

1 Einleitung

Die Herausforderung, die eine wachsende Weltbevölkerung stellt, kann nur durch ein nachhaltiges Gesamtkonzept der Energieversorgung gelöst werden [18], [50]. Der global steigende Energiebedarf, insbesondere durch Schwellenländer wie China, spielt hierbei eine entscheidende Rolle. Hinzu kommen weitere Faktoren, die die Energiepreise und Energieverfügbarkeit beeinflussen [2], [93]. Energie muss verlässlich verfügbar sein, bei möglichst niedrigen Kosten [78]. Bei der Stromversorgung ist die Nachfrage instantan zu erfüllen, wobei kurze Unterbrechungen in der Industrie zu erheblichen Auswirkungen führen können (beispielsweise Unterbrechung von Fertigungsprozessen). Insbesondere in einem rohstoffarmen Industrieland, wie Deutschland, ist die sichere Energieversorgung ein kritischer Faktor. Hinzu kommt der Klimawandel und die damit verbundenen Maßnahmen zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen, die eine globale Herausforderung sind. Die Ziele der Bundesregierung zur Energiewende sind in Tabelle 1.1 dargestellt. Zusätzlich enthält die Tabelle die in 2014 erreichten Werte.

	2014	2020	2030	2040	2050
Treibhausgasemissionen (Basis 1990)	- 23,7 %*	- 40 %	- 55 %	- 70 %	- 80-90 %
Primärenergieverbrauch (Basis 2008)	- 9,1 %	- 20 %	—	—	- 50 %
Bruttostromverbrauch (Basis 2008)	- 6,4 %	- 10 %	—	—	- 25 %
Anteil Erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch	27,3 %	≥ 35 %	≥ 50 %	≥ 65 %	≥ 80 %
Anzahl Elektrofahrzeuge	ca. 19 000	1 Mio.	6 Mio.	—	—

Tabelle 1.1: Ziele zur Energiewende und Werte für 2014 (—: keine Angabe, *: Wert 2013, Wert 2014 nicht verfügbar) [1], [2], [6], [9]

Die Erneuerbaren Energien können einen Beitrag zur Energieversorgung leisten, und tun dies bereits. Ein weiterer Ausbau bringt Fragen bezüglich der Netzstabilität und der Energiespeicherung mit sich. Die Netzsicherheit muss gegeben sein und ist ein hohes Gut, welches schwer monetär zu bewerten ist. In diesem Kontext wird der Einsatz von Energiespeichertechnologien unumgänglich sein.

1.1 Energiebedarf in Deutschland

Der folgende Abschnitt gibt einen kurzen Überblick über den Energiebedarf in Deutschland, sowie die Verteilung auf Energieträger und Sektoren. Die Abbildung 1.1 zeigt die Aufteilung des Primärenergieverbrauchs für 2014.

Primärenergieverbrauch in Deutschland 2014 (13 076 PJ)

