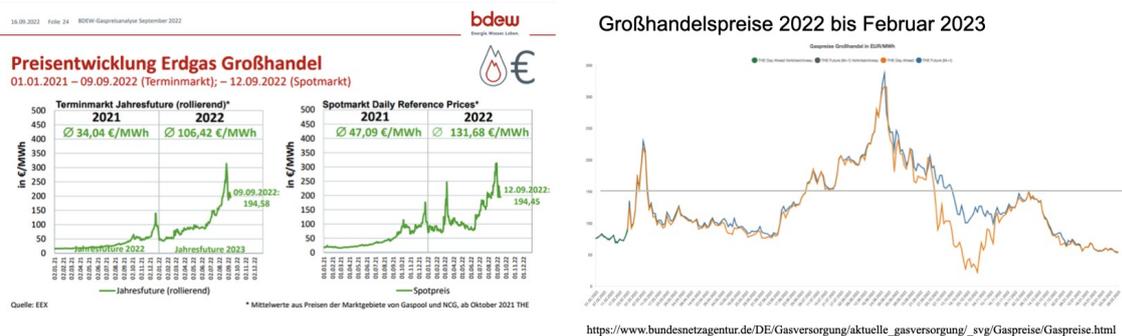
Lösung: Durch Ablesen bei 80 GW: ca. 70 €/MWh (bzw. 7 ct/kWh); bei 40 GW: ca. 30 €/MWh (bzw. 3 ct/kWh). Alle Marktteilnehmer mit geringeren Kosten (d.h. die vorrangigen Kraftwerkstypen) profitieren, hier also Kernkraft und Braunkohle, da der Marktpreis auf das höchste Gebot fixiert wird.

Frage 8.5.2: Einfluss der Brennstoffkosten. Zu den Grenzkosten gehören alle variablen Kosten, d.h. Brennstoffkosten, Kosten der CO₂-Zertifikate und sonstigen Betriebskosten. Welcher Grenzkosten ergeben sich für ein Gaskraftwerk bei einem Großhandelspreis von 20 €/MWh für Gas, wenn man nur die Brennstoffkosten berücksichtigt (Hinweis: elektrischen Wirkungsgrad berücksichtigen)? Welche Situation ergibt sich, wenn sich die Brennstoffkosten für Gas vervierfachen? Welchen Nachteil hat das Merit-Order-Modell in diesem Fall?

Lösung: (1) Brennstoffkosten als Grenzkosten: Bei einer Ausbeute von 1/3 für Strom aus Gas muss man die Brennstoffkosten verdreifachen, landet also bei ca. 60 €/MWh (bzw. 6 ct/kWh) als Großhandelspreis für Strom, was zu der Abbildung oben passt. (2) Bei vierfachen Kosten für Gas als Brennstoff steigt der Großhandelspreis für Strom auf 240 €/MWh (bzw. 24 ct/kWh).

(3) Nachteil des Modells: Die Vervielfachung des Strompreises gilt nicht nur für Gaskraftwerke, sondern für den Großhandelspreis insgesamt: Die Gaspreise treiben die Strompreise, obwohl nur ein Teil des Stroms tatsächlich in Gaskraftwerken produziert wird. Hierdurch ergeben sich erhebliche Gewinne für alle vorrangigen Kraftwerke, deren Brennstoffkosten nicht angestiegen sind.

Bemerkung: Folgende Abbildung zeigt die Entwicklung der Großhandelspreise für Erdgas. Der Anstieg der Preise beginnt bereits in der zweiten Jahreshälfte 2021.



Frage 8.5.3: Einfluss der Kosten für CO₂-Emissionen. Kosten für den Erwerb von CO₂-Zertifikaten gehen neben den Brennstoffkosten in die Grenzkosten ein. Welchen Kostenbeitrag liefern die Emissionen für (1) Kohlekraftwerke und (2) Gas- und Dampfkraftwerke? Als Preise für CO₂-Zertifikaten werden folgende Werte angenommen:

- (a) 20 €/t CO₂ (2020),
- (b) 80 €/t CO₂ (tatsächliche Kosten nach dem Bundesumweltamt).

Welcher Einfluss ergäbe sich auf den Großhandel nach der Merit-Order? Hinweis: Verwenden Sie als Brennwerte für Kohle ca. 9 kWh/kg (bzw. für Braunkohle 5 kWh/kg) und für Methan ca. 15 kWh/kg und berechnen Sie die hierbei freigesetzte Menge CO₂ bezogen auf den Energiegehalt. Berücksichtigen Sie den Wirkungsgrad der elektrischen Energieausbeute. Rechnen Sie überschlägig.

Lösung: Annahme für die Brennwerte: Kohle: 9 kWh/kg; Methan: 15 kWh/kg.

(1) Die Verbrennung von 12 g Kohlenstoff produziert 44 g CO₂, man erhält somit (44/12) kg CO₂ / 9 kWh = 0,4 kg CO₂/kWh = 0,4 t CO₂/MWh. Multipliziert mit einem Preis von 20 €/t CO₂ erhält man einen Beitrag zu den Grenzkosten von 8 €/MWh_{thermisch} bzw. 24 €/MWh_{elektrisch}. Beim 4-fachen Preis für die Zertifikate beträgt der Beitrag annähernd 100 €/MWh_{elektrisch} und wird somit signifikant.

