

VOLKER QUASCHNING

# SEKTORKOPPLUNG DURCH DIE ENERGIEWENDE

Anforderungen an den Ausbau erneuerbarer Energien zum Erreichen der Pariser Klimaschutzziele unter Berücksichtigung der Sektorkopplung



Hochschule für Technik  
und Wirtschaft Berlin

University of Applied Sciences

## **Sektorkopplung durch die Energiewende**

Anforderungen an den Ausbau erneuerbarer Energien zum Erreichen der Pariser Klimaschutzziele unter Berücksichtigung der Sektorkopplung

### **Autor**

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Quaschnig



**Hochschule für Technik  
und Wirtschaft Berlin**

University of Applied Sciences

Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Berlin  
Fachbereich 1 – Ingenieurwissenschaften Energie und Information  
Forschungsgruppe Solarspeichersysteme  
Wilhelminenhofstr. 75a  
12459 Berlin

### **Veröffentlichung**

20.06.2016

### **Danksagung**

Ein besonderer Dank geht an alle Kollegen für die Unterstützung, Anregungen und Verbesserungsvorschläge beim Erstellen der Studie, insbesondere an:  
Prof. Dr. Jens Fortmann, Prof. Dr. Friedrich Sick, M.Sc. Johannes Weniger,  
B.Sc. David Beier, M.Sc. Joseph Bergner, M.Sc. Tjarko Tjaden

### **Webseite**

<http://pvspeicher.htw-berlin.de>  
[www.volker-quaschnig.de](http://www.volker-quaschnig.de)

## KURZFASSUNG

---

Beim Pariser Klimagipfel wurde beschlossen, die globale Erwärmung möglichst auf 1,5 °C zu begrenzen, um die Folgen des Klimawandels noch in einem vertretbaren Ausmaß zu halten. Dazu ist eine Reduktion des energiebedingten Kohlendioxid-Ausstoßes gegen 2040 auf null erforderlich. Danach darf kein fossiles Erdgas, Erdöl und keine Kohle mehr genutzt werden oder das zu viel emittierte Kohlendioxid muss mit aufwändigen und kostenintensiven CCS-Verfahren wieder der Atmosphäre entzogen und endgelagert werden. Die Energieversorgung in den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr sollte daher bis 2040 vollständig mit erneuerbaren Energien gedeckt werden.

Die Potenziale für Biomasse, Geothermie und Solarthermie sind in Deutschland begrenzt. Darum muss der wesentliche Anteil der künftigen Energieversorgung durch Strom aus Windkraft und Photovoltaikanlagen gedeckt werden. Bei gleichbleibenden Verhaltens- und Konsummustern steigt dadurch der Stromverbrauch von derzeit rund 600 TWh auf gut 1300 TWh an. Voraussetzung sind ambitionierte Effizienzmaßnahmen. Der motorisierte Straßenverkehr muss fast vollständig elektrifiziert werden. Gegen 2025 müssen dafür die Produktion von Fahrzeugen mit Benzin- und Dieselmotoren eingestellt und für den Güterverkehr wichtige Fernstraßen mit Oberleitungen versehen werden. Im Wärmebereich dürfen ab dem Jahr 2020 keine neuen Gas- oder Ölheizungen sowie KWK-Anlagen installiert werden. Aus Effizienzgründen wird künftig der überwiegende Anteil der Raumwärme durch Wärmepumpen gedeckt.

Werden die Effizienzmaßnahmen nicht umgesetzt, steigt der Strombedarf auf bis zu 3000 TWh an. Diese Strommenge in absehbarer Zeit klimaneutral zu decken ist unrealistisch. Selbst für einen Strombedarf von 1300 TWh muss das Ausbautempo von Solar- und Windkraftanlagen deutlich steigen. Bei der Onshore-Windkraft liegt der empfohlene jährliche Nettozubau bei 6,3 GW, bei der Offshore-Windkraft bei 3 GW und bei der Photovoltaik bei 15 GW. Zur kosteneffizienten Integration dieser erneuerbaren Kraftwerksleistungen muss ein Kohleausstieg bis spätestens 2030 erfolgen.

Mit den heutigen Zielvorgaben aus dem Erneuerbare-Energien-Gesetz besteht keinerlei Möglichkeit, die Pariser Klimaschutzziele zu erreichen. Das ist den politischen Verantwortlichen entweder nicht bewusst oder sie nehmen ein Verletzen der Klimaschutzwahlpflichtungen bewusst in Kauf oder setzen auf eine nachträgliche Korrektur durch CCS-Technologien. Da keine dieser Optionen gesellschaftlich tragbar ist, sind schnelle und einschneidende Korrekturen der Energiepolitik dringend erforderlich.

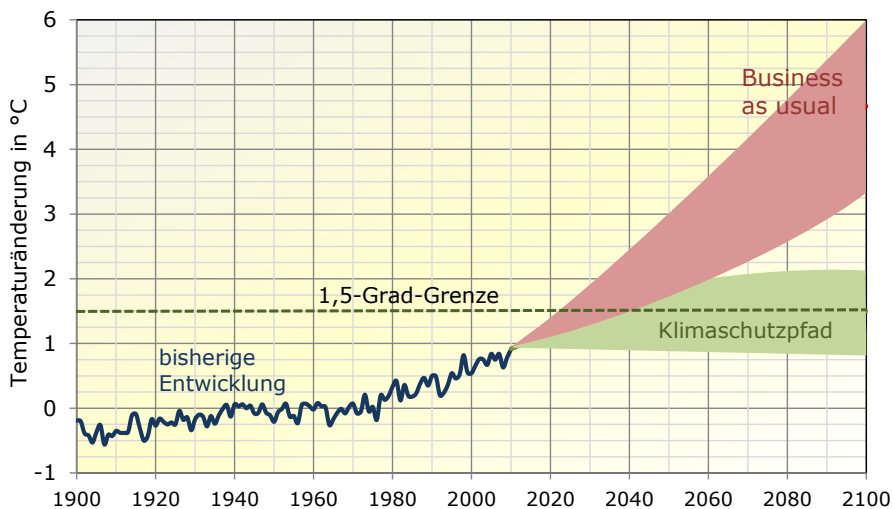
# INHALTSVERZEICHNIS

---

<b>Kurzfassung.....</b>	<b>3</b>
<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>3</b>
<b>1 Anforderungen an eine klimaverträgliche Energieversorgung.....</b>	<b>5</b>
<b>2 Klimaschutz nur durch sektorübergreifende Energiewende .....</b>	<b>8</b>
<b>3 Energiewende im Wärmesektor .....</b>	<b>11</b>
3.1 Raumwärme und Warmwasser .....	11
3.2 Prozesswärme für Industrie und GHD .....	17
<b>4 Energiewende im Verkehrssektor.....</b>	<b>20</b>
<b>5 Auswirkungen der Sektorkopplung auf den Elektrizitätsbereich .....</b>	<b>26</b>
<b>6 Schlussfolgerungen.....</b>	<b>34</b>
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>35</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>36</b>

# 1 ANFORDERUNGEN AN EINE KLIMAVERTRÄGLICHE ENERGIEVERSORGUNG

Im Dezember 2015 wurde unter Beteiligung der deutschen Bundesregierung auf dem **UN-Klimagipfel in Paris** ein **völkerrechtlich bindendes Abkommen** erfolgreich verhandelt, dessen Ziel eine **Begrenzung der globalen Erwärmung auf 1,5 °C** ist. Ohne eine radikale Reduzierung der Nutzung fossiler Brennstoffe und dem damit verbundenen Ausstoß von Treibhausgasen erwarten Klimaforscher vom IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) einen Anstieg der weltweit mittleren Temperatur um bis zu 5 °C bis zum Jahr 2100 [IPC13]. Als Folge würden die Meeresspiegel langfristig um viele Meter steigen und hunderte Millionen Menschen zu Klimaflüchtlingen machen. Das würde das Ausmaß der heutigen Flüchtlingszahlen deutlich in den Schatten stellen.



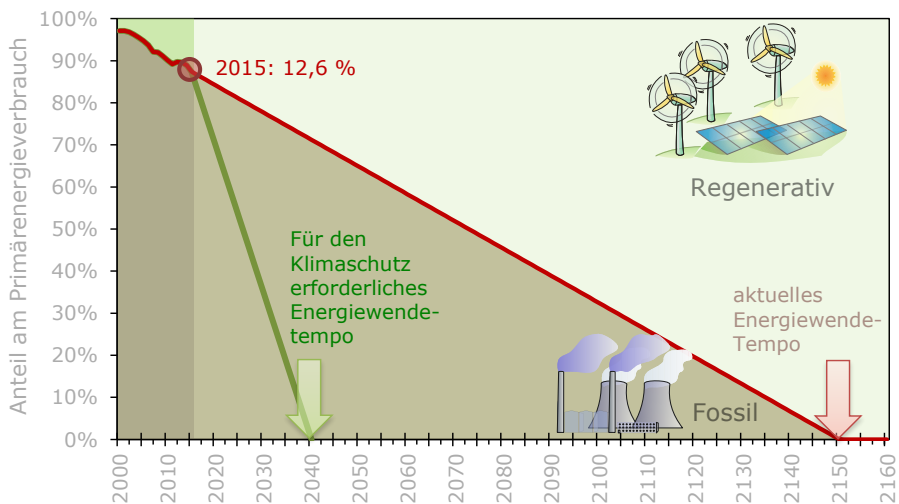
**Bild 1** Bisherige Entwicklung der globalen Temperatur sowie zwei verschiedene künftige Entwicklungspfade

Die **aktuellen politischen Zielvorgaben** zur Reduktion der Treibhausgasemissionen in Deutschland um 80 bis 95 % bis zum Jahr 2050 wurden **noch mit dem Ziel der**

**Stabilisierung der globalen Erwärmung auf 2 °C** erstellt [BmUB16]. Für das schärfere Reduktionsziel von 1,5 °C **müssten diese Zielvorgaben** dringend **angepasst werden**, was bislang aber nicht erfolgt und derzeit auch nicht geplant ist.

Der bisherige Temperaturanstieg gegenüber der vorindustrialisierten Zeit beträgt rund 1 °C. Bild 1 zeigt, dass eine Stabilisierung des Temperaturanstiegs auf 1,5 °C bereits um das Jahr 2040 erfolgen muss. Das bedeutet aber auch, dass danach keine Treibhausgasemissionen aus der Nutzung fossiler Energieträger mehr anfallen dürfen.

Ansonsten müsste das zu viel emittierte Kohlendioxid der Atmosphäre durch sogenannte CCS-Verfahren (Carbon Dioxide Capture und Storage) wieder entzogen und sicher endgelagert werden. CCS-Verfahren sind allerdings umstritten und sehr kostenintensiv. Da in Deutschland der Einsatz dieser Verfahren politisch kaum durchsetzbar und auch wirtschaftlich wenig sinnvoll ist, sollte hier das Einhalten des 1,5 °C-Limits auch ohne nachträglichen Entzug von Kohlendioxid aus der Atmosphäre angestrebt werden. Dafür sollte eine **Energieversorgung, die vollständig auf erneuerbaren Energien** basiert und kein Kohlendioxid mehr emittiert, spätestens **bis 2040** anvisiert werden. Das bedeutet aber nicht weniger als das komplette Ende der Nutzung von Kohle, Erdöl und Erdgas bis zum Jahr 2040. Andere Studien halten sogar eine vollständige Dekarbonisierung noch deutlich vor dem Jahr 2040 für erforderlich, um das 1,5-Grad-Limit mit einer höheren Wahrscheinlichkeit einzuhalten [Gre16].