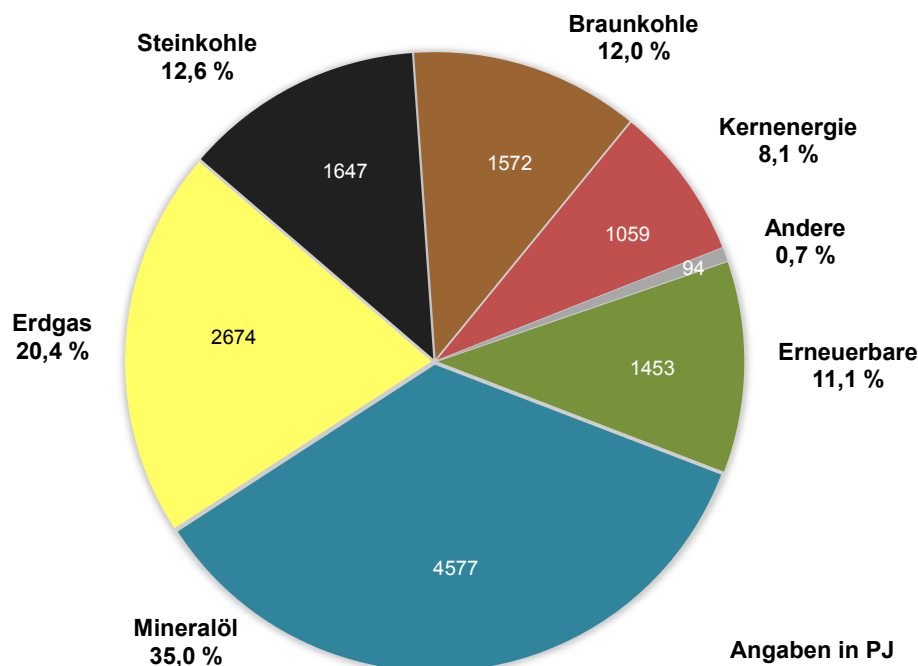


Abbildung 1.1: Primärenergieverbrauch in Deutschland 2014 [2]

Mineralöl macht mit 35 % den größten Anteil am Primärenergieverbrauch aus, Erdgas den zweitgrößten Anteil mit etwa 20 %. Daraus wird der Einfluss der Sektoren Wärme und Mobilität ersichtlich. Bei isolierter Betrachtung der Bruttostromerzeugung ergibt sich ein anderes Bild (vgl. Abschnitt 1.1). Jedoch ist bereits am Primärenergieverbrauch der signifikante Anteil der Erneuerbaren Energien zu sehen. Am Primärenergieverbrauch machen die Erneuerbaren Energien bereits 11,1 % aus.

Elektrische Energie

Die Energiewende verfolgt das Ziel, den Anteil Erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch bis zum Jahr 2050 auf 80 % auszubauen. Dabei werden dargebotsabhängige Tech-

nologien wie Wind und Photovoltaik neben der Biomasse den größten Beitrag leisten [51]. Wind und Photovoltaik sind volatile Energieträger, deren Energieerzeugung Wetter- und zeitlichen Einflüssen unterliegt. Dies wird künftig vermehrt die Frage nach Speichermöglichkeiten und geeigneten Speichertechnologien aufwerfen [121]. Die Wasserkraft hat den kleinsten Anteil mit 3,3% und ist seit Jahren auf einem konstanten Niveau. Die Potentiale der Wasserkraft in Deutschland sind weitgehend ausgebaut [113]. In Abbildung 1.2 ist die Verteilung der Bruttostromerzeugung für 2014 dargestellt. Die Tabelle 1.2 zeigt die Ent-

