

Energie. Wende. Jetzt.

Eckpunkte für eine zukünftige Energieversorgung

PROLOG	2
ECKWERTE EINES UMBAUS DER ENERGIEVERSORGUNG	4
ENERGIEVERSORGUNG IST SYSTEMISCH	4
ENERGIESYSTEME BENÖTIGEN ZWEI ARTEN VON ENERGIETRÄGERN	4
DER BEDARF AN STOFFLICHEN ENERGIETRÄGERN ERFORDERT EINEN KOHLENSTOFFKREISLAUF	5
DEN STOFFKREISLAUF RICHTIG INS SYSTEM EINBINDEN.	6
ENERGIESYSTEME BEDARFSGERECHT AUFBAUEN	7
ENERGIESYSTEME SUBSIDIÄR UND INTERNATIONAL AUFBAUEN	8
DEN WANDEL ZEITLICH FLEXIBEL GESTALTEN	10
DIE FORSCHUNG ZU ENERGIESYSTEMEN	12
DAS GESAMTZIEL RICHTIG SETZEN	12
EPILOG	14
ANLAGEN	16
REFERENZEN	36

April 2019
Robert Schlögl
Max-Planck-Institut für Chemische Energiekonversion

Prolog

Der Klimawandel findet schon länger statt, er ist aber jetzt für viele Menschen unmittelbar sichtbar geworden. Dies wird unter anderem durch das Ausmaß der Temperatur-Anomalie in Mitteleuropa erkennbar (**Anlage 1**). Für Deutschland ist derzeit die „2 Grad Grenze“ bereits überschritten, die Welt hat einen Wert von 1,1 Grad erreicht. Damit wird eine drastische Anstrengung für die wirksame Defossilisierung des Energiesystems **jetzt** notwendig.

Den Akteuren fehlt eine Verständigung über die Eckwerte für ein neues Energiesystem. Eine wesentliche Konsequenz daraus ist, dass sich der Zubau von unabdingbar nötigen Wandlern für Erneuerbare Energie in Europa verlangsamt. Dies kann sehr gut aus Abbildung 1 abgelesen werden. Für Deutschland wird klar, dass der Kohleausstieg in der Tat vordringlich ist. Die Widersprüche, die mit der Festlegung von Eckwerten einhergehen, erkennt man weiter daraus, dass der Ausstieg aus der Kernenergie rein aus der Sicht einer schnellstmöglichen CO₂-Reduktion nicht nachvollziehbar ist.

Weiterhin erkennt man den immer noch geringen Anteil der Erneuerbaren im Gesamtsystem der Energieversorgung. Der dringende Handlungsbedarf wird noch deutlicher, wenn man bedenkt, dass der Anteil von Wasserkraft und Biomasse an diesen „Erneuerbaren“ wesentlich größer ist als derjenige von Wind- und Sonnenenergie, welche die wesentlichen skalierbaren Quellen erneuerbarer Energie sind. Vergleicht man dies mit den Erfordernissen für die Stabilisierung des Weltklimas (1), welche ein exponentielles Wachstum der Erneuerbaren dringend einfordern, so wird klar, dass hier unmittelbar und tiefgreifend gehandelt werden muss.

Unsicherheiten und regulatorische Fragmentierung in Deutschland und Europa sind mit als Ursachen für den völlig unzureichenden zeitlichen Verlauf des Energiesystem-Umbaus anzusehen. Im europäischen Kontext wirkt es sich stark negativ aus, dass Deutschland eine retardierende Gesamthaltung einnimmt und nicht als Vorreiter fungiert.

