

Systemanalyse zur Transformation der Energiesysteme bis 2050

1. Klimaschutz und Transformation der Energiesysteme

Klimaschutz muss ein vorrangiges Ziel gegenwärtiger Politik sein. Denn nur durch die Begrenzung des durch den Menschen verursachten Klimawandels lassen sich die Lebensbedingungen auf der Erde, so wie wir sie kennen, aufrechterhalten. Es ist mittlerweile nicht nur in der Wissenschaft, sondern auch in der Politik ein weithin anerkanntes Ziel, eine globale Erwärmung von mehr als 2 °C zu vermeiden. Eine darüber hinausgehende Klimaerwärmung hätte sehr wahrscheinlich gefährliche irreversible und kaum beherrschbare Folgen für Natur und Gesellschaft. Um die 2 °C-Leitplanke einzuhalten ist aber eine drastische Reduktion der Treibhausgasemissionen notwendig.

Dies betrifft insbesondere die Emissionen von CO₂, dem wichtigsten durch menschliche Aktivi-

täten verstärkt in die Atmosphäre eingetragenen klimarelevanten Gas. Das Ausmaß der weiteren anthropogenen Klimaerwärmung hängt weitgehend davon ab, wie schnell es gelingt, die globalen CO₂-Emissionen zu senken. Da die größte Emissionsquelle die Nutzung fossiler Brennstoffe für energetische Zwecke ist, kommt es wesentlich darauf an, diese zu reduzieren. Der vom WBGU entwickelte Budget-Ansatz [1] geht davon aus, dass bis zur Jahrhundertmitte höchstens noch etwa 750 Mrd. t CO₂ aus fossilen Quellen in die Atmosphäre eingetragen werden dürfen, wenn die 2 °C-Leitplanke mit einer Wahrscheinlichkeit von zwei Dritteln eingehalten werden soll. Nach 2050 dürften dann nur noch kleine Mengen CO₂ ausgestoßen werden. Die Zeit der von der Nutzung fossiler Energieträger angetriebenen Weltwirtschaft muss also noch in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts zu Ende gehen. Die dafür notwendigen energetischen Potenziale der Erneuerbaren und die Technologien für ihre Nutzung



Fraunhofer IWES

Prof. Dr. Jürgen Schmid

juergen.schmid@iwes.fraunhofer.de

Dr. Matthias Günther

matthias.guenther@iwes.fraunhofer.de

ZSW

Prof. Dr. Frithjof Staiß

frithjof.staiss@zsw-bw.de

DLR

Dr. Thomas Pregger

thomas.pregger@dlr.de

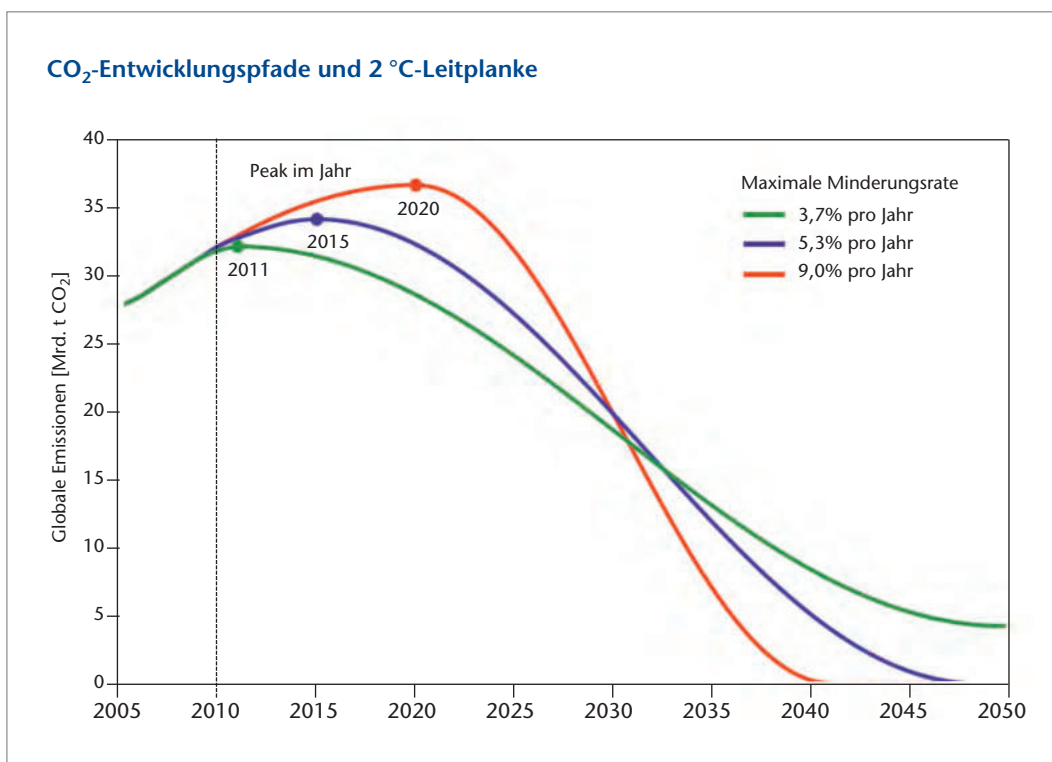


Abbildung 1

Mögliche Entwicklung der globalen CO₂-Emissionen, die mit der Einhaltung der 2 °C-Leitplanke kompatibel sind. Je später der Reduktionspfad eingeschlagen wird, desto steiler wird die nachfolgende Verringerung der Emissionen erfolgen müssen.

Quelle: WBGU [1]

sind vorhanden. Die beiden grundlegenden Strategien hierfür sind konsequente Effizienzmaßnahmen und der dynamische Ausbau der Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien (EE).

Es ist wichtig, den Prozess der Dekarbonisierung der Wirtschaft allgemein und speziell der Energiesysteme so früh wie möglich konsequent voranzubringen. Je länger damit gewartet wird, desto steiler würden die CO₂-Emissionen nachfolgend sinken müssen, um die 2 °C-Leitplanke doch noch einhalten zu können. *Abbildung 1* veranschaulicht dies.

Sehr große Minderungsraten sind aber in der Praxis oft nur schwer realisierbar, denn sie verlangen hohe Investitionen in kurzer Zeit und sind in vielen Fällen nur schwer mit den normalerweise recht langen Lebenszyklen von Energiesystemen vereinbar. Umso mehr kommt es daher darauf an, kohlenstoffarme Technologiepfade rasch und konsequent einzuschlagen.