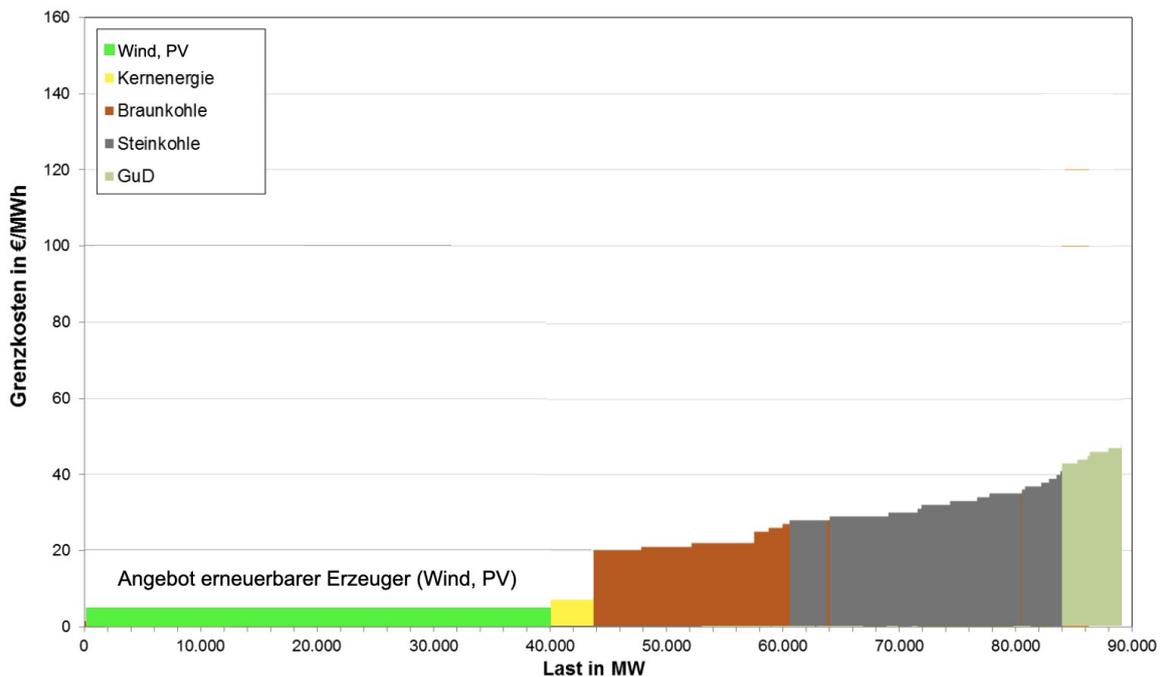
(2) Die Verbrennung von 16 g Methan produziert 44 g CO₂, man erhält somit (44/16) kg CO₂ / 15 kWh = 0,2 kg CO₂/kWh = 0,2 t CO₂/MWh. Multipliziert mit einem Preis von 20 €/t CO₂ erhält man einen Beitrag zu den Grenzkosten von 4 €/MWh_{thermisch} bzw. 16 €/MWh_{elektrisch}. Beim 4-fachen Preis für die Zertifikate beträgt der Beitrag annähernd 60 €/MWh_{elektrisch}.

Einfluss auf den Großhandel nach Merit-Order:

- Kohlekraftwerke: 30 €/MWh (Brennstoff) + 100 €/MWh (CO₂) = 130 €/MWh
- Gaskraftwerke: 50 €/MWh (Brennstoff) + 60 €/MWh (CO₂) = 110 €/MWh

Gaskraftwerke haben nun geringere Grenzkosten als Kohlekraftwerke. Für Braunkohle sieht die Lage noch schlechter aus, wobei in dieser Rechnung der geringere Kohlenstoffgehalt (ca. 65% gegenüber Steinkohle mit ca. 90%) berücksichtigt werden müsste.

Frage 8.5.4: Einfluss erneuerbarer Erzeuger. Mangels Brennstoffkosten und hiermit verbundener Kosten für CO₂-Emissionen sind die Grenzkosten erneuerbarer Erzeuger (EE) wie Windanlagen und PV-Anlagen annähernd Null. Nach dem EEG haben EE Vorrang auf dem Markt. Folgende Abbildung zeigt die Merit-Order abhängig von Angebot EE.



Welche Konsequenzen ergeben sich auf den Strompreis im Großhandel? Welche Rolle spielt hierbei das Angebot EE abhängig von der Tageszeit (viele Sonne um die Mittagszeit) bzw. abhängig von der Jahreszeit (z.B. Windflauten nachts). Wäre eine Börse mit einem Überangebot EE vorstellbar (wie im Osterpaket für das Jahr 2030 vorgesehen)? Welche Probleme sind mit dem vorhandenen Marktmodell verbunden?

Lösung: Die Strompreise sinken. Da sich unser Tagesablauf am Sonnenlicht orientiert, bringt speziell die Solarenergie eine erhebliche Entlastung zu den Mittagsspitzen im Strombedarf: Hier ergeben sich bereits heute die niedrigsten Großhandelspreise (siehe z.B. die Seite der Bundesnetzagentur www.s-mard.de). Bei einem Überangebot EE gehen die Großhandelspreise gegen Null: Für Erzeuger fehlen nach diesem Modell dann die Einnahmemöglichkeiten.

Problematisch ist das Fehlen von Energiespeichern als Kurzzeitspeicher im Tagesverlauf, sowie als Langzeitspeicher bei Windflauten, sowie im Jahresverlauf. Diese Möglichkeiten stehen inzwischen technisch zur Verfügung, sind im Marktmodell aber überhaupt nicht vorgesehen (abgesehen von Pumpspeicherkraftwerken mit vergleichsweise sehr geringer Kapazität von ca. 1 h Speicherdauer). Stattdessen werden Kapazitätsreserven konventioneller Kraftwerke vorgesehen, die über gesonderte Märkte für Regelleistung und Ausgleichsenergie finanziert werden.

Frage 8.5.5: Merit-Order auf Basis Gesamtkosten. Wäre ein Merit-Order Modell denkbar, das die Gesamtkosten der Anlagen berücksichtigt, also auch die Fixkosten? Gehen Sie für eine überschlägige Berechnung von folgenden Annahmen aus:

- Fixkosten für konventionelle Kraftwerke: 2500 €/kW bei 6000 Betriebsstunden
- Fixkosten für Windanlagen (an Land): 800 €/kW bei 2000 Betriebsstunden
- Fixkosten für PV-Anlagen: 400 €/kW bei 1000 Betriebsstunden
- Bei einer Abschreibungsdauer der Anlagen von 20 Jahren und 3% Zinsen beträgt der Annuitätsfaktor ca. 0,0672.

Welche Merit-Order ergibt sich?

Lösung: Kosten pro Jahr mit dem o.g. Annuitätsfaktor und Berücksichtigung der Betriebsstunden:

- konventionell: 168 €/kW => 0,028 €/kWh = 28 €/MWh

- Windanlage: 54 €/kW => 0,026 €/kWh = 26 €/MWh
- PV-Anlage: 27 €/kW => 0,027 €/kWh = 27 €/MWh

Bei den konventionellen Kraftwerken kommen noch die Kosten für Brennstoff und Emissionen hinzu. Hierdurch bleiben die EE-Erzeuger vorne, jedoch deckt der nunmehr erzielte Großhandelspreis die anteiligen Kosten im Jahr für Investitionen ab. Bei abbeschriebenen Anlagen entfällt der Fixkostenteil, diese werden also nach vorne gezogen. Es bleibt die Frage, wie man Energiespeicher sinnvoll in ein Marktmodell einbindet.