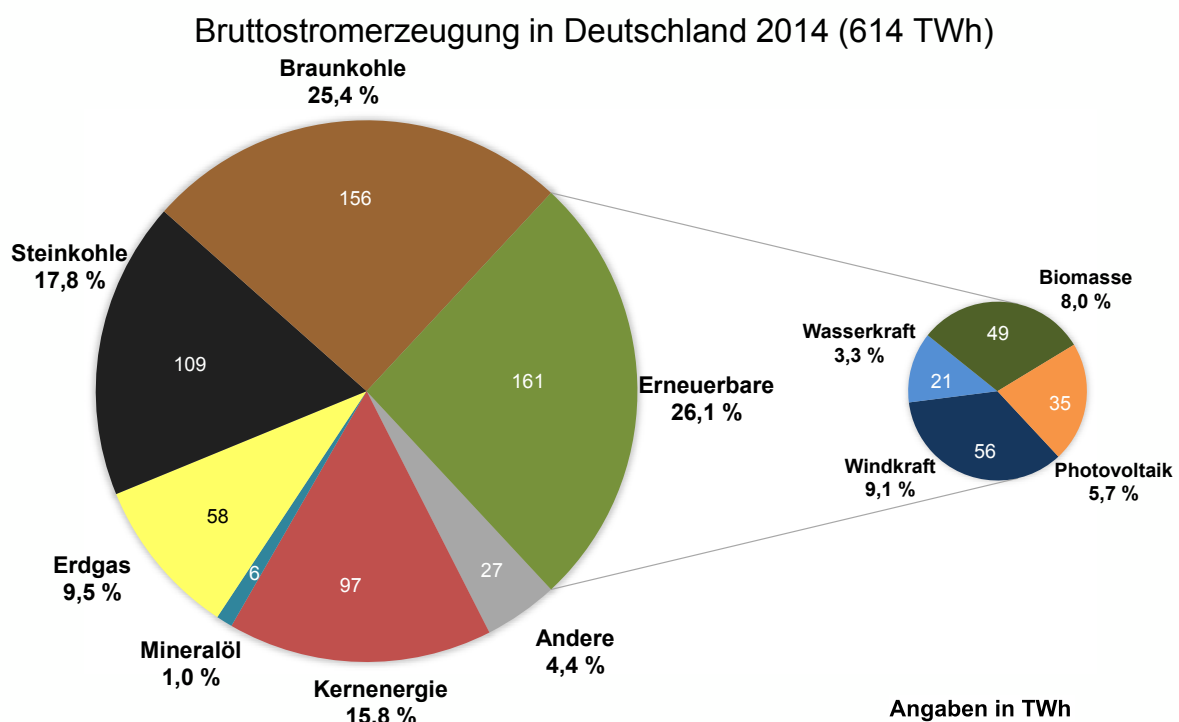


Abbildung 1.2: Bruttostromerzeugung in Deutschland 2014 [2]

wicklung in der Bruttostromerzeugung. Zu erkennen ist, dass der Beitrag der Erneuerbaren Energien absolut, wie auch relativ, steigt. Der Anteil der Kernkraft ist konstant, wobei dieser bis 2022 sukzessive auf Null reduziert werden soll. Bei Erdgas und Steinkohle zeigt sich ein Rückgang. Dies ist durch die erhöhte und zu bevorzugende Einspeisung der Erneuerbaren Energien zu erklären. Diese stellt bereits die Wirtschaftlichkeit bestehender Kraftwerke in Frage und hat zudem Einfluss auf Investitionsentscheidungen [59]. In 2014 ist der milde Winter ein Einflussfaktor gewesen.



	2012		2013		2014	
	TWh	%	TWh	%	TWh	%
Braunkohle	160,7	25,5	160,9	25,4	155,8	25,4
Steinkohle	116,4	18,5	121,7	19,2	109,0	17,8
Erdgas	76,4	12,1	67,5	10,7	58,3	9,5
Mineralöl	7,6	1,2	7,2	1,1	6,0	1,0
Kernenergie	99,5	15,8	97,3	15,4	97,1	15,8
Andere	25,7	4,1	26,2	4,1	27,2	4,3
Erneuerbare	143,8	22,8	152,4	24,1	160,6	26,2
Gesamt	630,1	100,0	633,2	100,0	614,0	100,0

Tabelle 1.2: Bruttostromerzeugung in Deutschland (2012-2014) [6]

Wärme

In Tabelle 1.3 ist der Endenergieverbrauch für den Wärme- und Mobilitätssektor dargestellt. Für 2009 ist der Einbruch des Endenergieverbrauchs mit der globalen Wirtschaftskrise zu erklären. Hieraus wird ersichtlich, dass für den Wärmebedarf in 2013 etwa 55,7 % der Endenergie aufgebracht wurden. Im Rahmen einer nachhaltigen Energieversorgung ist hierbei der Bedarf an Energie im Wärmesektor miteinzubeziehen. Hier bieten sich insbesondere Betrachtungen zur Prozesswärme in dezentralen Energieerzeugungsanlagen wie BHKWs und Brennstoffzellensystemen an [97]. Dieser Ansatz ist im Rahmen einer stofflichen Energiespeicherung von Bedeutung, da die geringen elektrischen Wirkungsgrade durch die Nutzung von Prozesswärme aus Systemsicht anders zu bewerten sind.