**Bild 2** Bisherige Entwicklung des Anteils erneuerbarer Energien am Primärenergieverbrauch über alle Sektoren sowie Fortschreibung des aktuellen Energiewendetempos und Erfordernisse für den Klimaschutz

Bislang hat sich die deutsche Politik zwar eindeutig zu dem Pariser Klimaschutzabkommen und damit auch der Begrenzung des globalen Temperaturanstiegs auf 1,5 °C bekannt, aber nicht einmal ansatzweise die nötigen Schritte veranlasst, um dieses Ziel auch zu erreichen. Im Jahr 2015 betrug der Anteil regenerativer Energien am Primärenergieverbrauch in Deutschland, der alle Sektoren umfasst, gerade einmal 12,6 %. Das bedeutet, es fehlen noch über 87 % für eine erfolgreiche Energiewende. Wird das mittlere Ausbautempo erneuerbarer Energien von den Jahren 2000 bis 2015 weiter fortgesetzt, dauert die deutsche Energiewende noch weit über 100 Jahre. Um den Pariser Klimaschutzverpflichtungen gerecht zu werden, muss das derzeitige Tempo der Energiewende und damit der **Umstieg auf erneuerbare Energien um den Faktor vier bis fünf gesteigert** werden. Die Reduktion des Photovoltaikzubaues der letzten Jahre und die aktuellen politischen Planungen, den Windenergieausbau zu verlangsamen, laufen damit den Klimaschutzbekenntnissen diametral entgegen. Vielmehr ist ein baldiger Ausstieg aus der Kohleverstromung anzustreben. Das Jahr 2030 könnte dabei ein Kompromiss aus Klimaschutzanforderungen und der Machbarkeit struktureller gesellschaftlicher Veränderungen darstellen.

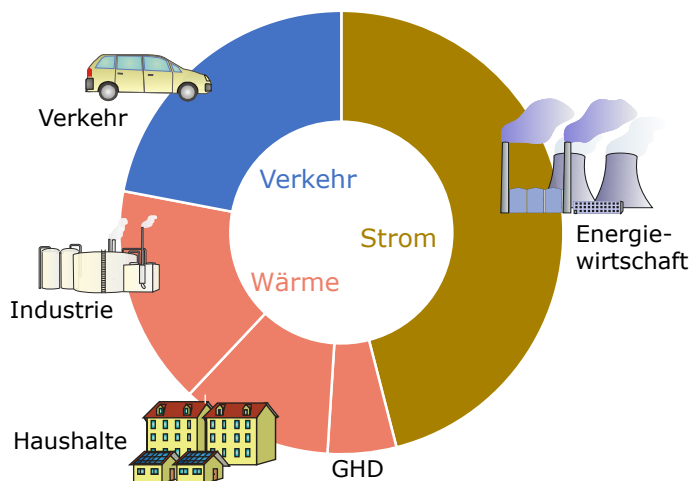
### Zusammenfassung der Kernaussagen von Kapitel 1

- Mit dem Klimagipfel von Paris im Dezember 2015 wurde der Grundstein für eine Stabilisierung des globalen Temperaturanstiegs auf 1,5 °C gelegt.
- Um in Deutschland die zugesagte 1,5 °C-Klimaschutzverpflichtung auch ohne umstrittene und kostenintensive CCS-Verfahren (Carbon Dioxide Capture and Storage) zu erreichen, sollte spätestens ab dem Jahr 2040 kein Kohlendioxid mehr aus der Nutzung fossiler Energieträger emittiert werden.
- Eine erfolgreiche Energiewende bedingt daher den Ausstieg aus der Nutzung aller fossilen Energieträger wie Kohle, Erdöl und Erdgas spätestens bis zum Jahr 2040.
- Ein Weiterbetrieb von Kohlekraftwerken bis zum Jahr 2040 oder darüber hinaus ist mit den Klimaszutzzielen nicht vereinbar. Ein Kohleausstieg bis 2030 stellt einen sinnvollen Kompromiss dar.
- Um dieses Ziel zu erreichen, muss das Ausbautempo erneuerbarer Energien um den Faktor vier bis fünf gesteigert werden.
- Eine Reduktion des Ausbaus erneuerbarer Energien widerspricht diametral jeglichen Klimaschutzbekenntnissen.

## 2 KLIMASCHUTZ NUR DURCH SEKTORÜBERGREIFENDE ENERGIEWENDE

Im Jahr 2014 betrug die deutschen Treibhausgasemissionen 902 Mt umgerechnet in Kohlendioxid-Äquivalente. 87,9 % davon entfielen direkt auf das Treibhausgas Kohlendioxid [UBA16a]. Die energiebedingten Treibhausgasemissionen betrug im gleichen Jahr 752 Mt umgerechnet in Kohlendioxid-Äquivalente. Damit **entfallen 83,4 %** der deutschen **Treibhausgasemissionen** allein **auf den Energiebereich** [UBA16b]. Ohne eine vollständige Dekarbonisierung der deutschen Energieversorgung ist deshalb ein erfolgreicher Klimaschutz unmöglich.

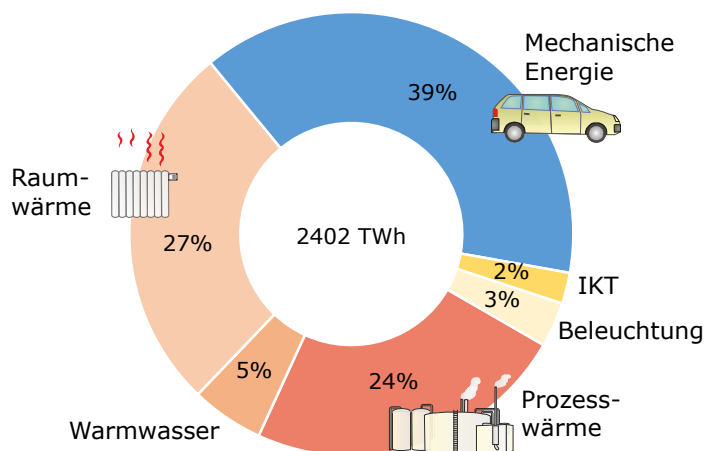
Bild 3 zeigt die Aufteilung der energiebedingten Treibhausgasemissionen auf verschiedene Sektoren. Den größten Anteil hat dabei die Energiewirtschaft, gefolgt vom Verkehr, der Industrie, Haushalten und GHD (Gewerbe, Handel und Dienstleistungen). Bei der Energiewirtschaft entfällt wiederum der größte Teil auf die Stromerzeugung und dabei auf die Kohleverstromung. Das verdeutlicht, dass Deutschland ohne einen baldigen Ausstieg auf der Kohleverstromung seinen Klimaschutzverpflichtungen unmöglich gerecht werden kann.



**Bild 3** Anteil verschiedener Sektoren an den energiebedingten Treibhausgasemissionen in Deutschland im Jahr 2014 (Daten: [UBA16b])

Im Folgenden soll eine Unterteilung in die Sektoren Strom, Wärme und Verkehr vorgenommen werden. Eine grobe Zuordnung der Treibhausgasemissionen auf diese drei Sektoren ist ebenfalls der Abbildung zu entnehmen, wobei die Unterteilung nicht ganz trennscharf ist und die Zahlenwerte damit nur einen ersten Eindruck über die Größenordnungen liefern können.

Um sämtliche Treibhausgase in allen Sektoren einsparen zu können, **muss** letztendlich **der Energieverbrauch in allen Sektoren klimaneutral durch erneuerbare Energien gedeckt werden**. Bild 4 zeigt die Aufteilung des Endenergieverbrauchs in Deutschland auf verschiedene Sektoren. Hierbei entfällt der größte Teil auf den Bereich der Wärme (Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme), wobei ein Teil des Wärmebedarfs auch über Strom und Fernwärme aus Kraftwerken gedeckt wird. Der größte Anteil der mechanischen Energie ist dem Verkehrssektor zuzuordnen. Auch die Industrie benötigt mechanische Energie, die überwiegend elektrisch gedeckt wird.



**Bild 4** Anteile verschiedener Sektoren am Endenergieverbrauch in Deutschland im Jahr 2014 (Daten: [BMWi16])

Die folgenden Kapitel widmen sich zuerst der Energiewende im Wärmebereich und im Verkehrssektor und führen dann die Ergebnisse bei den Betrachtungen des Elektrizitätsbereichs zusammen.

Ziele dieser Studie sind dabei zu untersuchen, wie der derzeitige Energiebedarf klimaneutral substituiert werden kann und welche Handlungsempfehlungen sich daraus ableiten. Außerdem sollen die nötigen Ausbaupfade erneuerbarer Energien skizziert werden. Erst wenn die notwendigen Erzeugungskapazitäten bekannt sind, lassen sich

in darauf aufbauenden Untersuchungen weiterführende Aussagen zum nötigen Leitungsausbau und Speicherbedarf treffen. Dieser Schritt war jedoch nicht Gegenstand der Studie.

Die Umgestaltung der Energieversorgung könnte durch gesellschaftliche Wandel und Verhaltensänderungen erleichtert werden. Eine Reduktion des Verkehrs durch eine räumlich bessere Vernetzung von Wohnen und Arbeiten, der Verzicht von Flugreisen im Freizeitbereich, Verkehrsvermeidung durch neue Medien, besseres Nutzerverhalten in Gebäuden und eine Reduktion des Wohnraumbedarfs könnten einige Maßnahmen sein. Der derzeitige Trend lässt allerdings umfangreiche Einsparungen durch entsprechende Veränderungen im anvisierten Zeitraum von 25 Jahren als nicht sehr wahrscheinlich erscheinen. Darum wird der heutige Bedarf auch für das Jahr 2040 in dieser Studie unverändert zugrunde gelegt.

### Zusammenfassung der Kernaussagen von Kapitel 2

- 83 % der Treibhausgasemissionen in Deutschland sind energiebedingt. Ohne eine vollständige Dekarbonisierung der Energieversorgung innerhalb der nächsten 25 Jahre ist ein Erreichen des 1,5-Grad-Limits kaum möglich.
- 46 % der energiebedingten Treibhausgasemissionen entfallen auf die Energiewirtschaft und dort größtenteils auf die Kohleverstromung.
- Für einen erfolgreichen Klimaschutz sollte darum ein schnellstmöglicher Ausstieg aus der Kohleverstromung anvisiert werden.
- Der Energieverbrauch kann grob in die Sektoren Strom, Wärme und Verkehr aufgeteilt werden. Die Dekarbonisierung der einzelnen Sektoren wird in den folgenden Kapiteln beschrieben.
- Gesellschaftliche Veränderungen und Verhaltensänderungen können die Dekarbonisierung der Energiewende erleichtern, sind aber nicht Gegenstand dieser Studie.

## 3 ENERGIEWENDE IM WÄRMESSEKTOR

Mit 56 % entfällt der größte Anteil des Endenergieverbrauchs in Deutschland auf den Wärmesektor. Auf Raumwärme und Warmwasser entfallen dabei 32 %, auf Prozesswärme 24 %. Ohne eine erfolgreiche Energiewende im Wärmesektor ist ein erfolgreicher Klimaschutz in Deutschland daher unmöglich.

### 3.1 Raumwärme und Warmwasser

75 % des Endenergieverbrauchs der Raumwärme und 66 % des Warmwassers werden derzeit durch fossile Energieträger gedeckt. Der Anteil Erneuerbarer Energien fällt mit 14 % bzw. 9 % hingegen bescheiden aus (Tabelle 1 und Tabelle 2).