8.6. Brennstoffe

Für Brennstoffe finden sich folgende Energiedichten:

Brennstoff	Energiedichte [kWh/kg]	CO ₂ -Bilanz [kg/kWh]
Wasserstoff (H ₂)	33,3	
Erdgas (CH ₄)	13,9	
Dieselmotorkraftstoff (C ₁₆ H ₃₄)	11,8	
Kohle (C)	8,1	

Frage 8.6.1: CO₂-Bilanzen. Wie viel CO₂ wird bei der Verbrennung der genannten Brennstoffe pro kWh freigesetzt? Verwenden Sie hierzu die Strukturformeln der Reaktionen.

Lösung: (1) Wasserstoff: Es wird kein CO₂ freigesetzt, bei der Verbrennung entsteht nur Wasser.

(2) Erdgas: $\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$. Pro Mol CH₄ erhält man 1 Mol CO₂. Die molare Masse von CH₄ beträgt 16 g, die von CO₂ beträgt 44g. Pro kg CH₄ werden somit $44/16 \text{ kg} = 2,75 \text{ kg CO}_2$ freigesetzt. Bezogen auf die Energiemenge erhält man somit 0,19 kgCO₂/kWh.

(3) Dieselmotorkraftstoff: $\text{C}_{16}\text{H}_{34} + (49/2) \text{O}_2 \rightarrow 16 \text{CO}_2 + 17 \text{H}_2\text{O}$. Der Kraftstoff besitzt eine molare Masse von $16 \cdot 12 \text{ g} + 34 \text{ g} = 226 \text{ g}$ und setzt pro Mol 16 Mol CO₂ frei. Pro kg Kraftstoff werden $(16 \cdot 44)/226 \text{ kg} = 3,1 \text{ kg CO}_2$ freigesetzt. Bezogen auf die Energie erhält man 0,26 kgCO₂/kWh.

(4) Kohle: $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$. Pro Mol Kohlenstoff mit der Masse 12 g entsteht 1 Mol CO₂ mit der Masse 44g. Pro kg Kohlenstoff entstehen somit $44/12 = 3,7 \text{ kg CO}_2$. Diese Menge entspricht einer Energiemenge von 8,1 kWh. Somit erhält man für Kohlenstoff 0,46 kg CO₂/kWh.

Es ergibt sich folgende Tabelle:

Brennstoff	Energiedichte [kWh/kg]	CO ₂ -Bilanz [kg/kWh]
Wasserstoff (H ₂)	33,3	0
Erdgas (CH ₄)	13,9	0,19
Dieselmotorkraftstoff (C ₁₆ H ₃₄)	11,8	0,26
Kohle (C)	8,1	0,46

Frage 8.6.2: Einsatz der Brennstoffe in thermischen Maschinen (Kraftwerke, Fahrzeuge). Welcher Brennstoff eignet sich somit bezogen auf die CO₂-Bilanz am besten zum Einsatz in thermischen Maschinen? Wie viel besser als Kohle sind Erdgas und Öl bei der Stromerzeugung? Was ist beim Einsatz synthetischer Kraftstoffe in Kraftwerken und Fahrzeugen zu beachten?

Lösung: (1) Ideal wäre Wasserstoff. (2) Erdgas setzt im Verhältnis zur Steinkohle $0,19/0,46 = 0,41$ frei, somit weniger als die Hälfte. Dieselmotorkraftstoff im Verhältnis zur Kohle $0,26/0,46 = 0,57$ frei, also mehr

als die Hälfte. Bei der Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen wäre somit Erdgas die bessere Wahl als Kohle oder Mineralöl. Zudem ist der Transport des Erdgases durch Gasleitungen einfach.

(3) Synthetische Kraftstoffe:

- Die *CO₂-Bilanz der Erzeugung* der Kraftstoffe muss einkalkuliert werden.
- Bei der Stromerzeugung und bei Fahrzeugen muss außerdem der *Wirkungsgrad der thermischen Maschinen* (Kraftwerksturbine, Verbrennungsmotor) berücksichtigt werden, die nur eine Ausbeute von 1/4 bis 1/3 der Verbrennungsenergie gestatten.

Sollten die synthetischen Kraftstoffe mit Einsatz von Strom aus erneuerbaren Erzeugern gewonnen werden, sind Elektrofahrzeuge sehr deutlich im Vorteil: Hier wird der Strom nahezu verlustfrei in Bewegungsenergie umgesetzt. Bei Gaskraftwerken ist die Rückverstromung möglich, allerdings nur mit o.g. Wirkungsgrad. Hier wären Wasserstoff-Brennstoffzellen die deutlich bessere Wahl.

Bemerkung: Die in der Tabelle genannten CO₂-Bilanzen gelten für die Wärmeerzeugung, d.h. thermische kWh. Für elektrische kWh wären die CO₂-Werte durch die Wirkungsgrade der Wandlung thermischer Energie in elektrische Energie zu dividieren, sie werden somit deutlich größer (sie verdreifachen sich).

Frage 8.6.3: Einsatz der Brennstoffe zur Wärmeerzeugung. Beim Heizen wird (im Unterschied zur thermischen Maschine) die Verbrennungsenergie vollständig genutzt. Synthetisches Heizöl (E-Heizöl) oder synthetisches Erdgas (E-Gas), das aus erneuerbarem Strom gewonnenes wird, wären ja ebenfalls klimaneutral und würden eine kostspielige Umstellung der Ölheizungen und Gasheizungen auf Wärmepumpen vermeiden. Außerdem müssten solche Anlagen nicht elektrisch betrieben werden und könnten die Stromnetze entlasten. Wie wäre ein solcher Ansatz zu bewerten?

Lösung: Mit dem Wirkungsgrad der Erzeugung der Brennstoffe. Selbst wenn dieser 100% betrüge, hätte die Wärmepumpe den Vorteil, den Energieeinsatz zu verdreifachen.

Rechnet man die Gewinnung von Wasserstoff aus Strom überschlägig mit einem Wirkungsgrad von 0,6, die Gewinnung von Methan aus Wasserstoff mit 0,6, und die Verkettung der Methan-Moleküle zum Kraftstoff mit 0,6, so bleiben vom eingesetzten Strom bei E-Gas 36%, beim E-Heizöl 22%.

Im Vergleich zur Wärmepumpe beträgt die Ausbeute an Heizenergie dann 12% bzw. 7%.