Mobilität

Auf den Sektor Mobilität entfielen im Jahr 2013 etwa 28,1 % des Endenergieverbrauchs (vgl. Tabelle 1.3). Dabei beruhen 93,8 % des Endenergieverbrauchs auf Mineralöl als Energieträger. Der größte Anteil im Sektor Mobilität entfällt auf den Individualverkehr [2].

	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Wärme*	5 110	4 747	5 273	4 820	4 849	5 166
Mobilitätssektor	2 571	2 541	2 559	2 568	2 559	2 612
Gesamt	9 159	8 665	9 310	8 881	8 919	9 269

Tabelle 1.3: Endenergieverbrauch ausgewählter Sektoren (2008-2013) (Angaben in PJ, *: Raumwärme, Warmwasser, sonstige Prozesswärme) [2]



Ernährungs- und Landwirtschaft

Für ein ganzheitliches Energiekonzept sollte der Sektor Ernährungs- und Landwirtschaft ebenfalls miteinbezogen werden. Denn hierbei gibt es durchaus Überschneidungen zu anderen Bereichen. Zum einen wird durch die Landwirtschaft, insbesondere durch die Haltung von Nutztieren, ein nicht zu vernachlässigender Teil Treibhausgase emittiert (Tabelle 1.4). Weitere Überschneidungspunkte werden im Abschnitt 1.3 unter Biomasse und Flächennutzung sowie im Abschnitt 1.4 detailliert genannt.

Das Verbraucherbewusstsein ist neben einem energieeffizienten Verhalten bei Elektrizität, Wärme und auch Mobilität auf den Bereich der Ernährungs- und Landwirtschaft auszudehnen. Weitere Punkte sind hierbei der Energieeinsatz zum Transport, der Wasserbedarf sowie der Umgang mit Abfallstoffen. Hier bietet sich die Zuführung zur energetischen Nutzung an.

1.2 Treibhausgasemissionen

Das Ziel der Energiewende ist es bis 2020 den Ausstoß der Treibhausgase um 40 % zu reduzieren. Eine exponentielle Interpolation lässt dabei eine Reduzierung auf etwa 67 % des Basiswerts erwarten. Bei den Treibhausgasemissionen ist ein domänenübergreifender Ansatz, spätestens bei den Zielen in 2050, zu wählen. Bei den Emittenten ist nicht nur die Elektrizitätswirtschaft, sondern es sind auch die Sektoren Wärme, Mobilität sowie Ernährungs- und Landwirtschaft miteinzubeziehen.

Die bedeutendsten CO₂-äquivalenten Treibhausgasemissionen sind in Tabelle 1.4 dargestellt. Dabei macht für das Jahr 2012 die Verbrennung fossiler Energieträger in der Energiewirtschaft etwa 39 % aus. Auf den Verkehrssektor entfällt ein Anteil von etwa 17 %. In den Bereichen Verkehr und Landwirtschaft sind nahezu konstante Werte in den vergangenen Jahren vorhanden. Für die Energiewirtschaft ist eine fallende Tendenz zu erkennen. Die Wirtschaftskrise 2009 ist deutlich zu erkennen, zudem ist für 2012 wieder ein Anstieg der Emissionen vorhanden. Dies hängt mit dem steigenden Anteil der Kohle, insbesondere Braunkohle, am Primärenergieverbrauch, bei gleichzeitig sinkenden Anteilen von Erdgas und besonders der Kernenergie, zusammen. Dies kann nicht durch den Anstieg der Erneuerbaren Energien kompensiert werden. Des Weiteren hat seit 2011 eine Zunahme der anteiligen Stromerzeugung aus Braunkohle stattgefunden. Dies ist durch den beginnenden Ausstieg aus der Kernenergie zu erklären. Kernkraftwerke (KKW) gehören zu Grundlastkraftwerken, weitere klassische Grundlastkraftwerke sind Braunkohlekraftwerke. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass deren Ausstoß an CO₂ pro kWh etwa dreimal so hoch ist wie der von Steinkohlekraftwerken.