**Tabelle 1** Anteil verschiedener Energieträger an der Deckung des Endenergieverbrauchs im Sektor Raumwärme im Jahr 2014 (Daten: [BMWi16])

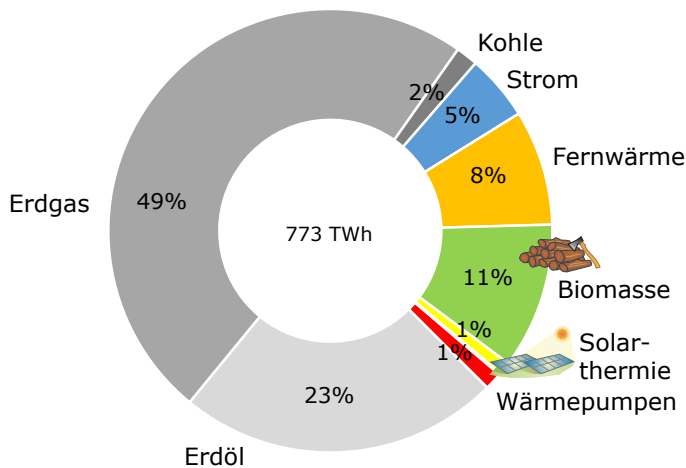
	PJ	TWh	Anteil
Fossile Energieträger	1747,1	485,3	75,1 %
davon Erdöl	564,8	156,9	24,3 %
davon Erdgas	1139,3	316,5	49,0 %
davon Kohle	43,0	12,0	1,9 %
Strom	50,8	14,1	2,2 %
Fernwärme	208,7	58,0	9,0 %
Erneuerbare <sup>1)</sup>	317,5	88,2	13,7%
Sonstige	1,8	0,5	0,1 %
Summe	2325,9	646,1	100 %

**Tabelle 2** Anteil verschiedener Energieträger an der Deckung des Endenergieverbrauchs im Sektor Warmwasser im Jahr 2014 (Daten: [BMWi16] und eigene Abschätzungen)

	PJ	TWh	Anteil
Fossile Energieträger	304,1	84,5	66,3 %
Strom	90,9	25,3	19,9 %
Fernwärme	20,5	5,7	4,4 %
Erneuerbare <sup>1)</sup>	42,9	11,9	9,3 %
Summe	458,4	127,3	100 %

<sup>1)</sup> ohne erneuerbaren Anteil bei der Stromversorgung

Die Anteile von Strom und Fernwärme sind in der Summe noch etwas geringer. Rund 30 % des Stroms werden dabei zusätzlich durch erneuerbare Energien gedeckt. Unter den erneuerbaren Energien, die direkt zur Raumwärme und Warmwassererzeugung genutzt werden, dominiert mit 11 % Anteil am Endenergieverbrauch die Biomasse. Der Anteil der Solarthermie und von Wärmepumpen ist mit rund 1 % vergleichsweise unbedeutend (Bild 5). Die Tiefengeothermie wird zwar auch genutzt, ist aber statistisch gesehen irrelevant.



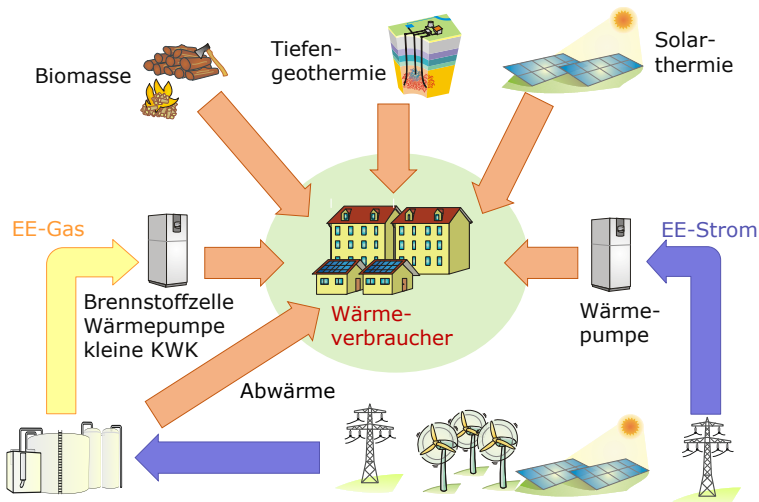
**Bild 5** Anteil verschiedener Energieträger an der Deckung des Endenergieverbrauchs in den Sektoren Raumwärme und Warmwasser im Jahr 2014

Soll die Wärmeversorgung vollständig dekarbonisiert werden, dürfen dazu künftig nur noch folgende Wärmeversorger bzw. Quellen genutzt werden:

- Biomasse
- Solarthermie
- Tiefengeothermie
- Elektrische Wärmepumpen betrieben mit Strom aus erneuerbaren Kraftwerken
- Gaswärmepumpen betrieben durch Gas, das über Power-to-Gas-Anlagen auf Basis von regenerativ erzeugtem Strom gewonnen wurde

Bild 6 zeigt die Bausteine einer künftigen regenerativen Wärmeversorgung. Heute gilt Erdgas noch als umweltverträglicher Energieträger. Im Vergleich zu Erdöl schneidet Erdgas aus Umwelt- und Klimagesichtspunkten zwar besser ab, doch auch **Erdgas ist ein fossiler Energieträger**, der bei der Verbrennung nicht unerhebliche Treibhausgasemissionen verursacht. Wenn künftig Gas klimaneutral genutzt werden soll, muss

dazu in sogenannten **Power-to-Gas-Anlagen (P2G)** erst einmal Wasserstoff und **Methan durch den Einsatz von Strom aus regenerativen Kraftwerken** erzeugt werden (Bild 7).



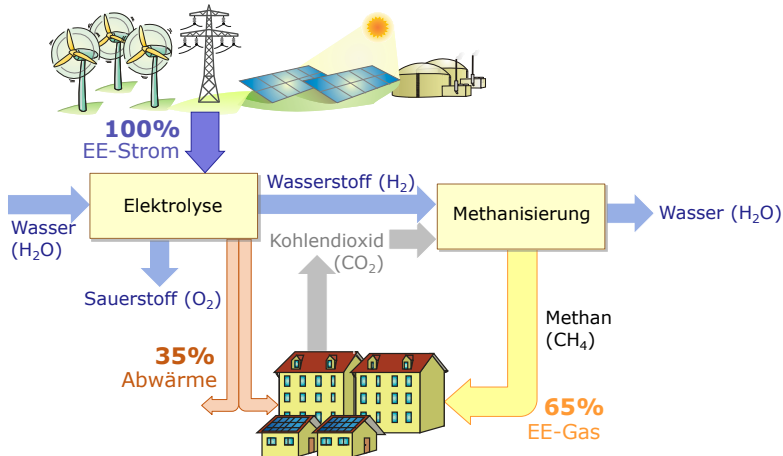
**Bild 6** Bausteine einer nachhaltigen Wärmeversorgung

Dabei muss mit Verlusten in der Größenordnung von 35 % gerechnet werden. Diese Verluste entstehen in Form von Abwärme, die zum Teil genutzt werden kann, um beispielsweise die fossile Fernwärme zu ersetzen. Da die Power-to-Gas-Anlagen allerdings je nach Verfügbarkeit von Strom aus Photovoltaik- oder Windkraftanlagen nicht permanent laufen können, muss dann die Wärmeversorgung durch thermische Speicher abgesichert werden. Auf einem ähnlichen Weg lassen sich auch flüssige Treibstoffe gewinnen. In dem Fall spricht man von Power-to-Liquid-Anlagen (P2L-Anlagen). Diese werden vor allem bei der Dekarbonisierung des Verkehrsbereichs eine wichtige Rolle spielen.

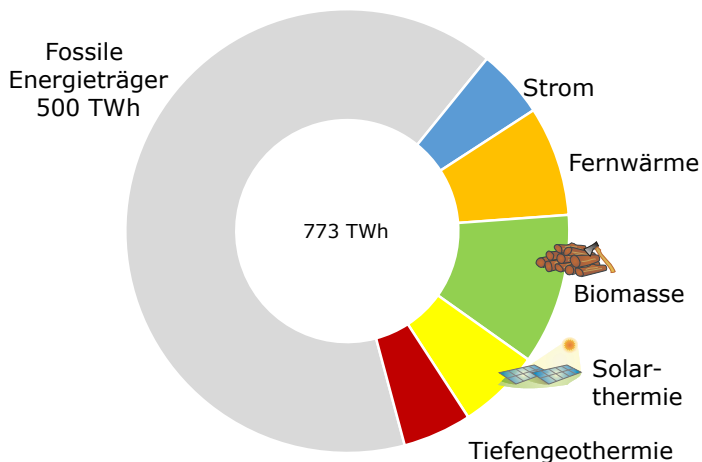
Prinzipiell ist auch denkbar, **Gas-Brennwertkessel oder KWK-Anlagen** auf Basis von Gas aus P2G-Anlagen zu betreiben. Da dabei aber erhebliche Mengen an regenerativem Strom erforderlich sind, **scheiden** diese Wärmeerzeuger **aufgrund unzureichender Effizienz künftig aus**, wie im Folgenden noch erläutert wird.

Die Ausbaupotenziale für die Deckung der Wärme durch erneuerbare Energien aus Biomasse, Solarthermie sowie Tiefengeothermie sind in Deutschland begrenzt. Die Nutzung von Biomasserohstoffen ist im dicht besiedelten Deutschland nur noch gering-

fällig ausbaubar. Bei der Solarthermie und der Tiefengeothermie lassen vor allem ökonomische Aspekte einen schnelleren Ausbau, als in dieser Studie unterstellt wurde, eher unwahrscheinlich erscheinen. Dennoch wird in diesen Bereichen im Vergleich zur bisherigen Anwendung ein recht ambitionierter Ausbau unterstellt, der den stark steigenden Strombedarf reduziert. Damit sinkt der noch zu substituierende fossile Endenergiebedarf von 573 TWh auf 500 TWh (Bild 8).



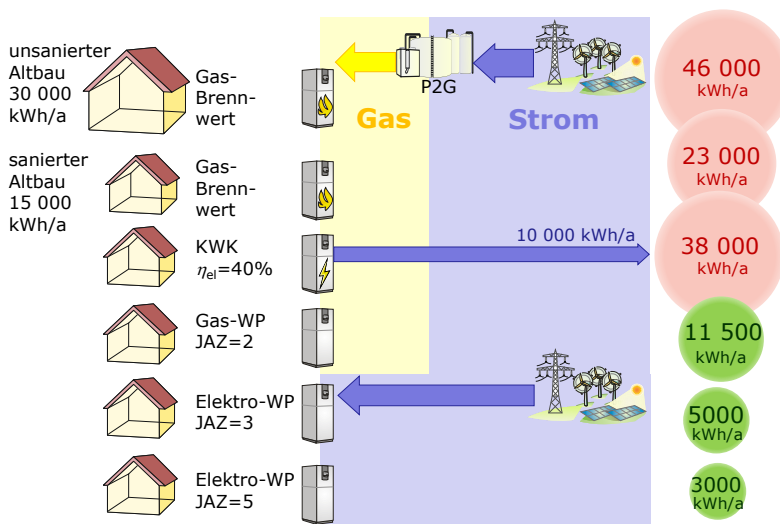
**Bild 7** Prinzip der Substitution von fossilem Erdgas durch aus erneuerbarem Strom erzeugtem Methan (Power-to-Gas, P2G)



**Bild 8** Verbleibender Anteil fossiler Energieträger an der Deckung des Endenergieverbrauchs in den Sektoren Raumwärme und Warmwasser nach Ausbau der Nutzung der Biomasse, der Solarthermie und der Tiefengeothermie

Denkbar ist auch, die Solarthermie in größeren Einheiten in Nahwärmenetze einzu- binden. Dies verbessert die Wirtschaftlichkeit erheblich. Wird die Solarthermie stärker ausgebaut als in dieser Studie unterstellt wurde, lässt sich der zusätzliche Strombedarf weiter reduzieren.

Soll der verbleibende fossile Endenergiebedarf ausschließlich durch Gas-Brennwert- kessel gedeckt werden, die durch Gas aus P2G-Anlagen versorgt werden, wäre zur Erzeugung der benötigten Gasmengen ein zusätzlicher Strombedarf von 770 TWh erforderlich (Tabelle 3). Dieser Strombedarf übersteigt die gesamte derzeitige Brutto- stromerzeugung von 628 TWh. Der dafür nötige Ausbau regenerativer Kraftwerke im Zeitraum von 25 Jahren ist absolut unrealistisch. Daher muss der zusätzliche Strom- bedarf im Wärmesektor durch Effizienzmaßnahmen reduziert werden. Bild 9 vergleicht die Effizienz verschiedener regenerativer Wärmeversorgungssysteme und den daraus resultierenden Strombedarf.



**Bild 9** Effizienz und Strombedarf von strombasierten regenerativen Wärmeversorgungssystemen

Eine große Bedeutung kommt dabei der Gebäudesanierung zu. Prinzipiell ließe sich der Raumwärmebedarf durch optimale Dämmmaßnahmen und Wärmerückgewinnung um mehr als 80 % verringern. Eine durchschnittliche Reduzierung um mehr als 25 bis 50 % erscheint in einem Zeitraum von 25 Jahren allerdings wenig realistisch.