Frage 8.6.4: Biokraftstoffe. Biokraftstoffe werden aus Pflanzen gewonnen, entweder aus Energiepflanzen oder Pflanzenresten. Produzieren lassen sich Biogas, Bioethanol und Biodiesel. Was ist beim Einsatz dieser Brennstoffe für thermische Maschinen (Kraftwerke, Fahrzeuge) und zur Wärmeproduktion (Heizen) zu beachten? Welche Unterschiede bestehen zu elektrisch produzierten synthetischen Kraftstoffen?

Lösung: Wie bei synthetischen Kraftstoffen:

- Die *CO₂-Bilanz der Erzeugung* der Kraftstoffe muss einkalkuliert werden.
- Bei der Stromerzeugung und bei Fahrzeugen muss außerdem der *Wirkungsgrad der thermischen Maschinen* (Kraftwerksturbine, Verbrennungsmotor) berücksichtigt werden, die nur eine Ausbeute von 1/4 bis 1/3 der Verbrennungsenergie gestatten.

Unterschiede zu synthetischen Kraftstoffen: Die Anbauflächen sind begrenzt. Es besteht eine Konkurrenz zwischen Futtermitteln (Trog), Nahrungsmitteln (Teller) und Maschine (Tank). Für die Maschine existieren effizientere Alternativen zu Biokraftstoffen. Eine Ausnahme bilden Biokraftstoffe aus der Verwertung von Resten (Pflanzenresten und Abfällen), sofern es hierfür keine kürzeren Ketten zur Verwertung gibt.

8.7. Flächenertrag erneuerbarer Erzeuger

Zum Vergleich unterschiedlicher erneuerbarer Erzeuger soll ihr Ertrag bezogen auf den Flächenbedarf ermittelt werden. Zur Wahl stehen: Solarthermie, PV-Anlagen, Windanlagen, Biogas aus Mais, Biodiesel und Bioethanol aus Stroh oder Roggen. Als Referenz dient hierbei die Einstrahlung der Sonne mit einer Jahresenergie von 1 MWh pro m² (bei einer Leistung von 1 kW/m² und etwa 1000 Sonnenstunden pro Jahr im Bereich des 49. Breitengrades).

Frage 8.7.1: Direkte Sonnenenergie (Solarthermie und PV). Von der einfallenden Solarleistung wandelt die Solarthermie etwa 60% in Wärme. PV-Anlagen erreichen eine Leistung von bis zu 1 kW bei 5 m² Fläche. Welche Ausbeute hat eine PV-Anlage somit bezogen auf die jährliche Sonneneinstrahlung (im Jahresertrag und in Prozent)?

Lösung: Pro m² errechnet man $1/5 = 20\%$ als maximale Ausbeute an Solarstrahlung. Als Jahresertrag ergeben sich somit 0,2 MWh/m².

Frage 8.7.2: Windanlagen. Für Windanlagen rechnet man mit einem Flächenbedarf von ca. 0,3 km² für ein Windrad mit 6 MW Leistung. Welcher Flächenertrag ergibt sich für Windenergie, wenn man 2500 Windstunden pro Jahr annimmt. Welcher Ertrag ergibt sich bezogen auf die Sonneneinstrahlung?

Lösung: $6 \text{ MW} \cdot 2500 \text{ h} / 0,35 \text{ km}^2 = 15 \cdot 10^3 \text{ MWh} / 0,3 \cdot 10^6 \text{ m}^2 = 0,05 \text{ MWh/m}^2$. Somit ergibt sich bezogen auf die Sonneneinstrahlung eine Ausbeute von 5%.

Frage 8.7.3: Bioenergie (Biogas, Biodiesel und Bioethanol). (1) Für Biogas wird Biomais angebaut. Man rechnet mit einem Ertrag von ca. 40 t/ha für Mais, und ca. 200 m³ Biogas pro t Mais. Das Gas hat einen Brennwert von 5 kWh/m³. (2) Für Biodiesel aus Raps werden 500 m² Anbaufläche benötigt, um eine Energiemenge von 1 MWh zu erzeugen. (3) Für Bioethanol aus Stroh oder Roggen ist der Flächenbedarf etwa doppelt so hoch als für (2).

Welche Jahreserträge in kWh/m² ergeben sich? Hinweis: 1 ha entspricht einer Fläche von 100 x 100 m² = 10⁴ m². Welche Erträge ergeben sich bezogen auf die jährliche Sonneneinstrahlung?

Lösung: (1) Biogas aus Mais: $40 \text{ t/ha} \cdot 200 \text{ m}^3/\text{t} \cdot 5 \text{ kWh/m}^3 = 40000 \text{ kWh/ha} = 4 \text{ kWh/m}^2$. (2) Biodiesel aus Raps: $1000 \text{ kWh}/500 \text{ m}^2 = 2 \text{ kWh/m}^2$. (3) Bioethanol aus Roggen oder Stroh: die Hälfte und somit 1 kWh/m².

Frage 8.7.4: Welche Rangfolge der Energieträger Bioenergie, Windenergie (Frage 2.2), und Sonnenenergie (Frage 2.1) ergibt sich es bezogen auf die benötigte Fläche? Welche Besonderheit hat der Flächenbedarf bei der Windenergie? Welche Energie ist thermisch, welche elektrisch?

Energieträger	Flächenertrag bezogen auf 1 MWh/Jahr	Bemerkungen
Solarthermie		
PV		
Windenergie		
Biogas aus Mais		
Biodiesel aus Raps		
Bioethanol aus Roggen oder Stroh		

Lösung: siehe folgende Tabelle.

Energieträger	Flächenertrag bezogen auf 1 MWh/Jahr	Bemerkungen
Solarthermie	60%	thermisch
PV	20%	elektrisch
Windenergie	5%	elektrisch, Fläche nutzbar für Forst-

		und Landwirtschaft
Biogas aus Mais	0,4%	thermisch
Biodiesel aus Raps	0,2%	thermisch
Bioethanol aus Roggen oder Stroh	0,1%	thermisch

Frage 8.7.5: Bedarf eines Haushalts. Ein Haushalt hat einen jährlichen Strombedarf von 4 MWh, einen Bedarf an Heizöl oder Erdgas von 21 MWh, sowie einen Bedarf an Benzin oder Diesel im Umfang von 10 MWh (bei einer Fahrleistung von 15000 km/Jahr und einem Verbrauch von 8 Litern/100 km). Insgesamt werden somit 35 MWh benötigt.

Welcher Energiebedarf ergibt sich etwa, wenn die Heizung auf eine Wärmepumpe umgestellt und ein elektrisches Fahrzeug verwendet wird. Welche Fläche hätte eine PV-Anlage, die diesen Jahresbedarf liefern kann? Welche Optionen gäbe es für den Bedarf an Warmwasser und Heizung (als Alternative oder Ergänzung zu PV und Wärmepumpe)?