	2008	2009	2010	2011	2012
Energiewirtschaft	369	344	357	354	365
Mobilitätssektor	155	154	155	157	155
Landwirtschaft	72	70	68	70	69
Gesamt	972	908	942	925	936

Tabelle 1.4: Treibhausgasemissionen ausgewählter Sektoren (2008-2012) (Angaben in Mt CO₂-Äquivalent) [2]

Wird das Elektrofahrzeug als Möglichkeit zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes genutzt, ist dabei die Quelle der elektrischen Energie von wesentlicher Bedeutung. Betrachtet man die Zahlen für 2014 mit einer Bruttostromerzeugung von 614 TWh und einem CO₂-Ausstoß der Energiewirtschaft von 360 Mt [2] ergibt sich ein CO₂-Ausstoß des deutschen Energiemix von etwa 586 g/kWh. Bei einem durchschnittlichen Stromverbrauch eines Mittelklasse PKW von 14,8 kWh/100 km (vgl. Abschnitt 6.3.2), entspricht dies etwa einem CO₂-Ausstoß von 87 g/km. Dieser Wert entspricht in etwa dem einer vergleichbaren Dieselvariante des Mittelklasse PKW [33]. Bei der Annahme der vollständigen Nutzung von elektrischer Energie aus Braunkohle mit einem CO₂-Ausstoß von etwa 1 100 g/kWh hätte das Elektrofahrzeug eine CO₂-Ausstoß von 160 g/km. Hieraus ist ersichtlich, dass der Ursprung der verwendeten Energie in der Elektromobilität einen entscheidenden Einfluss bezüglich der Klimaverträglichkeit hat.

1.3 Detaillierte Betrachtung der Erneuerbaren Energien

Windenergie

Die Windenergie leistet heute bereits einen erheblichen Beitrag unter den Erneuerbaren Energien in Deutschland. Anzumerken ist jedoch, dass sich Windenergieanlagen (WEA) nicht zwangsläufig harmonisch in urbane Gebiete oder Naturlandschaften integrieren lassen. Zum einen haben die großen WEA mit Nennleistungen von 5 MW bereits Nabenhöhen von über 100 m. Zudem entstehen weitere Einflüsse durch die Rotation der Flügelblätter, wie Vibrationen, Geräusche und Schattenwurf. Dies ist für ein nachhaltiges Energiekonzept, bei dem der Naturnutzen ganzheitlich zu sehen ist, zu berücksichtigen.

Bei der Windenergie ist zwischen On- und Off-Shore-Anlagen zu differenzieren. Dabei liegen die zu erwartenden Volllaststunden in den Größenordnungen von 2 000 h/a (On-Shore) und etwa 4 000 h/a (Off-Shore) [113]. Dabei ist jedoch zu beachten, dass der Bau und die Wartung auf See mit erhöhtem Aufwand verbunden sind. Weiterhin hat sich gezeigt, dass der Netzanschluss ebenfalls nicht unkritisch ist.



Photovoltaik

Die Energieerzeugung durch Photovoltaikanlagen unterliegt saisonalen und tageszyklischen Schwankungen. Dabei ist in Deutschland mit Volllaststunden im Bereich von etwa 1 000 h/a zu rechnen [113]. Die Photovoltaik ist etabliert und lässt sich relativ beliebig in ihrer Größe skalieren. Es besteht die Möglichkeit, PV-Module direkt in Gebäudefassaden zu integrieren.

Biomasse

Unter den Begriff Biomasse fällt eine Vielzahl von Energieträgern, wie auch Verfahren zur Energieerzeugung. Biogas, aber auch die Erzeugung von Biokraftstoffen (Biodiesel oder Bioethanol zur Kraftstoffbeimischung) zählen dazu. Des Weiteren Holz und der biogene Anteil des Hausmülls, der etwa 1 % der Bruttostromerzeugung ausmacht.