Aufgrund der globalen Natur der Klimaveränderung ist dies eine globale Aufgabe. Einzelne Länder können und müssen dabei aber eine Vorreiterrolle spielen und dabei die wirtschaftliche und technisch-strukturelle Machbarkeit und Vorteilhaftigkeit aufzeigen. Deutschland bzw. Europa sollten die Dekarbonisierung der Wirtschaft und der Energiesysteme deshalb weiterhin vorantreiben. Dies war und ist zunächst mit hohen Investitionen und Mehrkosten bei der Energieerzeugung verbunden, doch mittel- und langfristig eröffnet eine solche Strategie im Gegensatz zu einer fossil-nuklearen Energieversorgung enorme wirtschaftliche Chancen.

Deutschland ist heute weitgehend abhängig von Energieimporten. Hinzu kommt, dass geografisch nahe liegende fossile Ressourcen an Ergiebigkeit verlieren. Die Ölförderung in der Nordsee ist in den letzten Jahren zurückgegangen; ebenso kann die eigene Stein- und Braunkohle immer weniger wirtschaftlich genutzt werden. Eine rechtzeitige Anpassung an die zunehmende Verknappung bzw. Verteuerung von fossilen Energierohstoffen ist folglich von langfristigem volkswirtschaftlichem Nutzen und wichtig für die Versorgungssicherheit.

Forschung und Entwicklung im Bereich der Energieeffizienz und der Nutzung erneuerbarer Energiequellen schaffen darüber hinaus Wettbe-

werbsvorteile in Zukunftsmärkten. Dieser Vorteil kann durch die Möglichkeit, als „first mover“ volkswirtschaftliche Vorleistungen für Nachahmer zu erbringen, leicht geschmälert werden, doch sollte dieser Aspekt nicht dazu führen, die vielfältigen Chancen der konsequenten Entwicklung von Zukunftstechnologien aus dem Blick zu verlieren.

Der weitere konsequente Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energie ist also nicht nur aufgrund der Klimaproblematik unerlässlich, sondern angesichts der sich verknappenden und verteuernenden fossilen Energierohstoffe auch volkswirtschaftlich und politisch geboten. Darüber hinaus wird das Energiesystem durch den Einsatz erneuerbarer Energien wesentlich effizienter, da der Einsatz von Primärenergie stark reduziert werden kann.

2. Ein Entwicklungspfad für Deutschland

Die Leitstudie 2010 für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland wurde von den FVEE-Instituten DLR und Fraunhofer IWES sowie vom Ingenieurbüro IfnE für das BMU verfasst [3]. Hier wird ein möglicher Entwicklungspfad des Energiesystems in Deutschland vorgestellt, der eine starke Reduktion der nationalen Treibhausgasemissionen bis 2050 ermöglicht.

Die Studie berücksichtigt insbesondere das klimapolitische Ziel des Energiekonzepts 2010 der Bundesregierung, die Treibhausgasemissionen um mindestens 80 % bis zum Jahr 2050 zu mindern (bezogen auf die Emissionen im Jahr 1990), was eine Minderung der energiebedingten CO₂-Emissionen um mindestens 85 % erfordert.

In der folgenden Grafik ist die Entwicklung der Primärenergie im zielerfüllenden Hauptszenario der Leitstudie 2010 aufgetragen, die 2050 nur noch 47 % der im Jahr 2008 aufgewandten Primärenergie beträgt.

Möglich wird die starke Reduktion des Primärenergiebedarfs einerseits durch Energieeffizienzmaßnahmen, die den Energieaufwand insbesondere auf der Konsumentenseite reduzieren. Andererseits kommt auf der Produzentenseite noch ein weiterer Effekt hinzu: die „automatische“ Verringerung des Primärenergieaufwands allein durch die Substitution fossiler Energien durch

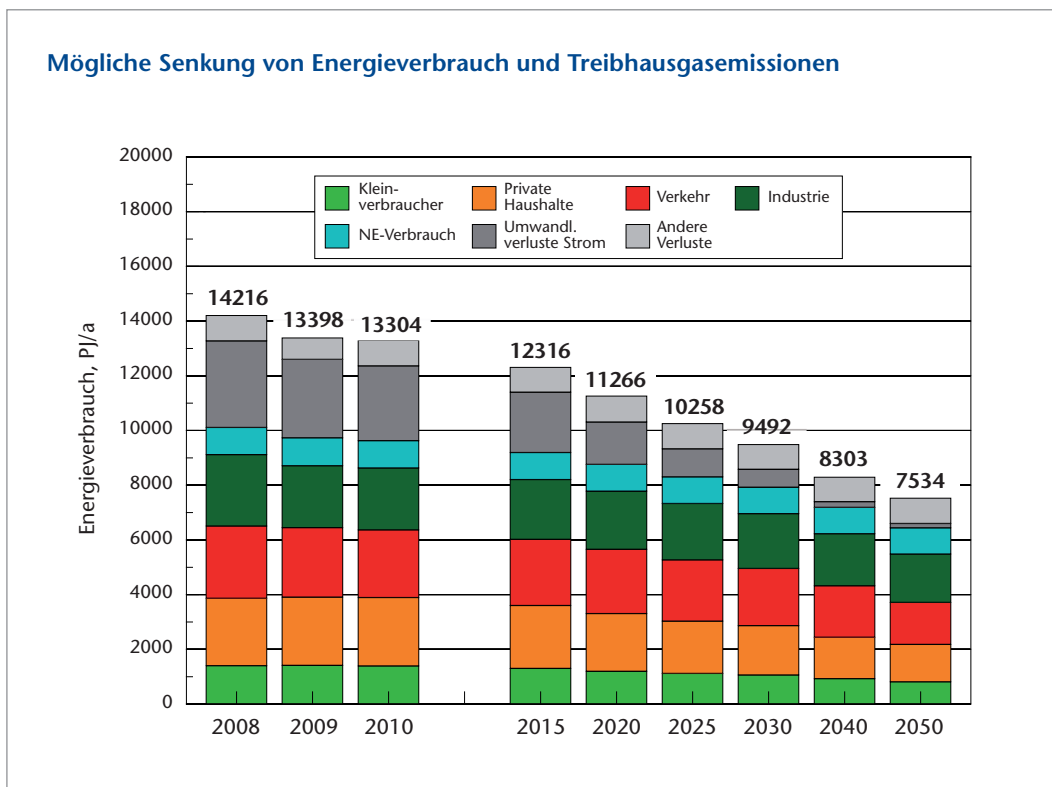


Abbildung 2

Möglicher Entwicklungspfad des Primärenergieaufwands in Deutschland, der bis zum Jahr 2050 zu einer Verminderung der CO₂-Emissionen um 85 % und zu einer Verminderung der Treibhausgasemissionen überhaupt um 80 % führt (im Vergleich zu den Emissionen von 1990).

Quelle: Leitstudie 2010 [3]

Erneuerbare. Denn die erneuerbaren Quellen „verbrauchen“ sich nicht. Das heißt bei elektrischer Energie aus erneuerbaren Quellen kann Endenergie gleich Primärenergie gesetzt werden, weil es keine Umwandlungsverluste gibt, wie etwa bei der Wandlung chemischer Energie von fossilen Energieträgern in elektrische Energie.