Lösung: (1) Energiebedarf Heizen: ca. 1/3, somit 7 MWh, Energiebedarf Fahrzeug ca. 2,5 MWh. Insgesamt werden somit 14,5 MWh benötigt.

(2) Fläche der Solaranlage: bei 1000 Volllaststunden im Jahr wird für 14,5 MWh eine Anlage mit einer Leistung von 14,5 kW benötigt. Eine solche Anlage benötigt bei 5 m²/kW eine Fläche von ca. 90 m².

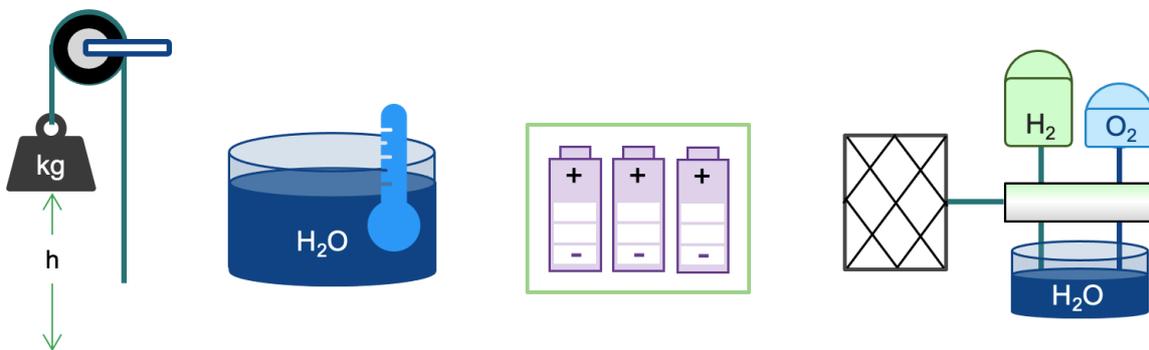
(3) Optionen für Warmwasser und Heizung:

- Solarthermie für Warmwasser in Kombination mit thermischen Energiespeichern.
- Erhöhung der Arbeitszahl der Wärmepumpe durch einen thermischen Energiespeicher, bzw. durch ein Kaltwassernetz.

Heizen mit Holz (ca. 4 kWh/kg, somit ca. 5,2 t Holz oder 7 m³).

8.8. Energiespeicher

Fossile Kraftwerke basieren auf in fossilen Brennstoffen gespeicherter Energie. Die Brennstoffe werden in Kohlebunkern, Öltanks und Gastanks gelagert. Erneuerbare Erzeuger wie Wind, PV und Laufwasser benötigen keine Brennstoffe und kein Brennstofflager, jedoch ist für eine kontinuierliche Energieversorgung der Einsatz von Speichern nötig.



In dieser Aufgabe werden die Energiedichten, Effizienz der Wandlung und Selbstentladung unterschiedlicher Speicher miteinander verglichen.

Frage 8.8.1: Mechanische Speicher. Pumpspeicher als mechanische Speicher speichern potenzielle Energie, indem sie eine Menge Wasser in ein Oberbecken pumpen. Die potenzielle Energie berechnet sich aus der Masse m des Wassers, dem Höhenunterschied h , und der Erdbeschleunigung g .

gung g : $E_{\text{pot}} = m g h$. Hierbei berechnet sich die Masse $m = \rho V$ aus der Dichte (bei Wasser etwa 1 kg/Liter) und dem Volumen V . Für die Erdbeschleunigung kann $g = 10 \text{ m/s}^2$ angenommen werden. Welche Energiemenge in kWh kann ein Volumen von 10 m^3 Wasser speichern, wenn es auf eine Höhe von $h = 10 \text{ m}$ gepumpt wird? Welche Energiedichte ergibt sich pro kg Wasser? Wie beurteilen Sie die Effizienz der Wandlung? Über welche Zeit bleibt die Energie erhalten (Verluste durch Entladung)? Ließe sich die Energiedichte direkt aus der potenziellen Energie berechnen? Hängt die Energiedichte vom Speichermedium ab?

Lösung: $E_{\text{pot}} = \rho V g h = 1 \text{ kg}/10^{-3} \text{ m}^3 * 10 \text{ m}^3 * 10 \text{ m/s}^2 * 10 \text{ m} = 10^6 \text{ kg m}^2/\text{s}^2 = 10^6 \text{ Nm} = 10^6 \text{ Ws} = 278 \text{ Wh}$. Die Energiedichte beträgt somit $278 \text{ Wh}/10 * 10^3 \text{ kg} = 0,028 \text{ Wh/kg}$. Die Effizienz der Wandlung ist durch Einsatz elektrischer Maschinen hoch. Die Speicherdauer ist nicht begrenzt, die Verluste durch Entladung sind sehr gering (ggf. Verdunstung im Oberbecken).

Die Energiedichte ließe sich direkt aus $\delta = E_{\text{pot}}/m = g h$ berechnen. Für Pumpspeicher erhält man $\delta = g h = 10 \text{ m/s}^2 * 10 \text{ m} = 100 \text{ Nm/kg} = 100 \text{ Ws/kg} = 0,028 \text{ Wh/kg}$. Die Energiedichte ist unabhängig vom Speichermedium.

Frage 8.8.2: Thermische Speicher. Als Speichermedium lässt sich ein Wassertank verwenden, der aus überschüssiger Energie beheizt wird. Als Speichermedium dient die Wärme: $E_{\text{th}} = m c_{\text{th}} \Delta T$. Hierbei bezeichnet $m = \rho V$ die Masse des Speichermediums, c_{th} die spezifische Wärmekapazität des Speichermediums und ΔT den Temperaturunterschied zur Außentemperatur. Es wird ein wärmeisolierter Wassertank mit einem Volumen von 10 m^3 verwendet. Die spezifische Wärmekapazität von Wasser beträgt $c_{\text{th}} = 4,2 \text{ kJ}/(\text{kg K})$.