**Deutliche Effizienzgewinne** lassen sich hingegen künftig **durch Wärmepumpen** erreichen. Würden keinerlei Gebäude saniert werden, aber alle Wärmeversorgungssys-

teme durch Elektro-Wärmepumpen mit einer jahresmittleren Leistungszahl, beziehungsweise einer Jahresarbeitszahl (JAZ) von 3 ersetzt, sinkt der zusätzliche Strombedarf von 770 TWh auf 167 TWh. Denkbar ist auch die Jahresarbeitszahl von Wärmepumpen z.B. durch den Einsatz von Abwärmenutzung oder der Solarthermie weiter zu steigern. Werte von 5 sind dann erreichbar. Würden nur Wärmepumpen mit einer JAZ von 5 eingesetzt und der Wärmebedarf aller Gebäude durch Sanierung halbiert, wäre zur Substitution der verbliebenen fossilen Energieträgern nur noch ein zusätzlicher Strombedarf von 23 TWh erforderlich.

Tabelle 3 fasst den erforderlichen zusätzlichen Strombedarf bei Umsetzen verschiedener Effizienzmaßnahmen zusammen.

**Tabelle 3** Zusätzlicher Strombedarf durch die Substitution der verbliebenen Raumwärme und des Warmwassers aus fossilen Energieträgern

Maßnahme	Effizienzfaktor	Zusätzlicher Strombedarf
<b>ohne Verringerung des Wärmebedarfs (zu ersetzender fossiler Wärmebedarf 500 TWh)</b>		
Gasbrennwertkessel, mit P2G-Gas betrieben	0,65	770 TWh
Gas-Wärmepumpen (JAZ=2) mit P2G-Gas betrieben	1,3	385 TWh
Elektrowärmepumpen (JAZ=3)	3	167 TWh
Elektrowärmepumpen (JAZ=5)	5	100 TWh
<b>mit Verringerung des Wärmebedarfs um 50 % (zu ersetzender fossiler Wärmebedarf 114 TWh)</b>		
Gasbrennwertkessel, mit P2G-Gas betrieben	0,65	175 TWh
Gas-Wärmepumpen (JAZ=2) mit P2G-Gas betrieben	1,3	88 TWh
Elektrowärmepumpen (JAZ=3)	3	38 TWh
Elektrowärmepumpen (JAZ=5)	5	23 TWh
Referenzwert für Raumwärme und Warmwasser		150 TWh

Diese Zahlen verdeutlichen, dass Effizienzgewinne im Wärmesektor für einen erfolgreichen Klimaschutz essentiell sind. Im Folgenden wird allerdings davon ausgegangen, dass sich ein flächendeckender Einsatz von Wärmepumpen und eine Halbierung des Wärmebedarfs in allen Gebäuden im anvisierten Zeitfenster nicht mehr umsetzen lassen. Darum entsteht auch bei ambitioniertem Einsatz von Effizienzmaßnahmen den-

noch ein zusätzlicher Strombedarf von 150 TWh. Da bei Heizungssystemen von Produktzyklen von bis zu 20 Jahren ausgegangen werden muss, ist ein **Verbot des Einbaus neuer Öl- und Gasheizungen sowie KWK-Anlagen ab dem Jahr 2020 erforderlich** um eine vollständige Dekarbonisierung im Jahr 2040 zu erreichen.

Bild 9 zeigt eindeutig, dass der Strombedarf für die Herstellung von Gas zum Betrieb von wärmegeführten KWK-Anlagen zu hoch ist. Darum scheiden auch diese zur Deckung des Wärmebedarfs künftig weitgehend aus. Bei der Speicherung im Stromsektor wird jedoch Gas für die Langzeitspeicherung eine zentrale Rolle einnehmen. Die bei der Gaserzeugung und der anschließenden Rückverstromung entstehende Abwärme muss selbstredend genutzt werden, unter anderem um den existierenden fossilen Fernwärmebedarf zu ersetzen.

### 3.2 Prozesswärme für Industrie und GHD

Die Prozesswärme stellt neben der Raumwärme und dem Warmwasser den dritten Bereich der Wärmenutzung dar. Die Industrie hat dabei den größten Anteil am Prozesswärmebedarf. In großem Abstand folgt der Sektor GHD (Gewerbe, Handel, Dienstleistungen). Die im Haushalt benötigte Prozesswärme wird beispielsweise zum Kochen verwendet und wird überwiegend durch elektrischen Strom gedeckt. Auch Prozess- und Klimakälte wird in allen Bereichen größtenteils durch Strom erzeugt. Wird die Stromversorgung vollständig auf erneuerbare Energien umgestellt, erfolgt automatisch auch die Dekarbonisierung der durch Strom versorgten Wärmebereiche.

Daher ist es ausreichend, nur den Prozesswärmebedarf der Bereiche Industrie und GHD näher zu untersuchen. In diesem Bereich werden derzeit 72,6 % durch fossile Energieträger gedeckt (Tabelle 4). Wird dieser Bedarf über Gas aus P2G-Anlagen versorgt, steigt der zusätzliche Strombedarf auf 530 TWh. Deutlich sinnvoller ist daher der direkte Einsatz elektrischer Energie.

Effizienzgewinne durch Wärmepumpen sind bei der Prozesswärme kaum möglich, da der Einsatz von Wärmepumpen durch das meist hohe Temperaturniveau technisch oft nicht möglich ist. Es besteht aber ein erhebliches Potenzial an Effizienzsteigerungen durch Prozessoptimierungen und Wärmerückgewinnung.

**Tabelle 4** Anteil verschiedener Energieträger an der Deckung der Prozesswärme in den Sektoren Industrie und GHD im Jahr 2014 (Daten: [BMW16])

	PJ	TWh	Anteil
Fossile Energieträger	1247,5	346,5	72,6 %
davon Erdöl	114,8	31,9	6,7 %
davon Erdgas	761,8	211,6	44,3 %
davon Kohle	370,8	103,0	21,6 %
Strom	156,7	43,5	9,1 %
Fernwärme	170,0	47,2	9,9 %
Erneuerbare	71,6	19,9	4,2 %
Sonstige	72,2	20,1	4,2 %
<b>Summe</b>	<b>1718,1</b>	<b>477,2</b>	<b>100 %</b>

In dieser Studie wird ein Einsparpotenzial von 30 % angenommen. Daher wird unterstellt, dass durch die Dekarbonisierung der Prozesswärme bis zum Jahr 2040 letztendlich ein zusätzlicher Strombedarf von 250 TWh entsteht. [UBA13] geht beim gesamten Endenergiebedarf der Industrie sogar von Einsparpotenzialen von 50 % bis zum Jahr 2050 aus, während [IWES15] 34 % für den gesamten Wärmebedarf der Industrie für den gleichen Zeitraum ansetzt.

**Tabelle 5** Zusätzlicher Strombedarf durch die Substitution der verbliebenen Prozesswärme aus fossilen Energieträgern

Maßnahme	Effizienzfaktor	zusätzlicher Strombedarf
Ohne Effizienzmaßnahmen, Nutzung von EE-Gas	0,65	530 TWh
Ohne Effizienzmaßnahmen, Nutzung von Elektrowärme	1	347 TWh
Effizienzmaßnahmen wie Wärmerückgewinnung, Nutzung von Elektrowärme	1,4	250 TWh
<b>Referenzwert für Industrieprozesswärme</b>	<b>1,4</b>	<b>250 TWh</b>

### Zusammenfassung der Kernaussagen von Kapitel 3

- Fossile Energieträger decken derzeit 75 % des Raumwärmebedarfs, 66 % des Warmwasserbedarfs und 73 % der Prozesswärme für Industrie und GHD.
- Erneuerbare Energien decken derzeit 14 % des Raumwärmebedarfs, 9 % des Warmwasserbedarfs und 4 % der Prozesswärme für Industrie und GHD.
- Unter den erneuerbaren Energien haben biogene Energieträger den mit Abstand größten Anteil. Der Anteil der Biomasse kann aber nicht mehr substantiell ausgebaut werden.
- Solarthermie und Tiefengeothermie können weiter ausgebaut werden. Die wirtschaftlichen Potenziale sind aber hier begrenzt.
- Die Dekarbonisierung des Wärmesektors kann nur durch einen hohen Anteil von Strom aus regenerativen Kraftwerken gelingen.
- Erfolgt die Dekarbonisierung im Raumwärme- und Warmwasserbereich im Wesentlichen durch Gas-Brennwertkessel mit Gas, das über Power-to-Gas-Verfahren auf Basis von regenerativ erzeugtem Strom gewonnen wird, steigt der zusätzliche Strombedarf auf 770 TWh und übersteigt damit die gesamte heutige Bruttostromerzeugung von 628 TWh.
- Gas-Brennwertkessel und KWK-Anlagen sind daher für die Dekarbonisierung bei der Energiewende nicht geeignet. Soll die Dekarbonisierung im Jahr 2040 abgeschlossen sein, dürfen solche Anlagen ab dem Jahr 2020 nicht mehr neu gebaut werden.
- Stattdessen müssen effiziente Wärmepumpen die Versorgung der Raumwärme und des Warmwassers weitgehend übernehmen.
- Durch Gebäudesanierung sollte der Wärmebedarf der Gebäude in den nächsten 25 Jahren möglichst um 30 bis 50 % gesenkt werden.
- Werden für die nächsten 25 Jahre realistische Effizienzmaßnahmen umgesetzt, lässt sich der zusätzliche Strombedarf für Raumwärme und Warmwasser auf 150 TWh reduzieren.
- Für die Dekarbonisierung der Prozesswärme für Industrie und GHD entsteht ein zusätzlicher Strombedarf in der Größenordnung von 250 TWh.
- Der erforderliche zusätzliche Strombedarf ist bis 2040 vollständig durch erneuerbare Energien zu decken.

## 4 ENERGIEWENDE IM VERKEHRSEKTOR

In Deutschland entfallen über 83 % des Endenergieverbrauchs des Verkehrssektors auf den Straßenverkehr. Allein der Individualverkehr ist für 56 % des Verbrauchs verantwortlich (Tabelle 6).

**Tabelle 6** Anteile verschiedener Verkehrsarten am gesamten Endenergieverbrauch des Verkehrssektors im Jahr 2014 (Daten: [BMVI15])

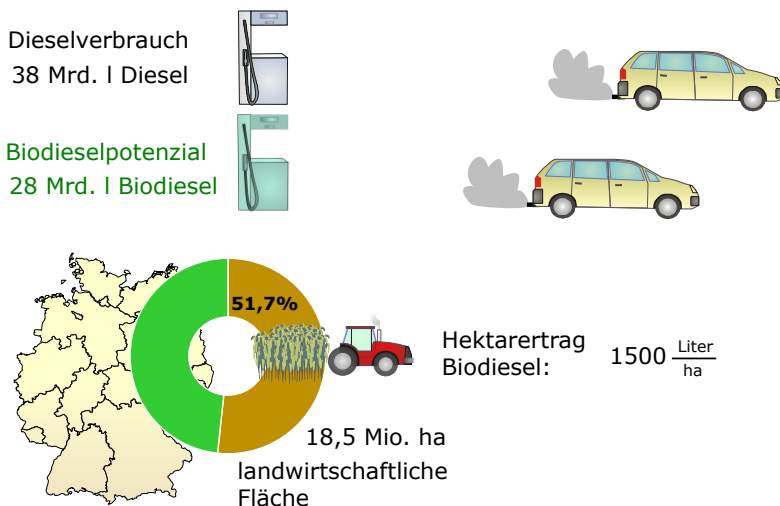
	PJ	TWh	Anteil
Individualverkehr	1476	410,0	56,1 %
Kraftomnibusverkehr	33	9,2	1,3 %
Straßengüterverkehr	690	191,7	26,2 %
Schienenverkehr	56	15,6	2,1 %
Luftverkehr	362	100,6	13,8 %
Binnenschifffahrt	12	3,3	0,5 %
Summe	2629	730	100 %

In der Summe **übersteigt der Endenergieverbrauch des Verkehrs** mit 730 TWh **die gesamte Bruttostromerzeugung** von 628 TWh, wobei der Energiebedarf im Verkehrsbereich derzeit überwiegend durch fossile Energieträger gedeckt wird (Tabelle 7). Allein dieser Vergleich zeigt, dass eine Dekarbonisierung des Verkehrssektors in 25 Jahren sehr ambitioniert ist und sehr einschneidender Veränderungen bedarf.