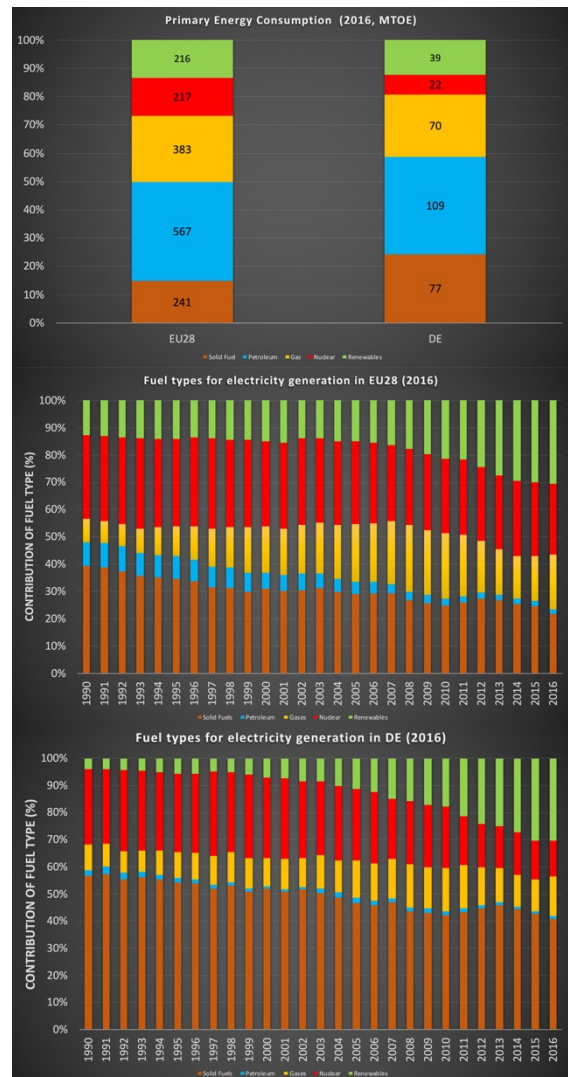


Abbildung 1: Vergleiche der Primärenergie- und Stromerzeugungsstruktur von EU (28) und Deutschland und Zeitreihen der Nutzung von Energiequellen für die Stromerzeugung für EU (28) und Deutschland. Quelle: <https://data.europa.eu/euodp/data/dataset/information-on-energy-markets-in-eu-countries-with-national-energy-profiles/resource/fbb4045a-0552-4bb1-b88c-b9e3d465718c>

Die Energiepolitik in Deutschland wird vor allem durch Regierungshandeln ohne intensivere Beteiligung des Parlaments bestimmt. Es formieren sich „Bewegungen“, die schnelle Aktionen fordern. Diese sind eine Mischung aus eindeutig notwendigen Aktionen und kaum erfüllbaren „Sofortmaßnahmen“, die nicht nötig wären, wenn der Umbau der Energieversorgung systemisch und mit wirklichem Nachdruck angegangen würde. Wenig wird darauf geachtet, dass der Umbau des Energiesystems eine Aufgabe für Generationen ist, die sich über zahlreiche Legislaturperioden hinzieht und daher einen stabilen Beteiligungsrahmen der

Gesellschaft erfordert. Die Gesellschaft ist schließlich Nutzerin dieses Systems und sie finanziert den gesamten Aufwand.

Mit dem Entwurf des Klimaschutzgesetzes (**Anlage 2**) setzt die Regierung eine Vorgabe der EU um, die von allen Mitgliedsländern bis 2020 eine gesetzliche Grundlage der Einsparungen von Treibhausgasen verlangt. Der Gesetzesentwurf geht davon aus, eine Unterteilung des regulatorischen Rahmens voranzutreiben um in zuständigen Bundesministerien „Verantwortliche“ benennen und belangen zu können. Damit übernimmt der Staat (Bund, Länder) die Aufgabe der Organisation des Energiesystem-Umbaus.

Dieser Ansatz steht im Widerspruch zu unserem politischen System. Danach kommt dem Staat vor allem die Organisation der Willensbildung des Volkes und die Ermöglichung der Umsetzung durch einen verlässlichen regulatorischen Rahmen zu. Die technisch-wirtschaftliche Realisation obliegt der Industrie und den Bürgern/Kunden. Der Staat wiederum hat die Einhaltung des regulatorischen Rahmens zu kontrollieren und ggf. auch zu erzwingen.