- Der Tank lässt sich im 60 Grad gegenüber der Außentemperatur erwärmen. Welche Energiemenge lässt sich speichern? Berechnen Sie die Energiedichte in kWh/kg.
- Phasenübergang. Mit Hilfe einer Wärmepumpe lässt sich das Wasser bis unter den Gefrierpunkt abkühlen. Hierbei wird beim Phasenübergang von flüssigen in den festen Zustand Energie frei. Welche Energiemenge lässt sich hieraus gewinnen? Berechnen Sie die Energiedichte in kWh/kg. Beim Gefrieren von Wasser bei konstanter Temperatur (d.h. beim Phasenübergang) wird eine Energiemenge von 334 kJ/kg freigesetzt (Schmelzenthalpie oder Gefrierwärme). Bemerkung: Die Wärmekapazität bei der weiteren Abkühlung beträgt 2 kJ/(kg K), wird aber für diese Frage nicht benötigt. Gesucht ist nur die Wärme beim Phasenübergang.
- Wie beurteilen Sie die Effizienz der Wandlung und die Entladung durch Verluste?

Lösung:

- Die Energiedichte lässt sich direkt aus $\delta = E_{\text{th}}/m = c_{\text{th}} \Delta T$ berechnen. Für Wasser erhält man $\delta = 4,2 \text{ kJ}/(\text{kg K}) * 60 \text{ K} = 252 \text{ kJ/kg} = 252 \text{ kWs/kg} = 70 \text{ Wh/kg} = 0,07 \text{ kWh/kg}$. Für eine Masse von $10 \text{ t} = 10^4 \text{ kg}$ (entsprechend 10 m^3 Wasser) ergeben sich 700 kWh.
- Phasenübergang: Die Energiedichte beträgt $334 \text{ kJ/kg} = 334 \text{ kWs/kg} = 93 \text{ Wh/kg} = 0,093 \text{ kWh/kg}$. Diese Energiedichte ist somit höher als im gesamten warmen Temperaturbereich. Für eine Masse von $10 \text{ t} = 10^4 \text{ kg}$ (entsprechend 10 m^3 Wasser) ergeben sich 930 kWh.
- Effizienz der Wandlung und Entladung durch Verluste: Die Effizienz der Wandlung, d.h. bei Erwärmen und Abkühlen ist hoch (größer als 90%). Die Verluste sind im Bereich höherer Temperaturen abhängig von der Außentemperatur und der Wärmeleitfähigkeit der Isolation. Interessant ist hierbei der Bereich unterhalb der Außentemperatur: Hierfür wäre eine Wärmeisolation störend, sie kann folglich entfallen. Aus Wärmeverlusten wird ein Gewinn, da Wärme von außen zuströmt. Der Speicher gleicht sich im Sommer der Außentemperatur im Erdreich an, und wird im Winter abgekühlt.

Frage 8.8.3: Batteriespeicher. Batteriespeicher speichern elektrische Ladungen und eignen sich somit zum direkten Anschluss an elektrische Anlagen oder an ein elektrisches Netz. Batteriespeicher besitzen folgende Eigenschaften:

- Die Energiedichten für Li-Ionen-Akkus nach heutigem Stand der Technik liegen im Bereich 150 Wh/kg.
- Als Eigenschaft wird die C-Rate als Verhältnis des Ladestroms (bzw. Entladestroms) in A zur Batteriekapazität in Ah definiert.
- Effizienz der Wandlung und Selbstentladung: Die Verluste bei der Wandlung liegen im Bereich von 10%. Die Selbstentladung ist bei Li-Ionen-Akkus kleiner als 2% pro Monat.

(a) Wie schätzen Sie die Energiedichte im Vergleich zu dem mechanischen und thermischen Speicher aus den Aufgaben 3.1 und 3.2 ein? (b) Welcher Wert folgt aus einer C-Rate von $C = 1$ für die Speicherdauer als Verhältnis von Energiemenge zum Anschlusswert ($H = E/P$)? Was bedeutet dieser Wert für eine Batterie von 100 kWh? (c) Für welchen Einsatzzweck eignen sich Batteriespeicher somit am besten?

Lösung: (a) Mit $\bar{\delta}_{\text{Bat}} = 0,15 \text{ kWh/kg}$ wäre die Batterie sehr viel besser als ein Pumpspeicher mit $\bar{\delta}_{\text{Mech}} = 0,028 \cdot 10^{-3} \text{ kWh/kg}$ mit einer Fallhöhe von 10m. Die Energiedichte des Pumpspeichers lässt sich mit der Fallhöhe h steigern, allerdings bleibt der Effekt auf die Energiedichte bescheiden.

Im Vergleich zum thermischen Speicher mit $\bar{\delta}_{\text{therm}} = 0,07 \text{ kWh/kg}$ ist die Energiedichte des Batteriespeichers doppelt so groß, im Vergleich zum Kältespeicher mit Phasenübergang $\bar{\delta}_{\text{therm}} = 0,093 \text{ kWh/kg}$ etwas größer.

Bemerkung: Die Bezugsgröße beim Pumpspeicher und beim thermischen Speicher ist 1 kg Wasser. Bezugsgröße beim Batteriespeicher ist 1 kg Batterie. Der Batteriespeicher verfügt über einen elektrischen Anschluss. Beim Pumpspeicher und Wärmespeicher sind zusätzliche Maschinen erforderlich. Die Energiedichte erlaubt somit keinen Vergleich des technischen Aufwandes bzw. der Kosten.

(b) $H = 1 \text{ h}$ (eine Stunde). Für eine Batterie mit 100 kWh Speicherkapazität bedeutet dieser Wert, dass die Batterie bei einer Anschlussleistung von 100 kW betrieben werden kann und dann in 1 h entladen (bzw. aufgeladen) wäre. (c) Die Selbstentladung bei Li-Ionen-Akkus ist relativ gering. Wegen der relativ geringen Verluste und des im Verhältnis zur Energiemenge hohen Anschlusswertes eignen sich Batteriespeicher vor allem als Kurzzeitspeicher z.B. für Tageszyklen.

Frage 8.8.4: Wasserstoffspeicher. Bei der Wandlung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff wird chemisch Energie gespeichert bzw. freigesetzt. Die Energiemenge geht aus der Bildungsenthalpie von Wasser hervor:

- Wasser H_2O : -242 kJ/Mol (gasförmig), -286 kJ/Mol (flüssig)

Es soll ein Wassertank mit einem Volumen von 10 m^3 eingesetzt werden.

- Welche Energiemenge muss zur Zerlegung des Wassers eingesetzt werden? Welche Energiedichte (in kWh) ergibt sich folglich pro kg Wasser?
- Welche Mengen an Sauerstoff und Wasserstoff werden freigesetzt und müssen folglich gespeichert werden?
- Effizienz der Wandlung und Selbstentladung: Bei der Wandlung ist die Ausbeute jeweils im Bereich von 70%. Wie schätzen Sie die Verluste durch Selbstentladung ein? Für welchen Einsatzzweck eignet sich diese Art der Speicherung somit am besten? Welche Besonderheiten hat dieser Speicher?
- Tragen Sie zum Vergleich der Speichertechnologien aus Aufgabe 3 die Eigenschaften in in folgende Tabelle zusammen.