**Tabelle 7** Anteile verschiedener Energieträger am gesamten Endenergieverbrauch des Verkehrssektors im Jahr 2014 (Daten: [BMVI15])

	PJ	TWh	Anteil
Fossile Energieträger	2463	684,2	93,7 %
davon Vergaserkraftstoff	768	213,3	29,2 %
davon Diesel	1333	370,3	50,7 %
davon Flugkraftstoffe	362	100,6	13,8 %
Strom	42	11,7	1,6 %
Erneuerbare	116	32,2	4,4 %
Sonstige	7	1,9	0,3 %
Summe	2629	730	100 %

Bislang werden nur 4,4 % des Endenergiebedarfs im Verkehrssektor durch erneuerbare Energien gedeckt. Diese entfallen fast ausschließlich auf biogene Treibstoffe. Rund 30 % des Stroms wird allerdings auch heute schon aus erneuerbaren Energien gewonnen. Dieser Anteil ist unter „Erneuerbare“ noch nicht enthalten. Im Verkehrsbe- reich werden derzeit aber nur 1,6 % des Endenergiebedarfs durch Strom gedeckt. Die **Dekarbonisierung des Verkehrssektors durch biogene Treibstoffe** ist in Deutschland technisch **unmöglich**. Bild 10 zeigt, dass selbst bei Nutzung sämtlicher landwirtschaftlicher Flächen zum Anbau von Biodiesel nicht einmal der Dieserverbrauch substituiert werden kann. Vergaser- und Flugtreibstoffe sind dabei noch nicht einmal berücksichtigt.



**Bild 10** Jährliche Potenziale der Gewinnung von Biodiesel bei Nutzung aller landwirtschaftlichen Flächen in Deutschland im Vergleich zum jährlichen Dieserverbrauch

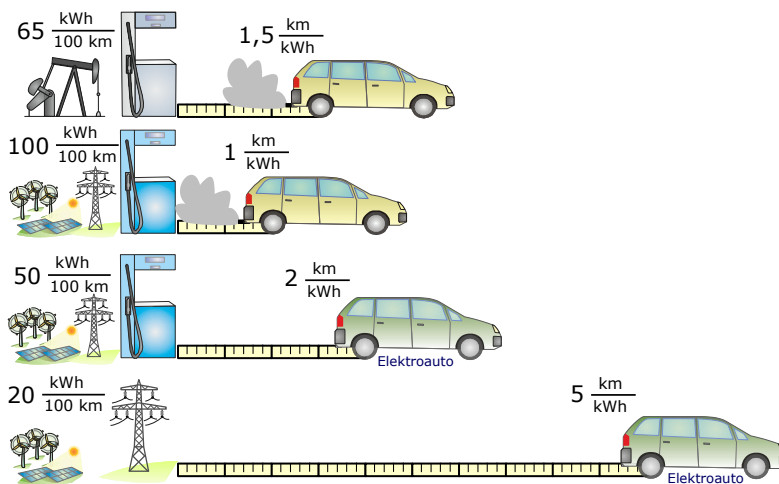
Im Folgenden wird darum davon ausgegangen, dass der Anteil biogener Treibstoffe nicht weiter erhöht wird. Die bereits produzierten biogenen Treibstoffe sollen in dieser Studie in den Bereichen Luft- und Schifffverkehr eingesetzt werden, in denen eine Dekarbonisierung die größte Herausforderung darstellt.

Ohne den weiteren Ausbau der Nutzung biogener Treibstoffe gibt es im Wesentlichen drei Möglichkeiten zur Dekarbonisierung des Verkehrsbereichs:

- Herstellung von flüssigen oder gasförmigen Treibstoffen (Power-to-Gas oder Power-to-Liquid) auf Basis von regenerativ erzeugtem Strom und Nutzung in Verbrennungsmotoren.

- Herstellung von flüssigen oder gasförmigen Treibstoffen (Power-to-Gas oder Power-to-Liquid) auf Basis von regenerativ erzeugtem Strom und Nutzung nach Rückverstromung in Brennstoffzellen in Elektromotoren
- Laden von Batterien mit regenerativ erzeugtem Strom oder leitungsgebundene Fahrten mit regenerativem Strom durch Elektrofahrzeuge

Alle Möglichkeiten basieren letztendlich auf dem Einsatz regenerativen Stroms. Sie zeichnen sich aber durch eine unterschiedliche Effizienz und damit einen stark unterschiedlichen Strombedarf aus. Bild 11 visualisiert die unterschiedlichen Effizienzen.



**Bild 11** Effizienz strombasierter Verkehrskonzepte im Vergleich zu herkömmlichen Fahrzeugen im Individualverkehr mit Verbrennungsmotor (1.v.o.: konventionell, 2 v.o.: P2L/P2G mit Verbrennungsmotor, 3.v.o.: P2L/P2G mit Brennstoffzelle und Elektroantrieb, 4.v.o.: Batteriefahrzeug mit EE-Strom)

Durch den sehr hohen Endenergiebedarf des Verkehrsbereichs ist es dabei essenziell, auf möglichst effiziente Systeme zu setzen, um den nötigen Strombedarf durch die Dekarbonisierung nicht dramatisch ansteigen zu lassen. Tabelle 8 zeigt, dass der zusätzliche Strombedarf auf über 1000 TWh ansteigen wird, wenn die fossilen Treibstoffe im Wesentlichen durch Treibstoffe auf Basis von regenerativem Strom ersetzt werden.

Bei den regenerativ erzeugten Kraftstoffen liegt es nahe, einen Teil aus Ländern zu importieren, die ein besseres Angebot an Solarstrahlung und Windenergie haben als Deutschland. Da sich diese Treibstoffe genauso gut wie fossiles Erdgas oder Erdöl transportieren lassen, ist dieser Weg im Gegensatz zu interkontinentalen Stromleitungsnetzen auch in kurzen Zeiträumen realisierbar. Das kann helfen, den Bedarf an

regenerativen Kraftwerken in Deutschland zu verringern und auf weniger dicht besiedelte Länder und Wüstenregionen zu verlagern. Im anvisierten Zeitfenster bestehen diese Verlagerungspotenziale vor allem bei der Herstellung von flüssigen Energieträgern. Darum wurde in dieser Studie der Import von Energieträgern nur im Verkehrs- und nicht im Wärmebereich unterstellt.

**Tabelle 8** Zusätzlicher Strombedarf im Verkehrsbereich durch die Substitution der fossilen Energieträger ohne Effizienzmaßnahmen

Bereiche ohne Effizienzmaßnahmen	Anteil	Effizienzfaktor	zusätzlicher Strombedarf
<b>Individualverkehr 410 TWh</b>			
davon E-Mobilität mit Batterie	10 %	3,25	13 TWh
davon Power-to-Liquid-Treibstoffe, P2L	90 %	0,65	568 TWh
<b>Straßengüter und Omnibus-Verkehr 201 TWh</b>			
davon Power-to-Liquid-Treibstoffe, P2L	100 %	0,65	309 TWh
<b>Luftverkehr und Binnenschifffahrt 104 TWh</b>			
davon Biotreibstoffe	30 %	1	---
davon Power-to-Liquid-Treibstoffe, P2L	70 %	0,65	112 TWh
Summe			1002 TWh
davon Import von P2G/P2L			302 TWh
davon Erzeugung im Inland			700 TWh

**Tabelle 9** Zusätzlicher Strombedarf im Verkehrsbereich durch die Substitution der fossilen Energieträger mit starken Effizienzmaßnahmen

Bereiche mit Effizienzmaßnahmen	Anteil	Effizienzfaktor	zusätzlicher Strombedarf
<b>Individualverkehr 410 TWh</b>			
davon E-Mobilität mit Batterie	95 %	3,25	120 TWh
davon E-Mobilität mit Power-to-Gas (P2G)	5 %	1,3	16 TWh
<b>Straßengüter und Omnibus-Verkehr 201 TWh</b>			
davon E-Mobilität, leitungsgebunden	70 %	3,25	43 TWh
davon E-Mobilität mit Power-to-Gas (P2G)	30 %	1,3	46 TWh
<b>Luftverkehr und Binnenschifffahrt 104 TWh</b>			
davon Biotreibstoffe	30 %	1	---
davon Power-to-Liquid-Treibstoffe, P2L	70 %	0,65	112 TWh
Summe			337 TWh
davon Import von P2G/P2L			137 TWh
davon Erzeugung im Inland			200 TWh

Ein Aufbau einer regenerativen Stromversorgung erscheint im nötigen Umfang für die Werte aus Tabelle 8 in den nächsten 25 Jahren wenig realistisch. Darum wird in Tabelle 9 ein weiterer Weg skizziert, bei dem durch Effizienzgewinne im Straßenverkehr der Strombedarf erheblich reduziert wird. Der Strombedarf sinkt dabei von 1002 TWh auf 337 TWh.

Hierbei wird davon ausgegangen, dass der **Individualverkehr künftig fast ausschließlich durch batteriebetriebene Elektrofahrzeuge** bedient wird. Der **LKW- und Busverkehr** muss **ebenfalls elektrifiziert** werden. Da aufgrund der größeren Strecken hier Batteriefahrzeuge nur eingeschränkt möglich sind, ist eine Elektrifizierung wichtiger **Fernstraßen mit Oberleitungen** anzustreben. Ein Teil der Transportleistung im Schwerlastbereich kann auch mit Treibstoffen auf Basis von Power-to-Liquid erbracht werden. Auch eine deutliche **Erhöhung des Schienengüterverkehrs** erleichtert die Elektrifizierung.

Bei Straßenfahrzeugen kann von Produktzyklen von 10 bis 15 Jahren ausgegangen werden. Daher wird empfohlen ab dem Jahr 2025, **spätestens aber ab dem Jahr 2030, nur noch Neufahrzeuge im Straßenverkehr mit rein elektrischen Antrieben** zuzulassen.

Im Flug- und Schiffverkehr sind die Produktzyklen deutlich länger und technische Lösungen zur Elektrifizierung erheblich aufwändiger. Darum wird in diesem Bereich im Wesentlichen der Einsatz von Power-To-Liquid- und Biomassetreibstoffen vorgesehen. Bei Berücksichtigung von Importen eines Teils der PtL-Treibstoffe beträgt der Inlandsstrombedarf für den gesamten Verkehrssektor bei Umsetzung der genannten Effizienzmaßnahmen 200 TWh.