Tatsächlich hängt ein ganz wesentlicher Teil der Reduktion des Primärenergieaufwands mit der verstärkten Nutzung erneuerbarer Energiequellen und der damit vermiedenen Wärmeverluste (insbesondere der konventionellen Kondensationskraftwerke) zusammen. Wir wollen dies anhand möglicher Entwicklungspfade für die drei Sektoren Strom, Wärme und Verkehr darlegen.

Stromsektor

Abbildung 3 zeigt die strukturelle Entwicklung der Stromerzeugung bis 2050 aus der Leitstudie 2010 [3]. Sie ist vor allem durch die starke Zunahme der Stromerzeugung auf der Basis von erneuerbaren Energiequellen gekennzeichnet. 86 % des Stroms würde demnach im Jahr 2050 aus erneuerbaren Quellen stammen, was die im Energiekonzept der Bundesregierung vorgegebene

Zielvorgabe eines Anteils von mindestens 80 % der Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen am Bruttostromverbrauch im Jahr 2050 erfüllt [2]. Gleichzeitig werden die großen Kondensations-Grundlastkraftwerke nahezu vollständig verschwinden. Dies betrifft Kernkraftwerke, die in Deutschland nach neuer Beschlusslage der Bundesregierung bis 2022 vollständig vom Netz gehen sollen; es betrifft aber auch Kohlekraftwerke. In der neuen Erzeugungsstruktur mit immer größeren Anteilen fluktuierender Quellen sind Grundlastkraftwerke, auf denen unsere Stromerzeugung bislang zu einem großen Teil beruht, bei dauerhaftem Einspeisevorrang der Erneuerbaren nicht mehr oder nur noch eingeschränkt ökonomisch zu betreiben und es kommt zum Systemkonflikt durch lokale Netzengpässe. Auf Gas und Kohle basierte Stromerzeugung wird demnach im Jahre 2050 nur noch in geringerem Umfang in der Form von effizienter Kraft-Wärme-Kopplung betrieben.

Nach dem dargestellten Szenario wird ein großer Anteil der Stromerzeugung in Deutschland auf der Nutzung der Windenergie (onshore und offshore) beruhen. Photovoltaik wird ebenso einen wachsenden Beitrag leisten können. Fossil

Abbildung 3
Möglicher Entwicklungspfad der Bruttostromerzeugung in Deutschland (einschließlich des Strombezugs aus dem Ausland) mit einem Anteil von Strom aus Erneuerbaren von 86% im Jahre 2050.

Quelle: Leitstudie 2010 [3]

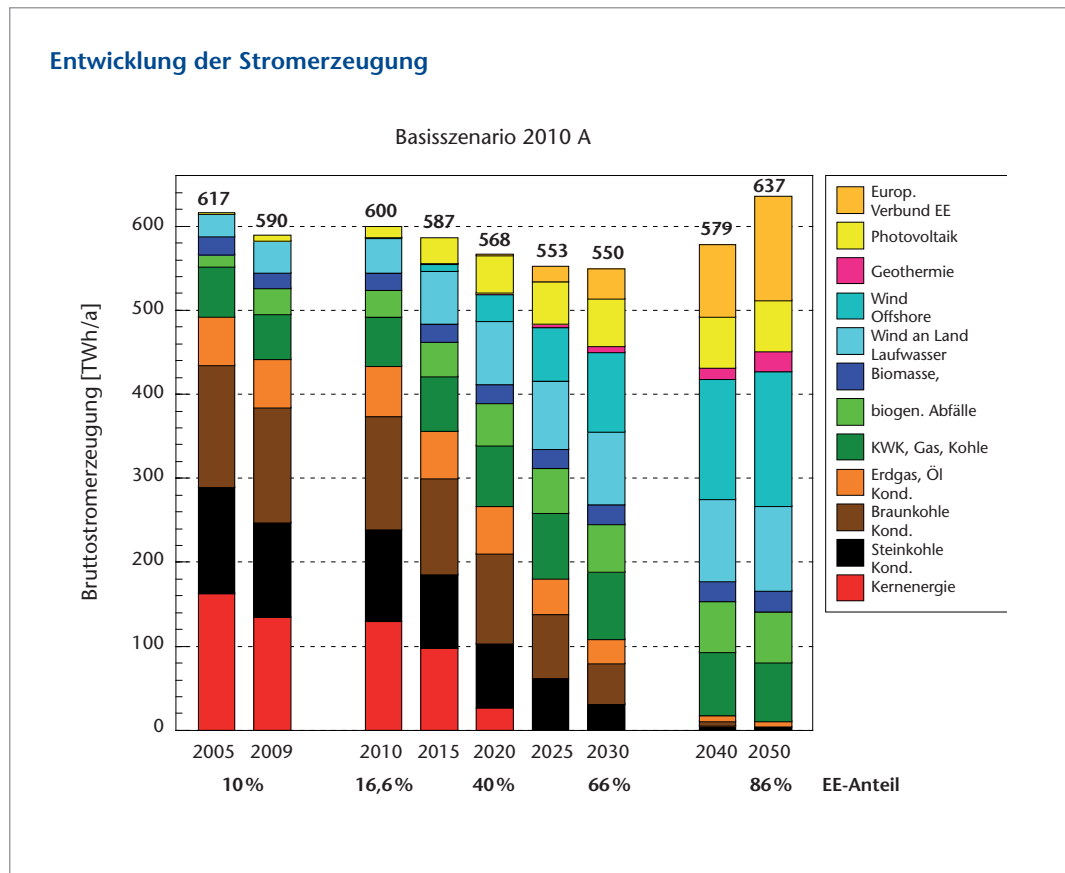
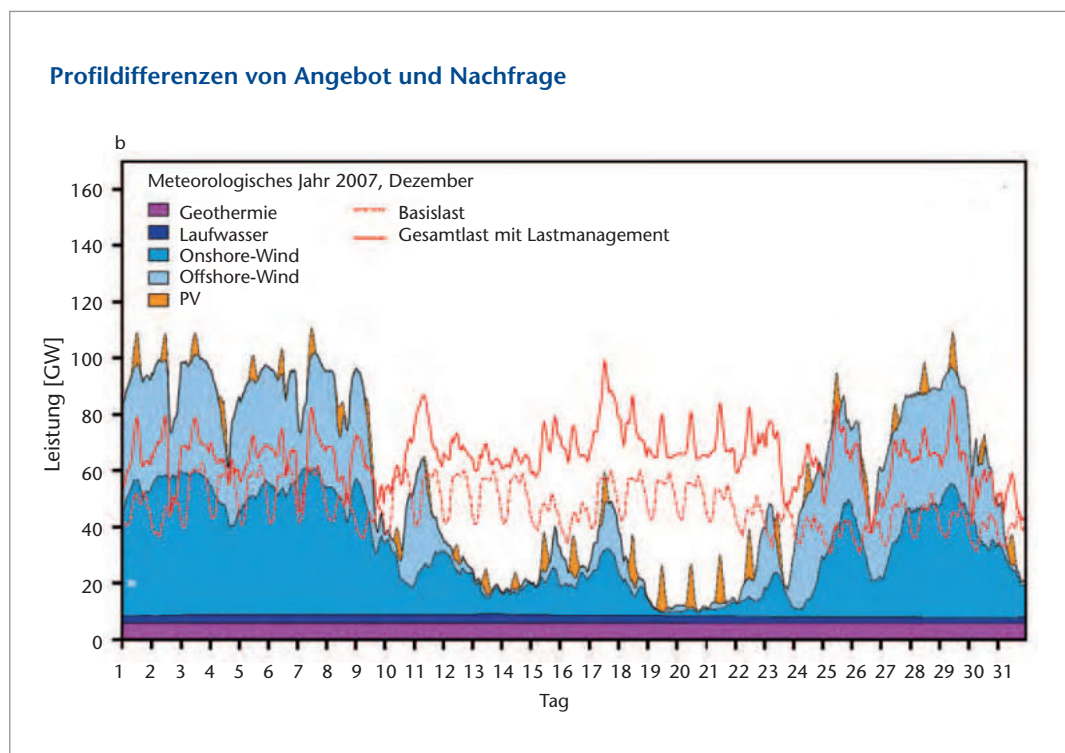