In der jetzigen Konzeption tritt der Staat als Akteur und Kontrolleur gleichzeitig auf. Es ist zu erwarten, dass sich bei der Durchführung erhebliche Widerstände einstellen, welche die Umsetzung der gewünschten Ziele behindern. Weiter ist nach den bisherigen Erfahrungen mit Eingriffen des Staates in das Energiesystem zu erwarten, dass die resultierenden komplexen Regelwerke systemisch unerwünschte Effekte hervorbringen und Schlupflöcher zur Vermeidung missliebiger Aktionen verbleiben.

Das vorliegende Papier wirbt für eine andere Aufteilung der Aufgaben und Verantwortlichkeiten beim Umbau des Energiesystems, um damit in breiter Übereinstimmung mit den Akteuren schneller zum Ziel zu gelangen. Es stellt sich hier bereits die Frage, was das Ziel einer Energiewende sein soll. Weiterhin ist der Rahmen zu definieren, in dem ein Umbau der Energieversorgung durchgeführt wird. Dies betrifft sowohl den geographischen Raum als auch den Anwendungsraum von Energie. Hier herrscht traditionell eine Fragmentierung in Sektoren vor. Abbildung 2 zeigt sehr vereinfacht die

Elemente eines prototypischen heutigen Energiesystems. Derzeit versucht die Politik jedes Element und jede Relation einzeln regulatorisch differenziert zu behandeln. Sie erhofft sich dadurch optimale Regelungen und Anpassungsfähigkeiten für Ausnahmen. Die Folge ist allerdings ein komplexes und widersprüchliches Regulatorium, das andauernde Ergänzungen und Verbesserungen erfordert. Die resultierenden Unsicherheiten wiederum führen zu einer abwartenden Haltung der ausführenden Akteure (Märkte und Firmen) mit der Folge, dass sich zahlreiche Hemmnisse in der schnellen Umsetzung ergeben.

Im Versuch, die Hemmnisse durch Anpassungen zu beseitigen ergeben sich mit der Zeit derartige Komplexitäten, dass der unbedingt nötige systemische Ansatz (z. B. bei Betrachtungen zu Einspareffekten oder Effizienzen) verloren geht. Gleichzeitig geht die Übersicht der Bürger über das Thema Energiewende verloren. Dies wiederum ermöglicht es interessierten Gruppierungen, ideologische Argumente in die Diskussion einzuweben. Vor allem mit dem Mittel des Szenarios und seiner Auslegung lassen sich Positionen so untermauern, dass punktuelle Ziele sinnvoll erscheinen, auch wenn sie systemisch schädlich sind.

Ein aktuelles Beispiel dafür ist die Diskussion um die e-Mobilität. (**Anlage 3**) So richtig es ist, dass sie lokale regulierte Emissionen beseitigt und so sehr sie eine Prozesseffizienz bietet, so wenig wird sie in den kommenden Jahrzehnten zur Einsparung von Treibhausgasen beitragen und vielmehr die Aufgabe erschweren, das Stromsystem zu defossilisieren. Zudem erzeugt sie durch die Notwendigkeit erheblicher zusätzlicher Netzausbauleistungen Pfadabhängigkeiten, die sich schwer korrigieren lassen und erhebliche finanzielle Ressourcen binden, die man effizienter zur Defossilisierung des gesamten Systems einsetzen kann.