Bei Biogasanlagen ergeben sich Verwertungsmöglichkeiten für Bioabfälle als auch für gezielt angebaute Rohstoffpflanzen. Der weitaus größte Teil am massebezogenen Substrateinsatz in Biogasanlagen macht Maissilage mit etwa 75 % aus [13]. Mais eignet sich insbesondere, da dieser ohne Einhaltung einer Fruchtfolge angebaut werden kann.

Dabei unterliegt die Energieerzeugung aus Biomasse keiner Schwankung und kann gezielt gesteuert werden. Das eingesetzte Material ist dabei wie ein Brennstoff und kann zudem gelagert und damit gespeichert werden.

Wert- und Abfallstoffe

Bei der Betrachtung von Erneuerbaren Energiequellen sind zudem Rest- und Abfallstoffe zu berücksichtigen. Diese Stoffe sind zunächst grundsätzlich als Wertstoffe einzuordnen. Wertstoffe sollten in einem nachhaltigen Stoffkreislauf grundsätzlich recyclet werden. Dies ist oft jedoch nur begrenzt oder mit hohem Aufwand möglich. Ein Abfallstoff ist dabei ein Stoff bzw. Stoffmenge, aus dem kein Nutzen mehr gezogen werden kann zu entsorgen ist. Als Reststoff sind Produktions- bzw. Verarbeitungsreste anzusehen. Als Beispiel seien hier Sägespäne und Verschnitt der Holzindustrie genannt. Wertstoffe hingegen sind Stoffe, die weiterhin genutzt werden können, wie etwa PET-Flaschen. Diese sind recyclebar oder kommen im Rahmen einer thermischen Verwertung als Brennmaterial in Frage, wie die eben erwähnten Sägespäne. Daraus ist bereits ersichtlich, dass der Übergang vom Abfall zum Wertstoff fließend ist und immer von der jeweiligen Situation und den technologischen Möglichkeiten abhängig ist.

Wenn die Stoffe als Brennstoffe eingesetzt werden, dann bezeichnet man diese meist als Sekundärbrennstoffe. Eine Unterteilung in Kunststoff-, Holz- und Bioabfälle ist dabei zweckmäßig.

Kunststoffe haben im Mittel einen Heizwert von etwa 22 MJ/kg [72]. Generell sollte als erstes das Entstehen von Abfallstoffen vermieden werden, danach sollten diese, soweit sinnvoll

möglich, dem Recycling zugeführt werden. Als finale Option ist eine thermische Verwertung anzusehen.

Im Rahmen eines nachhaltigen Energiekonzeptes sollten dabei die biogenen wie konventionellen Abfallstoffe miteinbezogen werden. In Abschnitt 2.2.5 wird dabei auf diese als mögliche CO₂-Quellen im Rahmen einer stofflichen Speicherung weiter eingegangen.

Flächennutzung

Für ein nachhaltiges Gesamtkonzept sollten die Potentiale und Verwendungsmöglichkeiten von Flächen berücksichtigt werden. Dabei ist die Nutzungsart einer Agrarfläche zu bestimmen. Hierbei ist zu wählen, ob etwa Mais als Nahrungsmittel für Menschen, Futtermittel für Nutztiere oder Substrat für eine Biogasanlage angebaut wird. Im Jahr 2012 wurde in Deutschland auf knapp 15 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche Energiepflanzen angebaut [8].

Weiter sind Potentiale von Flächen zu beurteilen, um diese zweckmäßig einzusetzen. Etwa ist der Naturnutzen an einer Autobahn bereits eingeschränkt, daher ist dort die Errichtung einer WEA anders zu bewerten als in freier Natur, unter der Maßgabe vergleichbarer Windpotentiale [86].