Abbildung 4
Simulierte Einspeisung aus erneuerbaren Energien (farbige Flächen) projiziert auf 2050 unter Annahme weite- ren kräftigen Ausbaus der Nutzung erneuerbarer Energiequellen. Das Energiesystem muss Mittel haben, trotz dieser starken Schwankungen eine sichere Stromversorgung zu gewährleisten.

Quelle: Klaus et al. 2010 [4]



basierte Kraft-Wärme-Kopplung und Biomasse-Kraftwerke werden begrenzt an der Stromproduktion teilhaben, im Falle der Biomasse aufgrund der begrenzten nachhaltigen Potenziale.

Beruhet die Stromerzeugung weitgehend auf fluktuierenden erneuerbaren Energiequellen, dann tritt das Problem auf, dass die fluktuierende Stromerzeugung eine Nachfrage bedienen soll, die ihrem eigenen zeitlichen Rhythmus folgt. Dabei kann es temporär sowohl zu einem Energieüberangebot als auch zu einem Unterangebot kommen (siehe *Abbildung 4*).

Momentan beträgt die installierte Leistung der Windkraft und der Photovoltaik in Deutschland etwa 50 GW, während die maximal nachgefragte Last etwa bei etwa 80 GW liegt. Beim weiteren Ausbau der Nutzung von Wind- und Solarenergie, so wie er im Nationalen Aktionsplan für erneuerbare Energie der Bundesregierung eingeplant ist, wird die installierte Leistung bald die genannte Höchstlast überschreiten, so dass es schon bald zu Überangebotsperioden kommen kann. Ebenso wird es dargebotsabhängig auch zu mehrtägigen Episoden mit keiner oder nur sehr geringer erneuerbaren Erzeugung kommen. In einem Stromerzeugungssystem, das langfristig vorrangig auf Wind und Sonne beruht, müssen deshalb Wege gefunden werden, genügend gesicherte Leistung auch bei geringem oder fehlendem EE-Angebot bereitzustellen, ebenso muss ein überschüssiges Angebot in geeigneten Anlagen zwischengespeichert oder genutzt werden können. Eine Herausforderung hierbei stellen die recht starken Gradienten in der Verfügbarkeit erneuerbarer Energiequellen dar, die den Einsatz entsprechend schnell reagierender Ausgleichsmechanismen erforderlich machen.

Zumindest für eine Übergangszeit werden flexible Gaskraftwerke, zunehmend mit Kraft-Wärme-Kopplung, eine große Rolle beim Ausgleich des fluktuierenden Angebots von Wind- und Solarstrom spielen. Ebenso kann eine große Anzahl von kleinen Systemen der Objektversorgung wie Blockheizkraftwerke, Mikroturbinen und Brennstoffzellen dazu beitragen, gegebenenfalls auftretende Stromlücken zu schließen.

Ein langfristig wichtiger Teil der Lösung wird auch der zunehmende Ausbau eines weitreichenden Verbundnetzes zum Austausch von Strom aus erneuerbaren Energien spielen. Großflächige

Verbundnetze mit hinreichenden Übertragungskapazitäten erlauben, Energie von Orten mit momentanem Überangebot in Gegenden mit momentanem Strommangel zu leiten. Im Szenario, das in *Abbildung 3* dargestellt ist, ist ein solches Verbundnetz innerhalb Europas – oder auch darüber hinaus, wie es etwa das Desertec-Konzept vorsieht – und die damit einhergehende Möglichkeit des Imports von Strom aus erneuerbaren Quellen berücksichtigt.

Der Ausbau der Übertragungsnetze auf europäischer Ebene und darüber hinaus ist also eine wichtige Voraussetzung für den Umbau der Stromerzeugung. In Deutschland ist der Ausbau der Übertragungskapazitäten auch wichtig, weil die Stromerzeugung in Deutschland mit Windkraft sich weiter zunehmend im norddeutschen Raum konzentrieren wird, während viele Verbraucherzentren im süddeutschen Raum liegen. Dies macht einen weiteren Ausbau der Übertragungskapazitäten auch innerhalb des Landes notwendig.

Die Studie Dena I bezifferte im Jahr 2005 den Bedarf an zusätzlichen Übertragungsleitungen auf 850 km, wenn der Anteil der Stromerzeugung auf Basis erneuerbarer Energiequellen auf 20 % anwächst. Dieser Anteil ist schon heute erreicht, doch von den zusätzlichen Übertragungsleitungen konnte bislang nur ein kleiner Teil realisiert werden. Netzbetreiber warnten in den letzten Jahren häufiger, dass die bestehenden Netze schon heute häufig an ihre Grenzen stoßen würden.

Um den Bedarf an zusätzlichen Übertragungskapazitäten, deren Aufbau in vielen Fällen gesellschaftlich schwierig und langwierig ist, möglichst gering zu halten, ist es wichtig, vorhandene Potenziale auf lokaler und regionaler Ebene zu nutzen. Strom, der in der Region bereitgestellt und verbraucht wird, muss nicht transportiert werden. In Deutschland wird dieser Weg einerseits in den so genannten 100 %-Erneuerbare-Energie-Regionen und andererseits mit der Förderung des Eigenverbrauchs verfolgt.