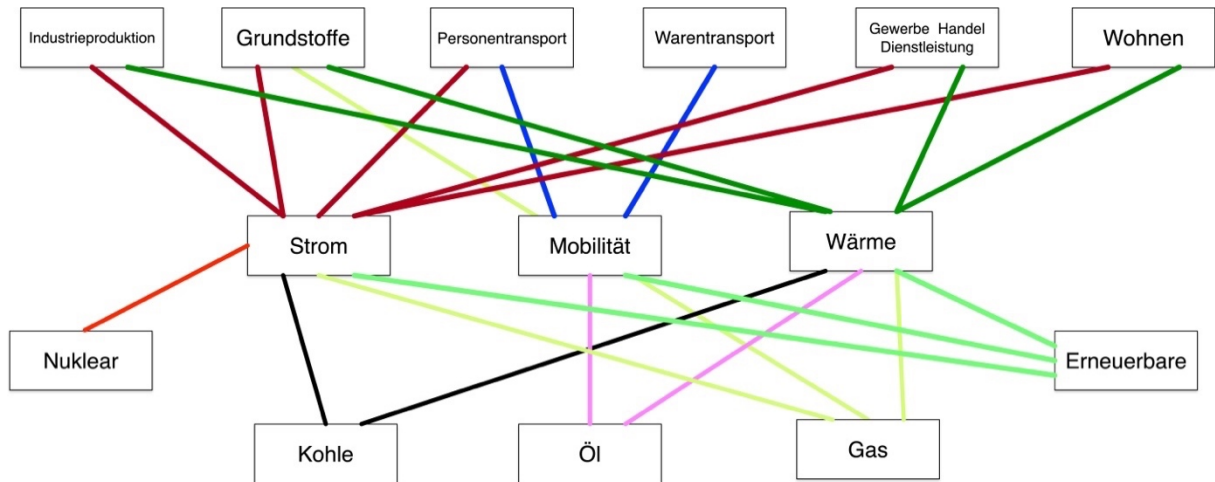


Abbildung 2: Generische Elemente eines Energiesystems heute. Man erkennt von unten nach oben die Ebenen der Energieträger, der Grundanwendungen und der differenzierten Anwendungen (Sektoren)

Beispiel) ist nicht hilfreich, wenn es nicht die ganze Technologiekette erfasst (Netze, Flexibilisierung der fossilen Nutzung).

Eckwerte eines Umbaus der Energieversorgung

Energieversorgung ist systemisch

Abbildung 2 zeigt deutlich, dass alle Elemente der Energieversorgung (Energieträger, Energie wandlung, Energienutzung als die 3 Ebenen von unten nach oben) untereinander vielfach verbunden sind (2). Greift man daher in ein Element ein, so erhält man eine systemische Antwort aus allen Ebenen. Ihr Inhalt kann auf Grund der Komplexität des Systems nicht vorhergesagt werden, selbst wenn man sich nur auf die zu verändernde Größe (z. B. gesamthafte CO₂ Einsparung) bezieht. Es ist kontraproduktiv, dies zu ignorieren und jedem Element separiert eine mengenmäßige und zeitliche Änderungs last im Umbau des Systems zuzuweisen. Dabei entstehen Schnittstellen, die falsche Anreize, ungeeignete Infrastrukturen und in jedem Fall suboptimale Wirksamkeiten im Hinblick auf die Zielsetzung verursachen.

Insbesondere der regulatorische Rahmen muss dies berücksichtigen und mit möglichst einem einheitlichen Werkzeug das System in die gewünschte Richtung steuern. Derzeit ist dies in Deutschland und Europa nicht der Fall. Vielmehr gibt es eine Vielzahl von unterschiedlich konstruierten Steuerinstrumenten. Insbesondere das System von Anreizen (für EE zum

Vordringlich wichtig ist eine direkte negative Anreizung zum Verzicht auf fossile Träger, die systemweit wirkt. Dafür gibt es zahlreiche Methoden. Das ETS (*Emissions Trading System*) ist eine bereits existierende Vorlage, die, wenn sie voll funktional gemacht und auf das gesamte System ausgedehnt würde, die Aufgabe erfüllen würde. Wirksam wird ein derartiges System nur, wenn gleichzeitig alle Subventionen im Energiebereich zurückgefahren werden.

Energiesysteme benötigen zwei Arten von Energieträgern

Grundlage der neuen Energiesysteme ist die elektrische Primärenergie aus Wandlern von Sonne und Wind. Diese erneuerbare Energie mit freien Elektronen als Energieträger kann in geringem Umfang durch stoffliche erneuerbare Energie aus Biomasse ergänzt werden. Diese nutzen chemische Bindungen in Molekülen als Energieträger. Damit kann erneuerbare Energie transportiert und gespeichert werden. Durch Verbrennung mit und ohne Flammen wird die Energie freigesetzt.