### Zusammenfassung der Kernaussagen von Kapitel 4

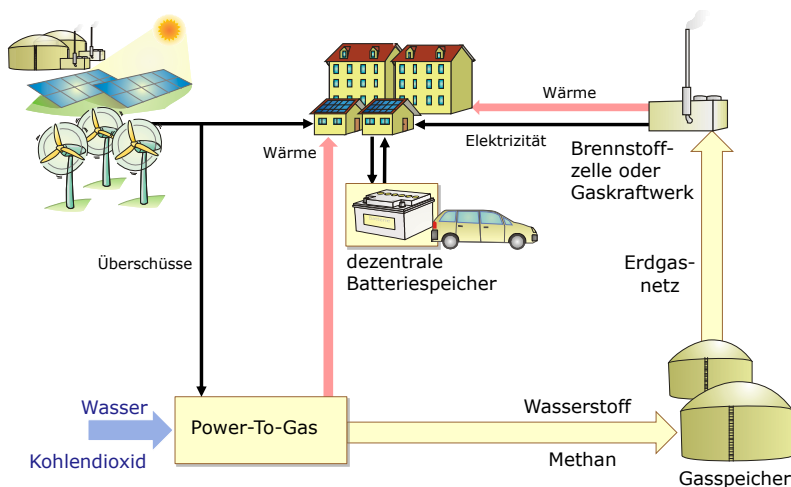
- Fossile Energieträger decken derzeit 94 % des Endenergiebedarfs des Verkehrs.
- Biogene Energieträger decken etwas mehr als 4 %. Der Anteil der Biomasse kann aber nicht mehr substanziell ausgebaut werden.
- Die Dekarbonisierung des Verkehrssektors kann im Wesentlichen nur durch Strom aus regenerativen Kraftwerken gelingen.
- Der Endenergiebedarf des Verkehrs beträgt 730 TWh und übersteigt damit die gesamte Brutostromerzeugung von 628 TWh.
- Erfolgt die Dekarbonisierung im Wesentlichen durch Treibstoffe, die über Power-to-Liquid-Verfahren auf Basis von regenerativ erzeugtem Strom gewonnen werden, steigt der zusätzliche Strombedarf auf über 1000 TWh.
- Werden Effizienzmaßnahmen konsequent umgesetzt, lässt sich der zusätzliche Strombedarf auf 337 TWh reduzieren.
- Hierzu muss der Individualverkehr künftig fast ausschließlich auf Elektrofahrzeugen mit Batteriespeichern basieren.
- Möglichst ab 2025, spätestens aber ab 2030, sollten in Deutschland keine Neufahrzeuge mit Verbrennungsmotoren mehr zugelassen werden.
- Auch der Güter- und Omnibusverkehr muss elektrifiziert werden.
- Aufgrund der langen Strecken im Güterverkehr wird empfohlen, die wichtigsten Fernstraßen mit elektrischen Oberleitungen zu versehen.
- Für den Flug- und Schiffsverkehr lässt sich eine Dekarbonisierung kurzfristig nur durch den Einsatz von regenerativen Power-to-Liquid-Treibstoffen und den verfügbaren biogenen Treibstoffen erreichen.
- Zur Reduktion der regenerativen Stromerzeugung in Deutschland und zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit kann ein Teil der Power-to-Liquid-Treibstoffe aus Ländern mit einem besseren Solarstrahlungs- oder Windangebot als Deutschland importiert werden.
- Der zusätzliche Strombedarf muss bis 2040 vollständig durch erneuerbare Energien gedeckt werden.

## 5 AUSWIRKUNGEN DER SEKTORKOPPLUNG AUF DEN ELEKTRIZITÄTSBEREICH

Nachdem der zusätzliche Strombedarf zur klimaverträglichen Deckung des Verbrauchs in den Sektoren Wärme und Verkehr bestimmt wurde, muss nun erläutert werden, wie dieser im Sinne des Klimaschutzes ausschließlich durch erneuerbare Kraftwerke gedeckt werden kann.

Um das Elektrizitätsversorgungssystem stabil zu halten, erbringen derzeit fossile Kraftwerke verschiedene Systemdienstleistungen. Um diese Kraftwerke endgültig stilllegen zu können, müssen die Rahmenbedingungen für die Netzstabilität so verändert werden, dass erneuerbare Kraftwerke in Kombination mit Speichern die Systemdienstleistungen schnellstmöglich vollständig übernehmen können. Eine schnelle Errichtung von neuen Speichern ist dazu anzustreben.

Wird der Strom ausschließlich durch erneuerbare Energien gedeckt, kommen dabei vor allem fluktuierende Erzeuger wie Photovoltaik und Windkraft zum Einsatz. Um eine stetige Verfügbarkeit der Energieversorgung über das ganze Jahr zu gewährleisten, sind große Speicherkapazitäten erforderlich, die sich aus Batterie- und Gasspeichern zusammensetzen (Bild 12).



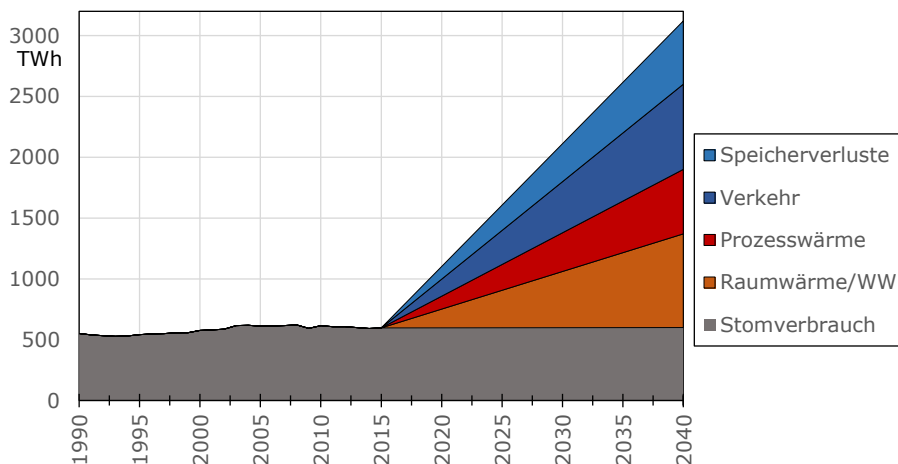
**Bild 12** Speicherlösungen einer rein regenerativen Stromversorgung

Dabei treten verhältnismäßig große Umwandlungs- und Speicherverluste auf. In Anlehnung an [UBA10] werden diese mit 20 % des ursprünglichen Strombedarfs abgeschätzt.

Tabelle 10 und Bild 13 zeigen dabei den nötigen Strombedarf, wenn keinerlei Effizienzmaßnahmen umgesetzt werden. Der Wärmebedarf wird dabei im Wesentlichen durch Gas gedeckt, das über Power-to-Gas-Anlagen auf Basis von Strom gewonnen wird. Im Verkehrsbereich werden fossile Treibstoffe weitgehend durch Treibstoffe ersetzt, die ebenfalls aus Strom erzeugt werden.

**Tabelle 10** Entwicklung des Strombedarfs für eine klimaneutrale Energieversorgung ohne Effizienzmaßnahmen

Sektoren ohne Effizienzmaßnahmen	TWh	Anteil
Stromverbrauch ohne weitere Sektorkopplung	600	19,2 %
Raumwärme und Warmwasser	770	24,7 %
Industrieprozesswärme von Industrie und GHD	530	17,0 %
Verkehr	700	22,4 %
Speicher- und Übertragungsverluste im Stromsektor	520	16,7 %
<b>Summe</b>	<b>3120</b>	<b>100 %</b>



**Bild 13** Entwicklung des Strombedarfs für eine klimaneutrale Energieversorgung ohne Effizienzmaßnahmen

Damit ergibt sich für das **Szenario ohne Effizienzmaßnahmen** ein **Strombedarf von über 3000 TWh**. Das bedeutet, dass sich der Strombedarf in Deutschland durch die Sektorkopplung mehr als verfünffachen würde. Diesen Bedarf durch erneuerbare

Energien bis zum Jahr 2040 zu decken, kann als aussichtslos angesehen werden. Das verdeutlicht, dass eine klimagerechte Energiewende ohne ambitionierte Effizienzmaßnahmen nicht erfolgreich sein kann.

Zudem zeigt sich, dass die Power-to-Gas-Technologie essentiell ist, um den nötigen Speicherbedarf für die Stabilität der Elektrizitätsversorgung sicherstellen zu können. Soll diese aber zusätzlich noch den existierenden Gas- und Ölverbrauch substituieren, steigt der Strombedarf unverhältnismäßig stark an.

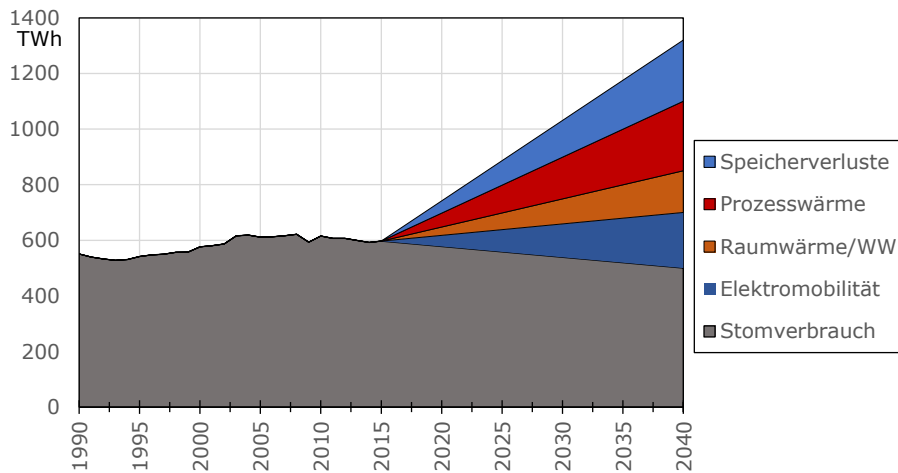
Die Deckung des Strombedarfs bei Umsetzung **ambitionierter Effizienzmaßnahmen** stellt ebenfalls eine große Herausforderung dar. Hierbei werden der **Individualverkehr und ein Großteil des Güterverkehrs** weitgehend durch die **Elektromobilität** bedient. Im Wärmebereich kommen **umfangreiche Wärmeeinsparmaßnahmen** zum Einsatz. Die **Raumwärme** wird vor allem **durch Wärmepumpen** gedeckt.

Auch beim Szenario mit hohen Effizienzmaßnahmen ergibt sich durch den hohen Anteil fluktuierender erneuerbarer Energien ein stark gesteigerter Speicherbedarf. Neben Batterien muss er vor allem durch die Speicher im vorhandenen Gasnetz gedeckt werden, die große Energiemengen aufnehmen und zeitlich ebenso wie räumlich verteilt wieder abgeben können. Um einen schnellen Kohleausstieg realisieren zu können, ist der **Ausbau von Speichern von großer Dringlichkeit**, um die Versorgungssicherheit letztendlich ohne fossile Backup-Kraftwerke sicherstellen zu können.

Durch den steigenden Speicherbedarf erhöht sich auch der Strombedarf durch Umwandlungs- und Speicherverluste um 20 %, sodass sich auch bei hoher Effizienz ein **gesamter Elektrizitätsbedarf von 1320 TWh** ergibt. Das entspricht nur gut 40 % des ersten Szenarios bis gut 3000 TWh, liegt aber immer noch bei über dem Doppelten des heutigen Strombedarfs. Werte der einzelnen Sektoren sind dabei in Tabelle 11 und Bild 14 näher dargestellt.

**Tabelle 11** Entwicklung des Strombedarfs für eine klimaneutrale Energieversorgung mit Effizienzmaßnahmen

Sektoren mit Effizienzmaßnahmen	TWh	Anteil
Stromverbrauch ohne weitere Sektorkopplung	500	37,9 %
Raumwärme und Warmwasser	150	11,4 %
Industrieprozesswärme von Industrie und GHD	250	18,4 %
Verkehr	200	15,2 %
Speicher- und Übertragungsverluste im Stromsektor	220	16,7 %
Summe	1320	100 %



**Bild 14** Entwicklung des Strombedarfs für eine klimaneutrale Energieversorgung mit Effizienzmaßnahmen

Diese Zahlen machen deutlich, dass für einen erfolgreichen Klimaschutz von einem deutlich steigenden Strombedarf auszugehen ist, der bereits im Jahr 2040 klimaneutral ausschließlich durch erneuerbare Energien gedeckt werden muss. Tabelle 12 zeigt, dass mit den **Ausbauzielen des EEG 2014** bis zum Jahr 2040 lediglich eine regenerative Stromerzeugung von **rund 460 TWh zu erwarten** ist. Diese würde **nicht** einmal **ausreichen**, den heutigen Strombedarf klimaneutral zu decken, vom gesteigerten Strombedarf durch die Sektorkopplung ganz zu schweigen.