Soll auf der Basis fluktuierender Energiequellen eine stabile Energieversorgung aufgebaut werden, wird es auch von Bedeutung sein, die Energiespeicherkapazitäten zu erweitern. Mit zunehmenden Speicherkapazitäten kann ein großer Teil auftretender Energieüberangebote für Zeiten mangelnden Angebots verfügbar gemacht

werden. Verschiedene Speichertechnologien machen Systeme mit verschiedener Kapazität und Entladezeit möglich, die in das Energiesystem integriert werden können.

Die individuelle Elektromobilität könnte für die Stabilisierung der Stromversorgung nutzbar gemacht werden, indem die Aufladung der Batterien durch wirtschaftliche Anreizsysteme, d. h. Preissignale, so gelenkt wird, dass sie hauptsächlich zu Überangebotszeiten stattfindet. Doch auch wenn der Einsatz von Batteriespeichern durch einen zukünftigen Ausbau der Elektromobilität stark zunehmen kann, so wird doch ihre Gesamtkapazität für ein Lastmanagement im Energiesystem begrenzt sein.

Druckluftspeicherkraftwerke und Pumpspeicherwerke haben wesentlich größere Kapazitäten. Kavernen-Druckluftspeicher werden bisher nur sehr wenig genutzt – eines von weltweit zwei Druckluftspeicherkraftwerken ist im niedersächsischen Huntorf in Betrieb –, besitzen aber durchaus Ausbaumöglichkeiten. Pumpspeicherwerke haben eine weit längere Tradition und zeichnen sich darüber hinaus durch sehr geringe Speicherverluste aus. Die Ausbaumöglichkeiten für Pumpspeicherwerke sind jedoch in Deutschland sehr begrenzt.

Eine weitere Möglichkeit, Energie zu speichern, besteht in der Herstellung von Gasen als chemischen Speichern. Der Strom aus erneuerbaren Quellen kann dabei genutzt werden, um mittels Elektrolyse aus Wasser Wasserstoff und Sauerstoff zu gewinnen. Der erzeugte Wasserstoff kann dann als erneuerbarer Energieträger in Brennstoffzellen, Gasturbinen oder Verbrennungsmotoren eingesetzt werden. Trotz der dabei entstehenden hohen Energieverluste, kann dies ein sinnvoller Weg sein, überschüssigen erneuerbaren Strom zu nutzen, insbesondere wenn eine Nachfrage nach Wasserstoff in der Industrie gedeckt werden kann oder zukünftig im Verkehr eine Nachfrage entstehen sollte.

Es ist aber auch möglich, aus dem Wasserstoff unter Einsatz von Kohlendioxid Methan zu erzeugen, wobei weitere Energieverluste in Kauf genommen werden. Für das damit gewonnene Erdgassubstitut kann dabei die bestehende Gasinfrastruktur genutzt werden, was ein wesentlicher Vorteil gegenüber der Wasserstoffherzeugung wäre. Vorhandene Großgasspeicher sind

Langzeitspeicher mit sehr großen und weiter ausbaufähigen Kapazitäten.

Thermische Energiespeicher schließlich können etwa in solarthermischen Kraftwerken in sonnenreichen Regionen Europas und Nordafrikas eingesetzt werden, und damit der mit diesen Anlagen erzeugte Strom als regelbarer und im Prinzip grundlastfähiger Strom importiert werden.

Die folgende Grafik (*Abb. 5*) illustriert noch einmal für Europa (EU 27), wie eine Stromerzeugung, die zunehmend auf erneuerbaren Quellen beruht, die CO₂-Emissionen drastisch reduziert und gleichzeitig den Primärenergiebedarf durch die Reduktion von Umwandlungsverlusten senkt. Der in der *Abbildung 5* dargestellte Primärenergiebedarf ist der Bedarf für die Stromerzeugung. Die starke Bedarfsreduktion ist darauf zurückzuführen, dass bei Wind- und Solarstrom nicht die Energie des Windes oder der Sonnenstrahlung als Primärenergiebedarf bezeichnet werden, sondern nur die aus ihnen gewonnene elektrische Energie. Damit gibt es bei Wind- und Solarstrom keine Umwandlungsverluste. Denn Sonne und Wind bedeuten ja für den Menschen keinen Energieaufwand und werden daher auch nicht als Primärenergieaufwand gerechnet.

Wärmesektor

Im Wärmesektor ist eine starke Reduzierung des Endenergiebedarfs erforderlich, um die energiepolitischen Ziele zu erreichen. Dies kann nur durch höhere energetische Gebäudestandards sowohl bei Neubauten als auch beim Gebäudebestand erreicht werden. Die Reduktion des Energiebedarfs durch energieoptimiertes Bauen unter konsequenter Berücksichtigung passiver solarer Wärmeeinträge erleichtert auch den verstärkten Einsatz erneuerbarer Energietechnologien. Insbesondere können Wärmepumpen, die zunehmend mit Strom aus erneuerbaren Quellen betrieben werden, Umweltwärme effizient für die Beheizung nutzbar machen. Ebenso kann Solarwärme einen größeren Anteil des Wärmebedarfs decken.

Biomasse sollte vor allem in Kraft-Wärme-Kopplung eingesetzt werden, die weiter ausgebaut und mit Wärmespeicher flexibilisiert werden sollte. Sowohl für die effiziente und flexible Nutzung der Erdwärme, der Solarwärme als auch der Biomasse stellen Fern- und zusätzliche Nahwärmeverbünde auch langfristig und bei sinken-