Speichertyp	Energiedichte [kWh/kg]	Wanderverluste [$< 10\%$, $> x\%$]	Selbstentladung [hoch, niedrig]
Pumpspeicher (10 m)			
Thermischer Speicher bei Wärme			

Thermischer Speicher bei Kälte			
Batteriespeicher			
Wasserstoffspeicher (pro kg Wasser)			

Lösung: (a) Pro Mol Wasser ist eine Energiemenge von 286 kJ aufzuwenden. Mit einer molaren Masse von 18 g/Mol für Wasser beträgt die Energiedichte $286 \text{ kJ} / 18 \text{ g} = 15,9 \text{ kJ/g} = 15900 \text{ kJ/kg} = 15900 \text{ kWh/kg} = 4,4 \text{ kWh/kg}$.

(b) Die molare Masse von Wasser (H_2O) beträgt 18 g und setzt sich zusammen aus 16 g Sauerstoff (O), und 2 g Wasserstoff (H_2). Aus 18 g Wasser ergeben sich somit 16 g Sauerstoff und 2 g Wasserstoff. Aus 10 m^3 Wasser entsprechend 10 t erhält man $16/18 \cdot 10 \text{ t} = 8,9 \text{ t}$ Sauerstoff und $2/18 \cdot 10 \text{ t} = 1,1 \text{ t}$ Wasserstoff.

(c) Die Selbstentladung ist gering: Wasser, Wasserstoff und Sauerstoff lassen sich über lange Zeit speichern. Allerdings sind die Wandlerverluste hoch: der Speicher eignet sich nicht für viele Ladezyklen. Der Einsatz beschränkt sich somit auf die Langzeitspeicherung. Besonderheiten: Es kann Wasser und Gas nachgefüllt und abgefüllt werden, somit besteht die Möglichkeit der Sektorkopplung von Strom-, Wasser- und Gasversorgung.

(d) Stellt man die Ergebnisse in einer Tabelle zusammen, so ergibt sich folgendes Bild:

Speichertyp	Energiedichte [kWh/kg]	Wandlerverluste [%]	Selbstentladung [hoch, niedrig]
Pumpspeicher (10 m)	$0,028 \cdot 10^{-3}$	< 10%	niedrig
Thermischer Speicher bei Wärme	0,07	< 10%	niedrig
Thermischer Speicher bei Kälte	0,093	< 10%	nicht anwendbar (negativ)
Batteriespeicher	0,15	< 10%	niedrig
Wasserstoffspeicher (pro kg Wasser)	4,4	> 30%	niedrig

Bemerkung: Den bekannten Wert von 33 kWh/kg Wasserstoff erhält man mit folgender Rechnung: Pro Mol Wasser mit 18 g erhält man 1 Mol H_2 mit 2 g. Somit wäre die auf Wasser bezogene Energiedichte um einen Faktor $18/2 = 9$ nach oben zu korrigieren: $4,4 \text{ kWh/kg Wasser} = 39 \text{ kWh/kg Wasserstoff}$. Dass dieser Wert höher ausfällt, liegt an der verwendeten Enthalpie für Wasser H_2O : -242 kJ/Mol (gasförmig), -286 kJ/Mol (flüssig). Korrigiert man den Betrag um das Verhältnis $242/286$, so ergeben sich für die Energiedichte von Wasserstoff 33 kWh/kg.

Englisch - Deutsch

Active power	Wirkleistung
Apparent power	Scheinleistung
Capacitor	Kapazität
Circuit breaker	Leistungsschalter
Line voltage	Leiter-zu-Leiter Spannung (Effektivwert)
Inductor	Induktivität
Nominal power	Nennleistung
Nominal voltage	Nennspannung
Peak value	Spitzenwert
Phase voltage	Leiter-zu-Nullleiter Spannung (Effektivwert)
Reactive power	Blindleistung
Resistor	Widerstand
Transformer	Transformator
Transmission	Übertragung
Voltage source	Spannungsquelle
Winding	Wicklung
...	
...	

Abkürzungen

AC	Alternating Current, Wechselstrom
DC	Direct Current, Gleichstrom
$T = 1/f$	Schwingungsdauer, Periodendauer [s]
$f = 1/T$	Frequenz, Anzahl der Schwingungen pro Zeiteinheit [1/s]
$\omega = 2\pi f = 2\pi/T$	Kreisfrequenz, Winkelgeschwindigkeit der Kreisbewegung [1/s]
E	Energie [Joule, J, Nm, Ws, $\text{kg m}^2/\text{s}^2$] potentielle Energie $E_p = 1/2 k y^2$, kinetische Energie, Translation $E_k = 1/2 m v^2$, kinetische Energie, Rotation $E_r = 1/2 J \omega^2$, Energie elektrisches Feld $E_C = 1/2 C U^2$, Energie magnetisches Feld $E_L = 1/2 L I^2$
RMS	Root mean square (Effektivwert)
Z	komplexer Widerstand (Impedanz, impedance)
R	Wirkwiderstand (resistance)
X	Blindwiderstand (Reaktanz, reactance)
Y	komplexer Leitwert (Admittanz, admittance)
G	Wirkleitwert (conductance)
B	Blindleitwert (susceptance)
S	Scheinleistung (apparent power, in VA = Volt Ampere)
P	Wirkleistung (power, in Watt)
Q	Blindleistung (reactive power, in Var = Volt ampere reactive)
A	Ampere
deg	degrees (Phasenwinkel in Grad)
kV	Kilo Volt (1000V)
kVA	Kilo Volt Ampere (Scheinleistung S, zur Unterscheidung von kW = Wirkleistung))
kVar	Kilo Volt Ampere reactive (Blindleistung, Q)
MS	Mittelspannung
NS	Niederspannung
ONT	Ortsnetztransformator
p.u.	per unit (auf Nennwert und physikalische Einheit normierte Größe)
PV	Photovoltaik
W	Watt (Wirkleistung, P)