**Tabelle 12** Entwicklung der regenerativen Stromerzeugung bis 2040 bei dauerhaftem Einhalten der EEG-Zielkorridore aus dem EEG 2014 [EEG14]

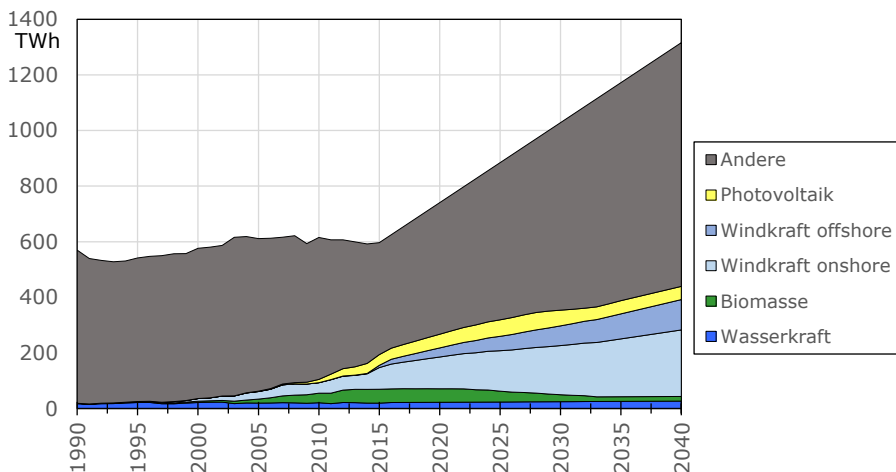
Erzeugung	Jährlicher Ausbau in GW	Installierte Leistung 2040 in GW	Volllaststunden in h/a	Stromerzeugung 2040 in TWh <sup>2)</sup>
Photovoltaik	2,5 (brutto)	50	950	48
Windkraft onshore	2,5 (netto)	104	2500	260
Windkraft offshore <sup>1)</sup>	0,85 (netto)	24	4500	108
Biomasse	0,1 (brutto)	3	5500	17
Wasserkraft <sup>1)</sup>	0,05 (netto)	7	3800	27
<b>Summe</b>	<b>6</b>	<b>187</b>		<b>460 (35 %)</b>

<sup>1)</sup> Ausbauziele für Wind-Offshore: 6,5 GW bis 2020 und 15 GW bis 2030, keine Ziele für die Wasserkraft

<sup>2)</sup> durchschnittliche Anlagenlebensdauer 20 Jahre

Folglich bedarf es einer dringenden und umfassenden Anhebung der Ausbaukorridore für Windkraft- und Photovoltaikanlagen und nicht einer Kürzung. Wie die geplanten zusätzlichen Reduktionen der Ausbauziele für die Windkraft mit den Klimaschutzkenntnissen zu vereinbaren sind, lässt sich auch bei bestem Willen nicht erkennen (vgl. Anhang).

Bild 15 zeigt den Verlauf der regenerativen Stromerzeugung bei dauerhaftem Einhalten der Zielkorridore aus dem EEG 2014 und stellt diese dem Stromverbrauch bei erfolgreichem Klimaschutz mit Sektorkopplung gegenüber. Im Jahr 2040 können dabei erneuerbare Energien gerade einmal rund 35 % des Bedarfs decken. Ein erfolgreicher Klimaschutz ist damit unmöglich.



**Bild 15** Entwicklung der regenerativen Stromerzeugung und des Stromverbrauchs bis 2040 bei dauerhaftem Einhalten der EEG-Zielkorridore aus dem EEG 2014 bei Berücksichtigung von Effizienzmaßnahmen

Da diese Zusammenhänge zumindest in groben Zügen den politisch Verantwortlichen bekannt sein sollten, kann entweder davon ausgegangen werden, dass das **Verfehlen der Pariser Klimaschutzziele bewusst in Kauf genommen** oder bereits jetzt auf eine **nachträgliche Korrektur durch umfangreiche CCS-Maßnahmen** gesetzt wird. Hier müsste das zu viel emittierte Kohlendioxid durch umstrittene, aufwändige und teure technische Maßnahmen wieder aus der Atmosphäre entfernt und sicher untertage endgelagert werden.

Im Folgenden soll daher der nötige Zubau erneuerbarer Kraftwerke bestimmt werden, mit dem ein erfolgreicher Klimaschutz auch ohne CCS-Maßnahmen gewährleistet wer-

den kann. Bei der Onshore-Windkraft wird dabei unterstellt, dass aus Akzeptanzgründen maximal 2 % der Landesfläche Deutschlands für die Errichtung von Windkraftanlagen genutzt werden kann. Hierbei werden die Erkenntnisse der BWE-Potenzialstudie [BWE11] zugrunde gelegt. **Die an Land installierbare Windkraftleistung** beträgt dann **rund 200 GW**. Bis zum Jahr 2040 kann diese Leistung mit einem **Nettozubau** von **rund 6,3 GW pro Jahr** erreicht werden. Denkbar ist, durch größere Rotoren die Zahl der Volllaststunden weiter zu erhöhen und damit das Potenzial der Stromerzeugung noch etwas zu steigern. Dadurch ließen sich die Installationszahlen der Offshore-Windkraft und der Photovoltaik geringfügig reduzieren.

Bei der **Photovoltaik** wird unterstellt, dass gut 200 GW im Gebäudebereich installiert werden können. Wenn noch einmal die gleiche Menge im Freiflächenbereich installiert wird, wodurch inklusive Abstandsflächen rund 1 % der Landesfläche benötigt würden, ergibt sich bei einem **Nettozubau von 15 GW pro Jahr eine installierbare Photovoltaikleistung von 415 GW** bis zum Jahr 2040.

Der Biomasseanteil wird durch den weiteren Zubau weitgehend konstant gehalten, wobei die heutigen Anlagen sukzessive durch flexiblere Anlagen mit deutlich geringen Volllaststunden ersetzt werden. Hierdurch können die Möglichkeiten der Biomasse, einen Beitrag zum Ausgleich von Fluktuationen zu leisten, deutlich gesteigert werden. Die Ausbaumöglichkeiten der Wasserkraft in Deutschland sind sehr begrenzt, sodass mit keinem nennenswerten Beitrag für eine schnelle Dekarbonisierung zu rechnen ist.

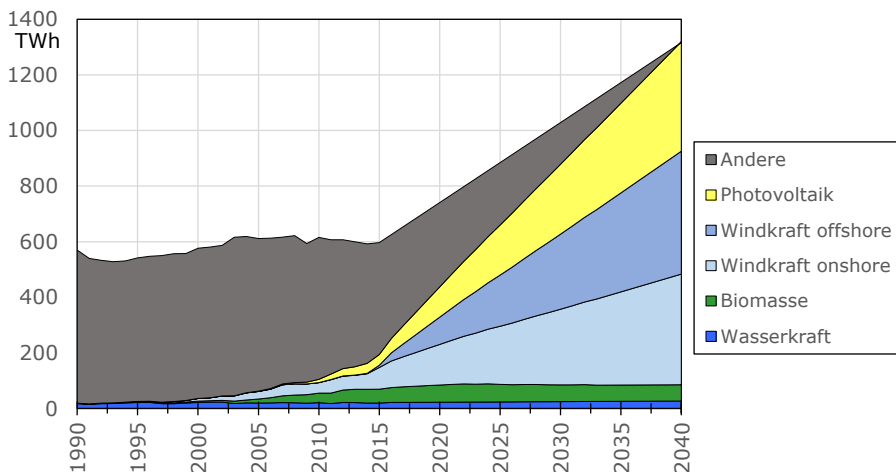
Der verbleibende Strombedarf muss dann durch die **Offshore-Windkraft** gedeckt werden. Mit einem **Nettozubau von 2,9 GW** können bis zum Jahr 2040 **insgesamt 76 GW an installierter Leistung** errichtet werden. Das Verhältnis der Stromerzeugung der Windkraft zur Photovoltaik beträgt dann rund zwei zu eins. Dies ist ein guter Wert, um den saisonalen Speicherbedarf gering zu halten, da die Photovoltaik im Sommer und die Windkraft im Winter jeweils höhere Deckungsbeiträge liefern.

Tabelle 13 fasst die Überlegungen zusammen. Die Werte für die installierte Leistung liegen dabei etwas über den Werten von [ISE12; ISE15], wobei in [ISE12] der Verkehrssektor nicht berücksichtigt und in [ISE15] keine vollständige Dekarbonisierung erreicht wurde. Insofern ist die Höhe der erforderlichen Leistung bereits durch mehrere Studien abgesichert. Bild 16 stellt die resultierende regenerative Erzeugung dem ermittelten Strombedarf gegenüber.

**Tabelle 13** Entwicklung der regenerativen Stromerzeugung bis 2040 zum Erreichen einer klimaneutralen Energieversorgung bei Berücksichtigung von Effizienzmaßnahmen

Erzeugung	Jährlicher Ausbau in GW	Installierte Leistung 2040 in GW	Volllaststunden in h/a	Stromerzeugung 2040 in TWh <sup>1)</sup>
Photovoltaik	15,0 (netto)	415	950	394
Windkraft onshore	6,3 (netto)	199	2500	498
Windkraft offshore	2,9 (netto)	76	4500	343
Biomasse	1 (brutto)	20	2750	58
Wasserkraft	0,05 (netto)	7	3800	27
Summe	25,25	717		1320 (100 %)

<sup>1)</sup> durchschnittliche Anlagenlebensdauer 20 Jahre



**Bild 16** Entwicklung der regenerativen Stromerzeugung und des Stromverbrauchs bis 2040 zum Erreichen einer klimaneutralen Energieversorgung bei Berücksichtigung von Effizienzmaßnahmen

Prinzipiell sind auch unter den einzelnen regenerativen Erzeugungsmöglichkeiten noch leichte Verschiebungen möglich. Die generelle Größenordnung des erforderlichen Ausbaus wird sich dadurch aber kaum ändern.

**Vergleicht man den für den Klimaschutz benötigten Ausbaupfad mit den aktuellen Zielkorridoren, zeigt sich eine enorme Diskrepanz.** Je länger mit dem schnellen Hochfahren des Ausbaus erneuerbarer Energien gewartet wird, umso schwieriger wird das Einhalten der Klimaschutzziele.

### Zusammenfassung der Kernaussagen von Kapitel 5

- Um die Pariser Klimaschutzziele einzuhalten und bis zum Jahr 2040 eine weitgehend kohlendioxidneutrale Energieversorgung zu realisieren, muss ein wesentlicher Teil des Energiebedarfs der Sektoren Wärme und Transport durch elektrische Energie gedeckt werden.
- Ohne ambitionierte Effizienzmaßnahmen vervüffacht sich der Strombedarf. Diesen durch erneuerbare Energien in Deutschland oder Importe zu decken ist unrealistisch.
- Bei Umsetzen ambitionierter Effizienzmaßnahmen steigt der Strombedarf von derzeit rund 600 TWh auf „nur“ 1320 TWh. Dieser ließe sich aber prinzipiell mit erneuerbaren Energien in Deutschland decken.
- Mit den Ausbaukorridoren des EEG 2014 können erneuerbare Energien im Jahr 2040 lediglich 35 % des Bedarfs decken. Ein erfolgreicher Klimaschutz ist damit unmöglich.
- Die politisch Verantwortlichen verfügen folglich entweder nicht über die nötigen Sachkenntnisse, beabsichtigen die UN-Klimaschutzverpflichtungen nicht einzuhalten oder setzen darauf, die Zielverfehlungen künftig durch umfangreiche und teure CCS-Maßnahmen zu korrigieren.
- Um einen erfolgreichen Klimaschutz ohne CCS zu realisieren, muss der Ausbau erneuerbarer Energien deutlich angehoben werden.
- Für die Onshore-Windkraft wird im Jahr 2040 eine installierte Leistung von 200 GW empfohlen. Der erforderliche Nettozubau zum Erreichen dieses Ziels beträgt 6,3 GW pro Jahr.
- Für die Photovoltaik wird im Jahr 2040 eine installierte Leistung gut 400 GW empfohlen. Der erforderliche Nettozubau zum Erreichen dieses Ziels beträgt 15 GW pro Jahr.
- Für die Offshore-Windkraft wird im Jahr 2040 eine installierte Leistung von 76 GW empfohlen. Der erforderliche Nettozubau zum Erreichen dieses Ziels beträgt 2,9 GW pro Jahr.
- Um einen schnellen Kohleausstieg realisieren zu können, ist eine stark forcierte Errichtung von Batterie- und Power-To-Gas-Anlagen dringend erforderlich. Diese müssen fossile Kraftwerke bei der Erbringung von Systemdienstleistungen ablösen und Fluktuationen von Windkraft- und Photovoltaikanlagen ausgleichen.