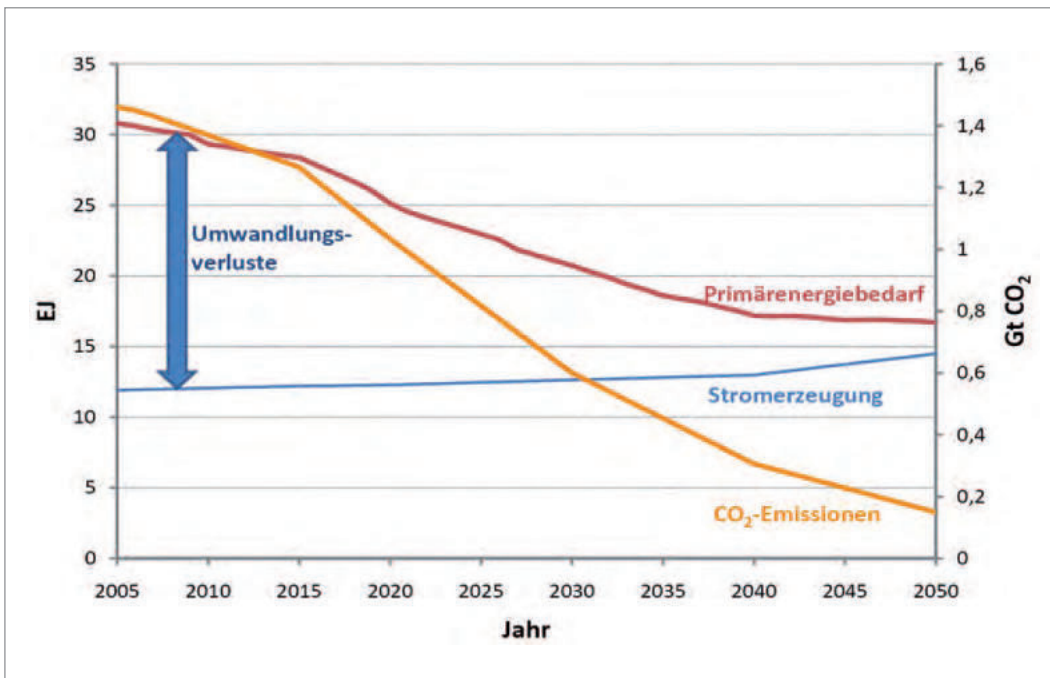


Abbildung 5
Mögliche Entwicklung der Stromerzeugung in Europa (EU 27), der damit generierten CO₂-Emissionen und des Primärenergiebedarfs zur Stromerzeugung. Die Stromerzeugung entspricht der Stromnachfrage. Die Umwandlungsverluste nehmen durch den sukzessiven Abbau von Stromerzeugung auf der Basis von Verbrennungsprozessen stark ab.

Quelle: Fraunhofer IWES

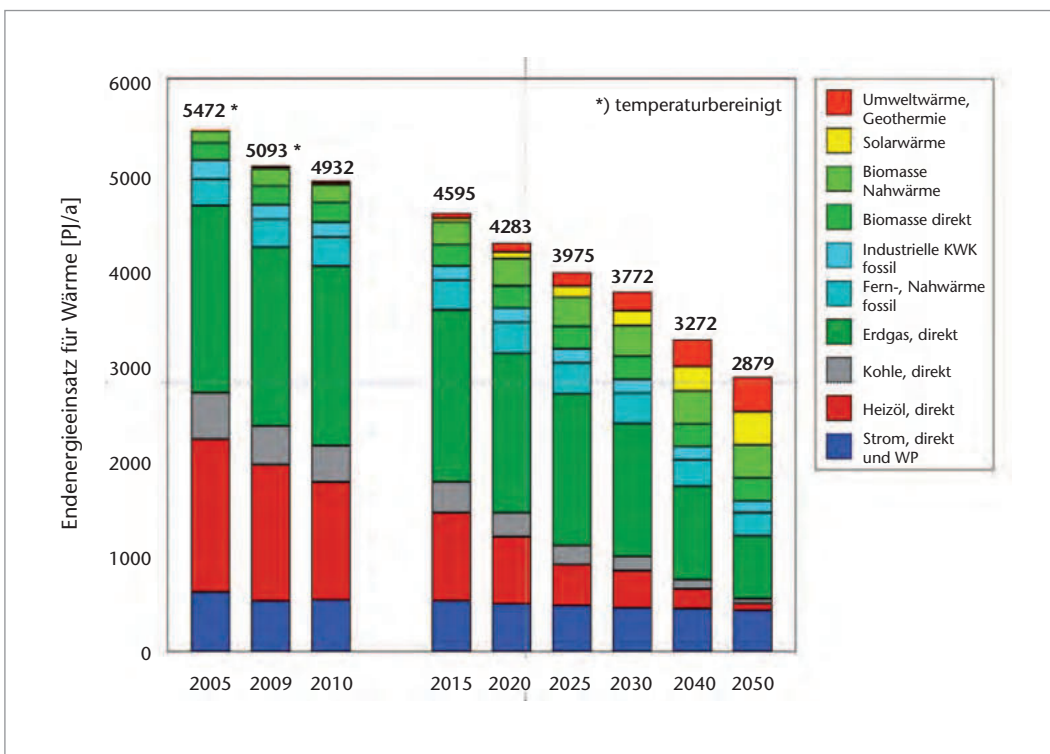


Abbildung 6
Mögliche Entwicklung des Endenergieeinsatzes für die Wärmebereitstellung in Deutschland.

Quelle: Leitstudie 2010 [3]

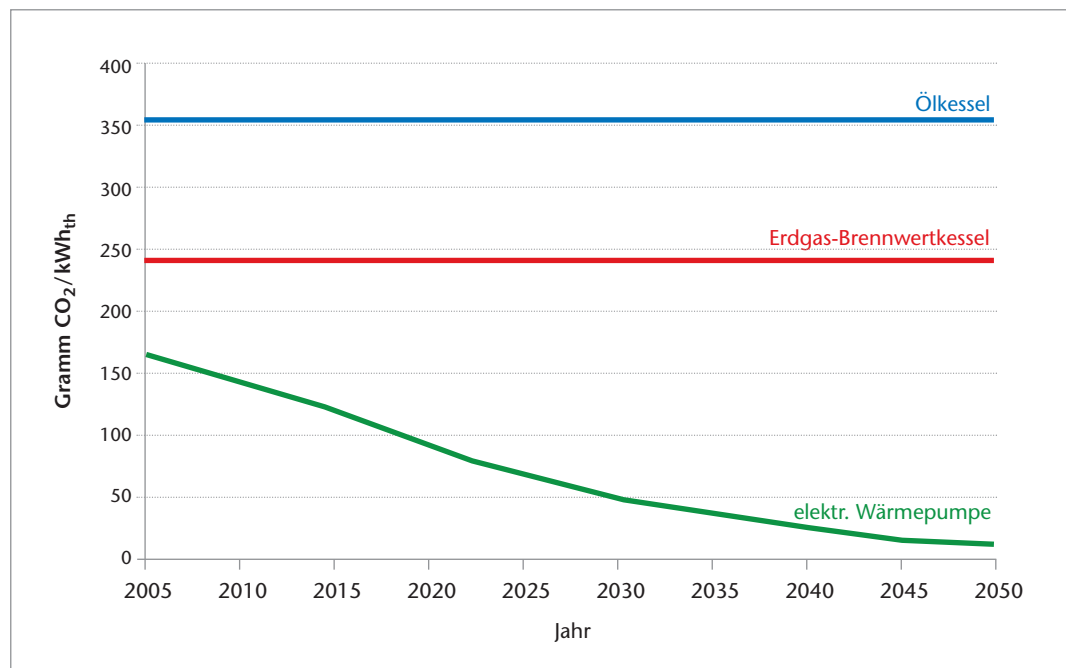
dem Wärmebedarf ein wesentliches Element dar. Wasserstoff und Methan, die aus Strom aus erneuerbaren Quellen hergestellt werden, können insbesondere für die Bereitstellung von Prozesswärme und Prozesskälte angewendet werden. Damit die in der Grafik gezeigten Einsparungen

erreicht werden, ist es aber unerlässlich, dass bis 2050 praktisch der gesamte Gebäudebestand entsprechend energetisch saniert wird.