Durch die weiterhin wachsende Weltbevölkerung steigt neben dem Bedarf an Energie auch der Bedarf an Nahrungsmitteln. Daher sind für eine energetische Nutzung Flächen, die landwirtschaftlich nicht genutzt werden können, in den Fokus zu rücken. Unter dieser Prämisse zeigt sich erneut die Eignung der Photovoltaik, insbesondere in urbanen Ballungszentren. In Tabelle 1.5 sind Angaben zur Flächennutzung in Deutschland für ausgewählte Flächenarten gegeben.

	2004		2008		2012	
	km ²	%	km ²	%	km ²	%
Landwirtschaftsflächen	189 324	53,0	187 646	52,5	186 465	52,2
Waldflächen	106 488	29,8	107 349	30,1	107 970	30,2
Grünanlagen	1 953	0,5	2 491	0,7	2 799	0,8
Siedlungs- und Verkehrsflächen*	43 668	12,2	44 646	12,5	45 426	12,7
Bodenfläche Gesamt	357 050	100,0	357 111	100,0	357 169	100,0

Tabelle 1.5: Ausgewählte Flächennutzung in Deutschland (2004, 2008, 2012) (*: Summe aus den Nutzungsarten: Gebäude- und Freiflächen, Betriebsflächen (ohne Abbauland), Erholungsflächen (ohne Grünanlagen), Verkehrsflächen und Friedhof) [6]



1.4 Gesetzliche und ethische Aspekte einer nachhaltigen Energieversorgung

Gesetzliche Einordnung des Speichereinsatzes

Eine umfassende gesetzliche Einordnung stellt ein komplexes Anliegen dar. Es gibt Tendenzen zur Steigerung des Eigenverbrauchs bei Photovoltaikanlagen unter dem Kontext der KfW-Förderung für Batterie-Solarstromspeicher. Allgemein ist zu erkennen, dass die Speicherthematik vermehrt in den Fokus der Betrachtung gerät und sicherlich zukünftig an Bedeutung gewinnen wird. Dies ist auch daran zu erkennen, dass sich große Energieversorger mit Speichertechnologien, explizit Batterietechnologien, beschäftigen [106].

Ethik im Umgang mit Energie und Ressourcen

In der nachhaltigen Energiewirtschaft sollten die angrenzenden Marktsektoren berücksichtigt werden. Im Rahmen der Globalisierung bildet der Markt einen entsprechenden Preis. So entstehen Getreidepreise global an Börsen. Daher sollte vermehrt bei der Biomasse als Erneuerbare Energie auf Sekundärmaterial wie Reststoffe, Abfälle und Grünschnitt gesetzt werden. Eine Preiskopplung zwischen Energie und Nahrungsmitteln ist zu vermeiden.

Daher sollte bei einer globalen Sichtweise auf den Klimaschutz und die Reduzierung der Treibhausgasemissionen im gleichen Zuge die Situation der Ernährungs- und Landwirtschaft in Schwellen- und Entwicklungsländern berücksichtigt werden. Insbesondere, da in diesen Ländern ein Großteil des Einkommens für die Nahrungsversorgung aufgebracht werden muss. Diese als „Tank-to-Teller“ bezeichnete Problematik ist bei einem nachhaltigen Konzept miteinzubeziehen.

Weiter sollte die Abregelung, und damit Nichterzeugung von Energie, beachtet werden. Die Abregelung Erneuerbarer Energien als Instrument der Netzregelung ist im Hinblick auf eine zweckmäßigen Verteilung und Speicherung weiterhin anzusetzen. Die finanzielle Vergütung bedarf dabei einer Evaluation.

Die vorzeitige Abschaltung, von nach allgemeinem technischen Kenntnisstand sicheren KKW, bei gleichzeitigem Fortbestand älterer Anlagen im angrenzenden Ausland (Belgien, Frankreich, Tschechien), ist nach technischen Aspekten schwer einzuordnen. Insbesondere bei Ersatz dieser Anlagen durch Kohlekraftwerke oder Energiebezug von KKW aus Nachbarstaaten wird ein nachhaltiges Energiekonzept konterkariert.