Einige Energieanwendungen aus Abbildung 2 benötigen zwingend stoffliche Energieträger für die Herstellung von Materialien (als Einsatzstoffe) und für energiedichte Mobilitätsanwendungen (Flugzeuge, Schiffe, Baumaschinen, Busse und Lkw im Fernverkehr). Um die Transportsysteme für elektrische Energie in

überschaubaren Größen zu halten, sind weiter Punktanwendungen von Prozesswärme günstig mit stofflichen Energieträgern zu betreiben (Grundstoffe wie Stahl, Glas, Ziegel, Zement; Gas als Träger). Somit kann ein rein elektrisches Energiesystem nicht funktionieren - es wird immer die Dualität der Energieträger geben.

Der Bedarf an stofflichen Energieträgern ist ein erheblicher Teil des Energiesystems und kann nicht ohne Schaden für die Entwicklung des Planeten durch Biomasse alleine aufgebracht werden. Folgt man einem Konzept der systemischen Nachhaltigkeit so sollten die stofflichen Energieträger durch Wandlung (chemische Energiekonversion) aus primärer Elektrizität hergestellt werden. Dann kann ein rein technisches Energiesystem ohne unmittelbare Auswirkung auf die Ökosysteme entstehen. Bei seiner Einrichtung sind Auswirkungen auf den Verbrauch von Mineralstoffen, Wasser und Land zu minimieren und entsprechende Stoffkreisläufe einzurichten.

Der Bedarf an stofflichen Energieträgern erfordert einen Kohlenstoffkreislauf

Die globale Energieversorgung beruht heute auf Transport und Lagerung von fossilen kohlenstoffhaltigen Energieträgern (Kohle, Gas, Öl). Um die Pfadabhängigkeiten des Umbaus des Energiesystems minimal zu halten und die Kosten des Umbaus zu optimieren, sollten diese Infrastruktur und die Folgeprozesse weitgehend weiter genutzt werden. Synthetische Energieträger aus CO₂ und grünem Wasserstoff (durch Wasserspaltung) liefern bei Einsatz von ausschließlich erneuerbarer Primär-Elektrizität erneuerbare stoffliche Energieträger, die als Flüssigkeiten (Methanol) oder Gase (Methan) die existierenden Infrastrukturen nutzen können. Gewinnt man das bei ihrer Nutzung freierwerdende CO₂ zurück und transportiert es zu Orten wo die nötigen großen Mengen an Primär-Elektrizität verfügbar sind, so bildet man einen Stoffkreislauf der grundsätzlich nachhaltig ist. Er macht erneuerbare Energie transportier- und lagerbar. Der Einsatz von mineralischen Hilfsstoffen, von Wasser und Landflächen muss noch erheblich optimiert werden, um die Größe dieser Technologie ökologisch und ökonomisch günstig abzubilden. Dieses Konzept, das in Abbildung 3 sehr vereinfacht

dargestellt ist, kann als „Pack die Sonne in den Tank“ oder als „flüssige Sonne“ verstanden (3) werden. Es ergänzt die begrenzte Nutzbarkeit von Biomasse, die auf der Erde wichtige andere Funktionen (4) (menschliche Nahrung, Biodiversität und Ökostabilität, Klimastabilität) zu erfüllen hat.

In solch einem System stellen mobile Nutzungen ein „Leck“ an Kohlenstoff (5) dar. Deshalb können synthetische Kraftstoffe (6) (**Anlage 4**) zunächst nur mit maximal 50 % CO₂-Einsparereffekt (5) bilanziell angerechnet werden. Dieses kann beim Umbau des Energiesystems zunächst verkraftet werden, die Leckage muss aber vor Abschluss des Umbaus geschlossen werden. Eine Möglichkeit dazu ist die Nutzung von Biomasse als Sammler von CO₂, das durch Mineralisation der Biomasse aus dem Kreislauf entfernt wird. Andere anorganische Prozesse der Mineralisation (7) können diese „sub-zero“ Option im Energiesystem unterstützen. Auch die Nutzung von Biomasse als ursprüngliche Quelle von Kohlenstoff kann, wie in Abbildung 3 dargestellt, das Problem der „Leckage“ lösen.