Die Reduktion der Kohlendioxidemissionen durch eine Umgestaltung des Wärmesektors lässt sich

Abbildung 7
Mögliche Entwicklung der spezifischen Emissionen verschiedener Heizungstechnologien und des spezifischen Primärenergieaufwands von Wärmepumpen (für EU 27).

Quelle: Fraunhofer IWES



illustrieren, indem man die spezifischen Emissionen eines Ölkessels, eines Erdgas-Brennwertkessels und einer Wärmepumpe gegenüberstellt (siehe *Abbildung 7*). Die weitgehende Ersetzung von Ölheizungen durch Gas-Brennwertkessel und Wärmepumpen führt zu einer beträchtlichen Absenkung der Emissionen.

Darüber hinaus bedingt der Umbau des Stromsektors eine weitere Absenkung der spezifischen Emissionen beim Einsatz von Wärmepumpen, da der für den Betrieb der Pumpen aufgewandte Strom zunehmend aus erneuerbaren Quellen gewonnen wird, wodurch außerdem der Primärenergiebedarf für den Betrieb der Wärmepumpen sinkt. Dies bedeutet, dass ein verstärkter Einsatz von effizienten Wärmepumpen, die mit erneuerbar erzeugtem Strom betrieben werden, ein sehr wirksamer Entwicklungspfad im Wärmesektor ist, um gleichzeitig die Effizienz im Energiesystem zu erhöhen und die Treibhausgasemissionen zu senken.

Verkehrssektor

Der Verkehrssektor zeigt gegenwärtig eine besonders hohe Abhängigkeit vom Erdöl, bzw. der daraus erzeugten hochwertigen Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren. Die Ersetzung fossiler Kraftstoffe durch Biokraftstoffe ist in Deutschland nur in geringem Maß möglich, da hier (wie auch

in vielen anderen Ländern) biogene Energierohstoffe nur in begrenztem Ausmaß nachhaltig bereitgestellt werden können.

Für den Individualverkehr wird es wichtig sein, von Verbrennungsmotoren auf der Basis von Flüssigbrennstoffen zu alternativen Antrieben überzugehen. Das Institut für Fahrzeugkonzepte des DLR hat mittels Marktsimulation drei unterschiedliche Szenarien der Flottenentwicklung im PKW-Sektor bezüglich zukünftiger Antriebskonzepte ausgehend von Anforderungen und Kaufentscheidungen von Kunden entwickelt:

1. **Stromszenario**, bei dem der Individualverkehr bis 2050 ausschließlich vom Elektroantrieb gedeckt wird,
2. **Wasserstoffszenario**, bei dem neben den batteriebasierten Elektroantrieben auch Brennstoffzellen verstärkt zum Einsatz kommen,
3. **Methanszenario**, bei dem neben den Elektroantrieben Gasantriebe eine wichtige Rolle spielen.
- 4.

Alle drei Szenarien stimmen darin überein, dass fossil basierte Antriebe im PKW-Bereich zunehmend durch alternative Antriebe ersetzt werden. Sofern Strom, Wasserstoff und Methan zunehmend aus erneuerbaren Quellen bezogen werden, werden in allen drei Szenarien die CO₂-Emissionen

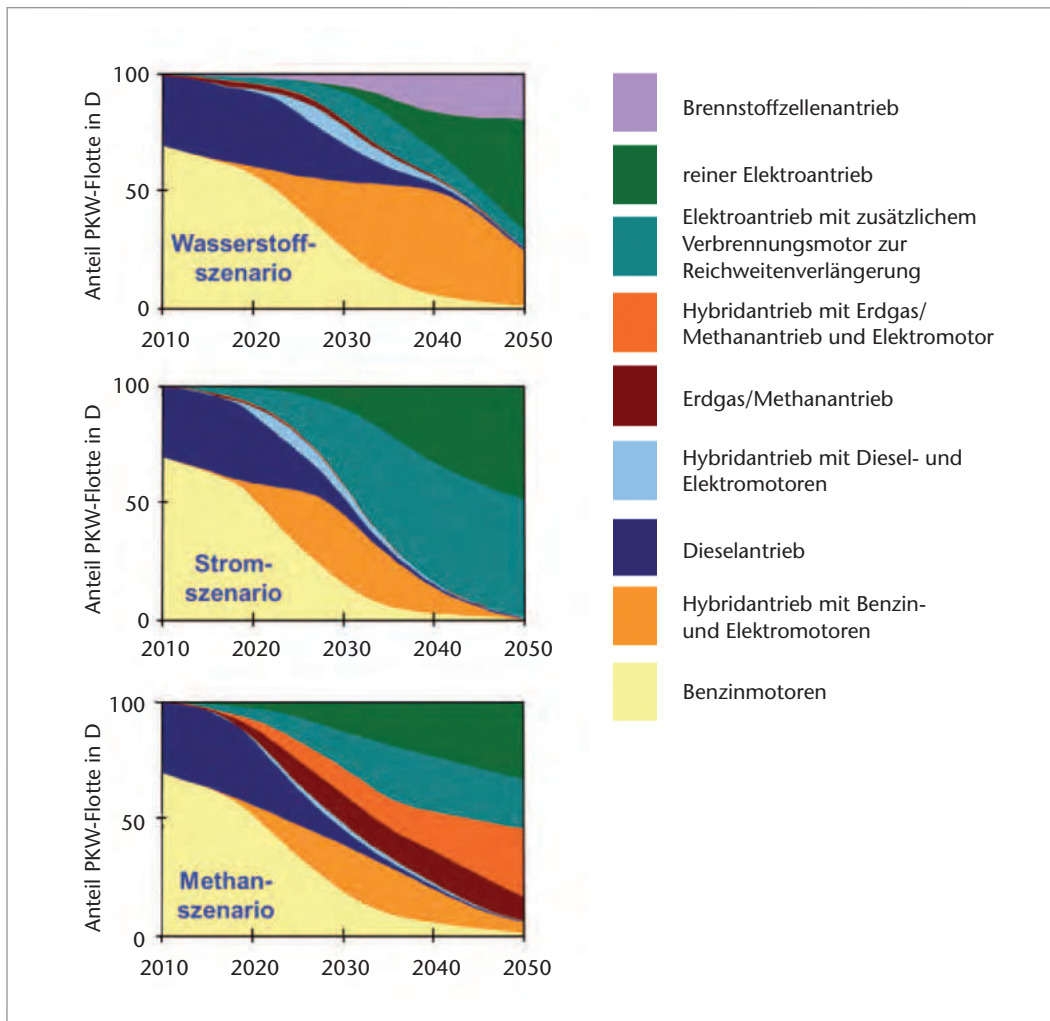


Abbildung 8

Szenarien zur zukünftigen Verbreitung von PKW-Antriebstechnologien in Deutschland.