Literatur

- (1) Klaus Heuck, Klaus-Dieter Dettmann, Detlef Schulz: Elektrische Energieversorgung: Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie für Studium und Praxis, Vieweg+Teubner Verlag, 8. Auflage, 2010, ISBN 978-3834807366
- (2) Volker Quaschnig, Regenerative Energiesysteme; Technologie - Berechnung – Klimaschutz; Carl Hanser Verlag München, 10. Aktualisierte und erweiterte Auflage, 2019, ISBN 978-3-446-46113-0
- (3) Christian Seynowldt, Dezentrale Energieversorgung mit regenerativen Energien, Technik, Märkte, kommunale Perspektiven, 2. Auflage, 2021, Springer, 978-3-658-33733-9, <https://doi.org/10.1007/978-3-658-33733-9>
- (4) Günther Brauner, Systemeffizienz bei regenerativer Stromerzeugung; Strategien für effiziente Energieversorgung bis 2050; Springer, 2019, ISBN 978-3-658-24854-3
- (5) Michael Sterner und Ingo Stadler, Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration; Springer, 2. Auflage, 2017, ISBN 978-3-662-48893-5
- (6) Adolf J. Schwab, Elektroenergiesysteme: Smarte Stromversorgung im Zeitalter der Energiewende, Springer Vieweg; 6. Auflage, 2020, ISBN: 978-3662603734

Quellen aus dem Web

- (7) Schlussbericht BMU - FKZ 03MAP146: Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global, 2012, im Web publiziert
- (8) BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V: BDEW-Roadmap - Realistische Schritte zur Umsetzung von Smart Grids in Deutschland, 2013, im Web publiziert
- (9) International Energy Agency (IEA), World Energy Outlook 2019,
<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019/electricity#outlook-by-scenario>
<https://www.iea.org/regions>
- (10) International Renewable Energy Agency (IRENA), Global Energy Transformation: A Roadmap to 20250 (Ausgabe 2018),
https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Apr/IRENA_Report_GET_2018.pdf
- (11) ONLOAD, 07/2020 Das Reinhausen Magazin, siehe <https://onload.reinhausen.com/de/07-2020/wandel-im-stromnetz/> und <https://onload.reinhausen.com/de/07-2020/die-netze-der-zukunft/>
- (12) Bundesnetzagentur, SMARD Strommarktdaten, aktueller Stand aller Erzeuger und Verbraucher im deutschen Stromnetz mit Marktvisualisierung, Web: www.smard.de
- (13) Umweltbundesamt, Erneuerbare Energien in Zahlen, März 2020, Web:
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#uberblick>
- (14) AGEB 2018: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen zum Primärenergiebedarf 2018, https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ageb_pressedienst_05_2018.pdf
- (15) Bundesnetzagentur: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerksliste/kraftwerksliste-node.html
- (16) World Steel Association (2020): Steel Statistical Yearbook 2020 & World Steel in Figures 2020; <https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/steel-statistical-yearbook.html>; <https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/World-Steel-in-Figures.html>

- (17) Portal der Statista GmbH: World reserves of iron ore as of 2019 and iron production, <https://www.statista.com/statistics/267381/world-reserves-of-iron-ore-by-country/>, und <https://www.statista.com/statistics/267380/iron-ore-mine-production-by-country/>
- (18) International Renewable Energy Agency (2019) Global energy transformation: A roadmap to 2050 (2019 edition), <https://www.irena.org/publications/2019/Apr/Global-energy-transformation-A-roadmap-to-2050-2019Edition>
- (19) Portal der Statista GmbH: Produktion von Zement nach den wichtigsten Ländern im Jahr 2020, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/153695/umfrage/produktion-von-zement-nach-laendern/>
- (20) ONLOAD, 09/2021 Das Reinhausen Magazin, siehe <https://onload.reinhausen.com/de/06-2021/kampf-dem-klimakiller/>
- (21) BDEW, Primärenergieverbrauch in Deutschland nach Energieträgern 2020, Dezember 2020, <https://www.bdew.de/energie/primaerenergieverbrauch-in-deutschland-nach-energetrae-gern-2020/>
- (22) Netzentwicklungsplan Strom 2023, Ausbau der Übertragungsnetze in Deutschland bis zum Jahr 2037/2045, Übersicht, https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/2023-12/NEP%20kompakt_2037_2045_V2023_2E.pdf
- (23) Günther Brauner. Energiesysteme: regenerativ und dezentral: Strategien für die Energiewende, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016.
- (24) Martin Lödl und Georg Kerber. 11. Symposium Energieinnovation – Alte Ziele, Neue Wege: Abschätzung des Photovoltaik-Potentials auf Dachflächen in Deutschland, Web, <https://mediatum.ub.tum.de/doc/%20969497/969497.pdf>
- (25) J. Quentin, „Fachagentur Windenergie an Land - Überblick Windenergie an Land: Anlagenhöhe, Flächenbedarf, Turbinenzahl,“ 03 2019; Web: https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Veroeffentlichungen/Faktenpapiere/FA_Wind_Hoehenbegrenzungen_Wind-an-Land_03-2019.pdf
- (26) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Strommarkt der Zukunft, Web: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/strommarkt-der-zukunft.html>
- (27) E. Leitner, U. Finkich, Internetportal LEIFIPhysik: <https://www.leifiphysik.de/waermelehre/wetter-und-klima/grundwissen/strahlungshaushalt-der-erde>
- (28) Volker Quaschnig, So geht Klimaschutz: 100% Erneuerbare Energien bis spätestens 2040, gekürzter Auszug aus dem Fachbuch Erneuerbare Energien und Klimaschutz: <https://www.volker-quaschnig.de/artikel/Szenario2050/index.php>
- (29) Wikipedia, Wasserkreislauf, <https://de.wikipedia.org/wiki/Wasserkreislauf>
- (30) Jürgen Paeger, Web-Seite Ökosystem Erde, <https://www.oekosystem-erde.de/html/kohlenstoff-kreislauf.html>; Hintergrundbild Earth Observatory der NASA, <https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle>
- (31) International Renewable Energy Agency (IRENA), World Energy Transition Outlook 2022, IRENA WETO 2022 , <https://irena.org/publications/2022/Mar/World-Energy-Transitions-Outlook-2022>
- (32) Stromgestehungskosten erneuerbarer Energien, Christoph Kost, Studie des Fraunhofer ISE, Juni 2021, <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/studie-stromgestehungskosten-erneuerbare-energien.html>
- (33) Netzengpassmanagement, Bericht der Bundesnetzagentur, 2023, https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Engpassmanagement/Quartalszahlen-

[Q1in2023.pdf?_blob=publicationFile&v=1#:~:text=Die%20vorläufigen%20Einsatzkosten%20für%20Redispatchmaßnahmen,um%20rund%2026%20Prozent%20gesunken.](#)

(34) ...