## 6 SCHLUSSFOLGERUNGEN

---

Aus den Ergebnissen der Studie lassen sich zusammenfassend folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Für einen erfolgreichen Klimaschutz müssen die Sektoren Strom, Wärme und Verkehr bis zum Jahr 2040 vollständig dekarbonisiert werden.
- Kohlekraftwerke zählen zu den größten Verursachern von Kohlendioxidemissionen. Der Kohleausstieg sollte daher spätestens 2030 abgeschlossen sein. Hierfür ist auch die schnelle Errichtung von Speichern erforderlich.
- Mit der jetzigen Energiepolitik und den Zubaukorridoren für den Ausbau der regenerativen Stromerzeugung im EEG können regenerative Energien bis zum Jahr 2040 nur bis zu 35 % des erforderlichen Bedarfs decken. Das Einhalten der Pariser Klimaschutzvereinbarungen ist damit absolut unmöglich.
- Künftig wird auch ein großer Teil des Energiebedarfs in den Sektoren Wärme und Transport durch elektrischen Strom aus Solar- und Windkraftanlagen gedeckt werden müssen. Dadurch steigt der Stromverbrauch von derzeit 628 TWh auf mindestens 1320 TWh.
- Werden keine ambitionierten Effizienzmaßnahmen umgesetzt, kann sich der Strombedarf verfünffachen und auf über 3000 TWh ansteigen. Dieser Bedarf lässt sich bis 2040 nicht durch erneuerbare Energien in Deutschland decken.
- Aus Effizienzgründen scheiden künftig Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren sowie Gasheizungen und KWK-Anlagen aus.
- Möglichst ab 2025, spätestens aber ab 2030, sollten daher in Deutschland keine Neufahrzeuge mit Verbrennungsmotoren mehr zugelassen werden. Die wichtigsten Fernstraßen sind mit elektrischen Oberleitungen zu versehen.
- Gas-Brennwertkessel und KWK-Anlagen dürfen ab dem Jahr 2020 nicht mehr neu gebaut werden. Stattdessen müssen effiziente Wärmepumpen die Gebäudewärmeversorgung und Warmwasserbereitung weitgehend übernehmen.
- Durch Gebäudesanierung sollte der Wärmebedarf der Gebäude in den nächsten 25 Jahren möglichst um 30 bis 50 % gesenkt werden.
- Für die regenerative Stromerzeugung wird für das Jahr 2040 für Onshore-Windkraft eine installierte Leistung von 200 GW, für die Offshore-Windkraft von 76 GW und für die Photovoltaik von 400 GW empfohlen. Der erforderliche Nettozubau beträgt für die Onshore-Windkraft 6,3 GW, für die Offshore-Windkraft 2,9 GW und für die Photovoltaik 15 GW pro Jahr.

## LITERATURVERZEICHNIS

---

- [BmUB16] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BmUB), Hrsg.: Nationale Klimapolitik. Internet: <http://www.bmub.bund.de/themen/klima-energie/klimaschutz/nationale-klimapolitik/>, zuletzt aufgerufen am 10.05.2016
- [BMVI15] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Hrsg.: Verkehr in Zahlen 2015/16. Berlin: BMVI 2015
- [BMWi16] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Hrsg.: Energiedaten. Berlin: BMWi, Fassung vom 12.01.2016
- [BWE11] Bundesverband Windenergie (BWE), Hrsg.: Potenzial der Windenergienutzung an Land. Berlin: BWE, 2011
- [EEG14] Erneuerbare-Energien-Gesetz von 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066)
- [Gre16] Höhne, Niklas; Kuramochi, Takeshi; Sterl, Sebastian; Röschel, Lina NewClimate Institute im Auftrag von Greenpeace: Was bedeutet das Pariser Abkommen für den Klimaschutz in Deutschland? Hamburg: Greenpeace, 2016
- [IPC13] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Hrsg.: Climate Change 2013, The Physical Science Basis. New York: Cambridge University Press, 2013
- [ISE12] Henning, Hans-Martin; Palzer, Andreas, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE): 100 % Erneuerbare Energien für Strom und Wärme in Deutschland. Freiburg: ISE, 2012
- [ISE15] Henning, Hans-Martin; Palzer, Andreas, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE): Was kostet die Energiewende? Wege zur Transformation des deutschen Energiesystems bis 2050. Freiburg: ISE, 2015
- [IWES15] Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), Hrsg.: Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr. Kassel: IWES, 2015
- [UBA10] Umweltbundesamt (UBA), Hrsg.: Energieziel 2050. Dessau: UBA, 2010
- [UBA13] Umweltbundesamt (UBA), Hrsg.: Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Dessau: UBA, 2013
- [UBA16a] Umweltbundesamt (UBA), Hrsg.: Daten zur Umwelt. Dessau: UBA, 2016
- [UBA16b] Umweltbundesamt (UBA), Hrsg.: Übersicht zur Entwicklung der energiebedingten Emissionen und Brennstoffeinsätze in Deutschland 1990-2014. Dessau: UBA, 2016

# ANHANG

## A.1 Auswirkungen einer Änderung der aktuellen EEG-Zubaukorridore für den Onshore-Windzubau von 2500 MW netto auf 2500 MW brutto

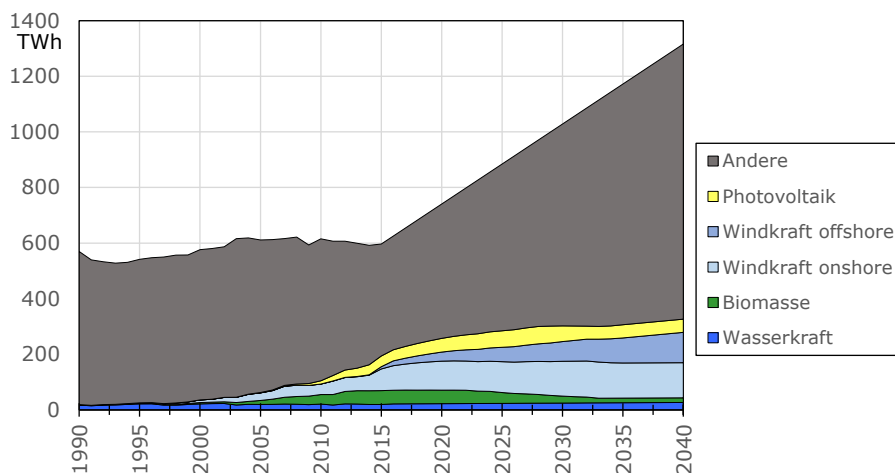
**Tabelle 14** Entwicklung der regenerativen Stromerzeugung bis 2040 bei dauerhaftem Einhalten der EEG-Zielkorridore aus dem EEG 2014 [EEG14] bei Änderung des Onshore-Windenergiezubaus von 2500 MW netto auf 2500 MW brutto<sup>1)</sup> gemäß den Diskussionen zur Änderung des EEG 2016

Erzeugung	Jährlicher Ausbau in GW	Installierte Leistung 2040 in GW	Volllaststunden in h/a	Stromerzeugung 2040 in TWh <sup>3)</sup>
Photovoltaik	2,5 (brutto)	50	950	48
<b>Windkraft onshore</b>	<b>2,5 (brutto)</b>	<b>50</b>	<b>2500</b>	<b>125</b>
Windkraft offshore <sup>2)</sup>	0,85 (netto)	24	4500	108
Biomasse	0,1 (brutto)	3	5500	17
Wasserkraft <sup>2)</sup>	0,05 (netto)	7	3800	27
<b>Summe</b>	<b>6</b>	<b>134</b>		<b>325 (25 %)</b>

<sup>1)</sup> brutto: fixe Neuinstallation ohne Ersatz von Altanlagen; netto: Neuinstallation zzgl. Ersatz von Altanlagen

<sup>2)</sup> Ausbauziele für Wind-Offshore: 6,5 GW bis 2020 und 15 GW bis 2030, keine Ziele für die Wasserkraft

<sup>3)</sup> durchschnittliche Anlagenlebensdauer 20 Jahre



**Bild 17** Entwicklung der regenerativen Stromerzeugung und des Stromverbrauchs bis 2040 bei dauerhaftem Einhalten der EEG-Zielkorridore aus dem EEG 2014 bei Änderung des Onshore-Windenergiezubaus von 2500 MW netto auf 2500 MW brutto unter Berücksichtigung von Effizienzmaßnahmen

## A.2 Auswirkungen einer Änderung der aktuellen EEG-Zubaukorridore für den Onshore-Windzubau von 2500 MW netto auf 2800 MW brutto

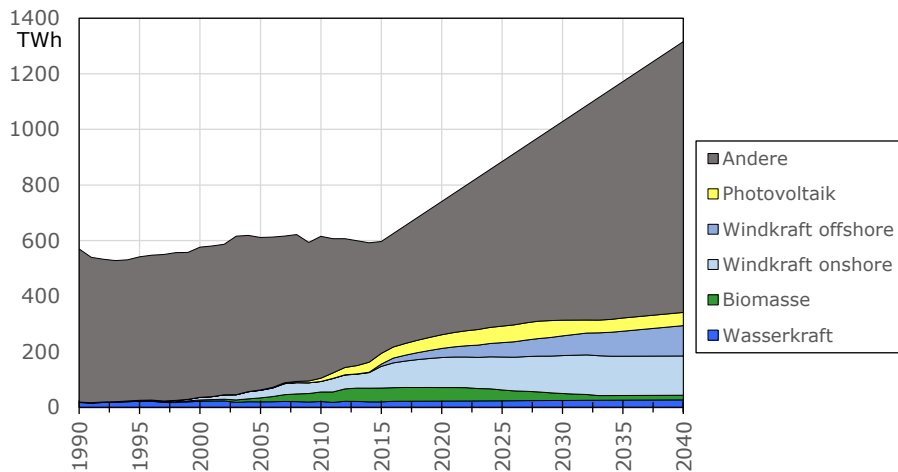
**Tabelle 15** Entwicklung der regenerativen Stromerzeugung bis 2040 bei dauerhaftem Einhalten der EEG-Zielkorridore aus dem EEG 2014 [EEG14] bei Änderung des Onshore-Windenergiezubaues von 2500 MW netto auf 2800 MW brutto<sup>1)</sup> gemäß den Diskussionen zur Änderung des EEG 2016

Erzeugung	Jährlicher Ausbau in GW	Installierte Leistung 2040 in GW	Volllaststunden in h/a	Stromerzeugung 2040 in TWh <sup>3)</sup>
Photovoltaik	2,5 (brutto)	50	950	48
<b>Windkraft onshore</b>	<b>2,8 (brutto)</b>	<b>56</b>	<b>2500</b>	<b>140</b>
Windkraft offshore <sup>2)</sup>	0,85 (netto)	24	4500	108
Biomasse	0,1 (brutto)	3	5500	17
Wasserkraft <sup>2)</sup>	0,05 (netto)	7	3800	27
<b>Summe</b>	<b>6</b>	<b>140</b>		<b>340 (26 %)</b>

<sup>1)</sup> brutto: fixe Neuinstallation ohne Ersatz von Altanlagen; netto: Neuinstallation zzgl. Ersatz von Altanlagen

<sup>2)</sup> Ausbauziele für Wind-Offshore: 6,5 GW bis 2020 und 15 GW bis 2030, keine Ziele für die Wasserkraft

<sup>3)</sup> durchschnittliche Anlagenlebensdauer 20 Jahre



**Bild 18** Entwicklung der regenerativen Stromerzeugung und des Stromverbrauchs bis 2040 bei dauerhaftem Einhalten der EEG-Zielkorridore aus dem EEG 2014 bei Änderung des Onshore-Windenergiezubaues von 2500 MW netto auf 2800 MW brutto unter Berücksichtigung von Effizienzmaßnahmen

<http://pv-speicher.htw-berlin.de>  
<http://www.volker-quaschnig.de>



Hochschule für Technik  
und Wirtschaft Berlin

University of Applied Sciences