1.5 Analyse und Einordnung der Energiesituation in Deutschland

Die Entwicklungen im Energiesektor werden von stetigen Veränderungen geprägt. Dabei führen globale Ereignisse ebenfalls zu Einflüssen auf Energiepreise und Rohstoffverfügbarkeiten in Deutschland (Fukushima, Ukraine Krise, Fracking-Boom USA). Aber auch die nationalen Ziele der Energiewende und der Ausstieg aus der Kernenergie bis 2022 führen zu Veränderungen. Dies ist im Zusammenhang mit dem Klimaschutz und der globalen Reduzierung der Treibhausgasemissionen einzuordnen. Die Rahmenbedingungen einer sicheren Energieversorgung dürfen dabei nicht außer Acht gelassen werden.

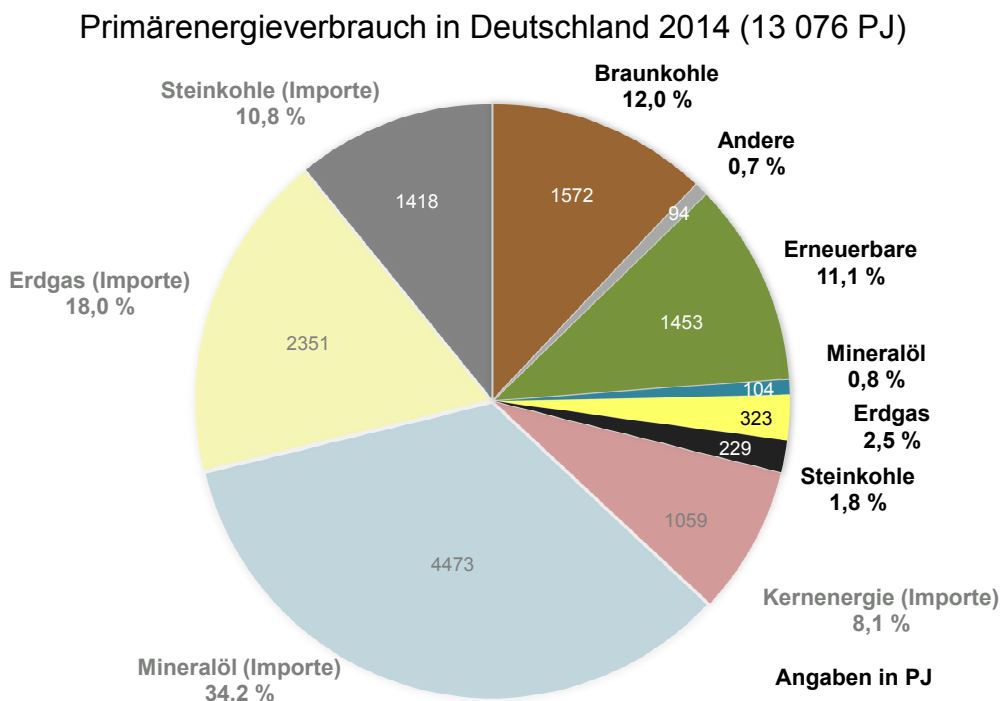


Abbildung 1.3: Primärenergieverbrauch in Deutschland 2014 (Importe) [2]

In Abbildung 1.3 ist für 2014 der Primärenergieverbrauch aufgezeigt, wobei jetzt die Energieimporte herausgestellt sind. Dies zeigt, dass etwa 71,1 % des Primärenergieverbrauchs von importierten Energieträgern abhängig ist. Hierbei machen die Importe von Mineralöl und Erdgas etwa die Hälfte des Primärenergieverbrauchs aus (Sektoren Wärme und Mobilität). Die Braunkohle weist dabei zwei Facetten auf. Zum einen ist der CO₂-Ausstoß pro kWh mit Abstand am größten. Andererseits ist Braunkohle ein in Deutschland