Quelle: DLR, Institut für Fahrzeugkonzepte [5]

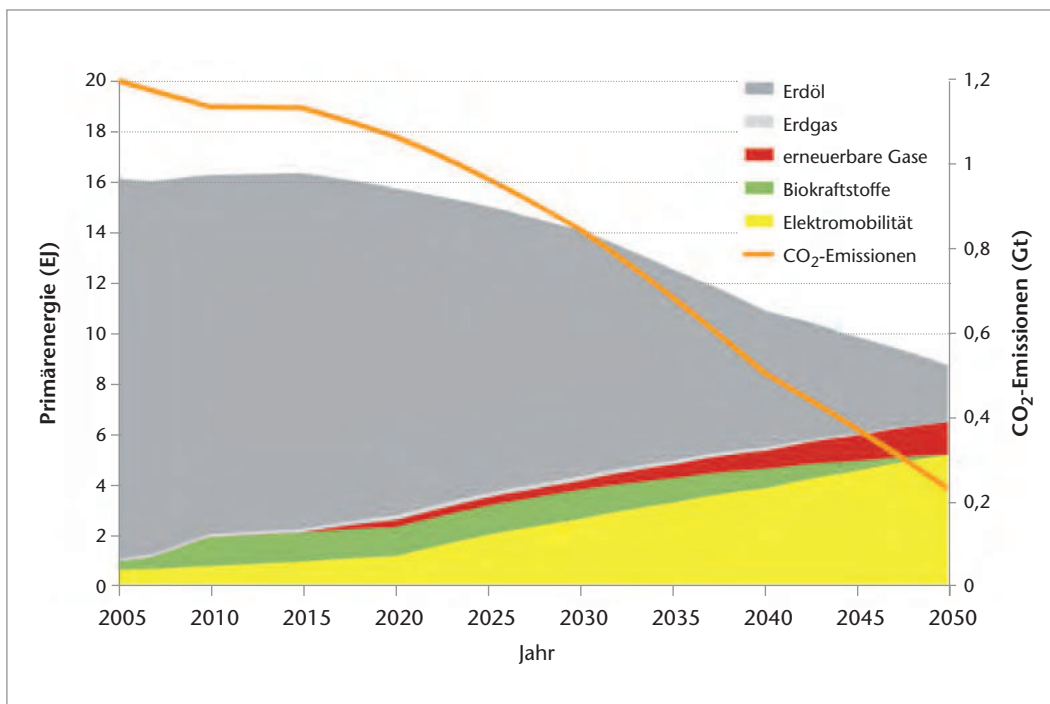


Abbildung 9

Mögliche Technologieentwicklung, CO₂-Emissionen und Primärenergiebedarf für den europäischen Verkehrssektor.

Quelle: Fraunhofer IWES

stark reduziert, ebenso wie der Primärenergiebedarf sogar bei konstantem Verkehrsaufkommen sinkt. Das Stromszenario weist dabei aufgrund des effizienten Elektroantriebs einen deutlich geringeren Endenergiebedarf im Vergleich zu den anderen Szenarien auf.

Für Europa wird diese Entwicklung in der *Abbildung 9* für den gesamten Verkehrssektor dargestellt.

Im Güterverkehr, bei Flugzeugen und Schiffen werden fossile Flüssigkraftstoffe wahrscheinlich länger eingesetzt werden als im PKW-Bereich, doch auch da werden sie zunehmend durch erneuerbare Kraftstoffe ersetzt, die aus Bioenergie oder aus erneuerbarem Strom (mittels Elektrolyse → Wasserstoff → Methan) hergestellt werden.

Unabhängig von den genannten neuen Antriebstechnologien gibt es weitere mögliche Effizienzgewinne im Verkehrssektor etwa durch eine zunehmende Verlagerung des Verkehrsaufkommens von der Straße auf die Schiene oder durch eine Reduktion des urbanen Individualverkehrs zugunsten eines gestärkten ÖPNVs.

3. Verschiebungen zwischen den Sektoren

Die drei Sektoren Elektrizität, Wärme und Verkehr verschieben sich durch die beschriebenen Entwicklungspfade gegeneinander und werden stärker miteinander verzahnt. Insbesondere implizieren die erläuterten Entwicklungspfade, dass erneuerbarer Strom als Primärenergie stark an Bedeutung gewinnt. Sowohl der Wärmesektor als auch der Verkehrssektor werden demnach stärker auf elektrischer Energie beruhen als dies bislang der Fall war.

Im Wärmesektor wird durch den verstärkten Einsatz von Wärmepumpen sowie auch die Nutzung von erneuerbarem Strom zur Prozesswärmeerzeugung mehr direkter Stromeinsatz realisiert. Auch der mögliche Einsatz von Wasserstoff oder Methan im Wärmesektor, die aus regenerativ erzeugtem Strom gewonnen werden, erhöht den erneuerbaren Anteil im Wärmesektor und den Einsatz der Primärenergie EE-Strom. Zusätzlich zur strombasierten Wärmegewinnung kann aber auch die Solarthermie einen sichtbaren Beitrag

zur Deckung des insgesamt sinkenden Wärmebedarfs liefern.

Auch im Verkehrssektor wird verstärkt auf Strom gesetzt, indem Elektrizität entweder direkt in Elektromobilen eingesetzt wird oder indem regenerativ erzeugter Wasserstoff oder Methan als Kraftstoff verwendet wird. Dies führt zu einem erhöhten Brutto-Strombedarf, so dass der Stromsektor in Zukunft eine noch zentralere Position im Energiesystem einnehmen wird und dem weiteren dynamischen Ausbau der Technologien zur Stromerzeugung aus erneuerbarer Energie eine große Bedeutung zukommt.

Eine solche neue Verzahnung der Energiesektoren und die damit gegebene zentralere Position der Stromerzeugung, ist ein möglicher Entwicklungspfad, um das Energiesystem mit ambitionierten Klimaschutzziele kompatibel zu machen, es effizienter zu gestalten und die Zielvorgaben bezüglich des Anteils der erneuerbaren Energien und der Energieeffizienz insgesamt zu erreichen.

Literatur

- [1] Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (2009): Kassensturz für den Weltklimavertrag – Der Budgetansatz. Sondergutachten. Berlin 2009
- [2] BMWi, BMU: Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Berlin 2010
- [3] DLR, Fraunhofer IWES, IfnE: Leitstudie 2010. Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. www.fvee.de/fileadmin/politik/bmu_leitstudie2010.pdf
- [4] Klaus et al. 2010: Energieziel 2050: 100 % Strom aus erneuerbaren Quellen. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- [5] DLR 2011: „VECTOR21-Simulationen für drei alternative Fahrzeugszenarien“. Kurzbericht DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart, B. Propfe und S. Schmid, September 2011.