Wählt man eine möglichst energieeffiziente Antriebsart von Fahrzeugen, so kann die Größe des Lecks stark verringert werden. Eine Designstudie zeigt, dass mit heutigen Technologien und einem optimierten PKW Hybridfahrzeug ohne energetisch aufwändige Materialien und mit vergleichsweise kleinen Batterien enorme Einsparungen an Kraftstoff zu erzielen sind (**Anlage 5**). Mit einer Kombination von elektrischer Antriebseffizienz und stofflicher Speichereffizienz können die wesentlichen Anforderungen an die Kompatibilität der Mobilität mit einem neuen Energiesystem gut erfüllt werden, und es bedarf keiner Änderung der Infrastruktur jenseits der Bereitstellungsebene der Energieträger (Abbildung 2).

Grundsätzlich sollte überlegt werden, ob die energetische Nutzung von Biomasse eingeplant wird. Die heute erkennbaren großflächig negativen Folgen der extensiven wie intensiven Nutzung der Biomasse für Ökosysteme und Biodiversität und die Gefahren, die sich daraus für die Stabilität des Lebens auf dem Planeten ergeben, lassen es geraten erscheinen, die gesamte Energieversorgung auf den technischen Kohlenstoffkreislauf, der ohnehin nötig ist,

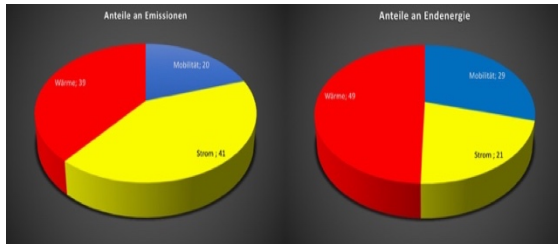


Abbildung 4: Anteile der Hauptanwendungen von Energie an den energiebedingten CO₂ Emissionen und am Verbrauch von Endenergie. Deutschland, 2016 (Daten BMWi, 2018)

Stellt man die Reduktion von Treibhausgasen ins Zentrum des Umbaus des Energiesystems, so ist die Mobilität das am wenigsten lohnende Ziel und eine etwa halbierte Leckage könnte auch im Zielkorridor heutiger Politik hingenommen werden. Nimmt man den Ersatz von Öl als wichtiges Ziel, so ist die Mobilität prioritär. Allerdings wird dieses Ziel ressourcenschonend mit synthetischen Kraftstoffen erreicht. Somit wäre eine Mobilität, die neben lokal verfügbarer e-Mobilität auf importierter erneuerbarer Energie fußt, eine systemisch günstige Option.

Aus Abbildung 4 geht hervor, dass in jedem Fall die Defossilisierung der Wärmenutzung (12) allerhöchste Priorität haben sollte. Dies ist allerdings unmöglich, wenn man die Kopplungen zwischen den Sektoren vernachlässigt. Ein Beispiel ist die bisher viel zu wenig genutzte Option, primäre Elektrizität zielgerichtet dafür bereitzustellen, Wärmespeicher oder Wärmepumpen lokal zu bedienen. Aber auch im Feld der industriellen (Hochtemperatur-)Wärme könnte primäre Elektrizität eingesetzt werden. Schließlich kann eine Nutzung elektrischer Energie bei ausreichendem Stromangebot im Wechsel mit fossilen Heizstoffen in existierenden (dezentralen) Wasserspeichern relativ einfach als CO₂-mindernde Flexibilisierungsmaßnahme eingesetzt werden.

Energiesysteme bedarfsgerecht aufbauen

Die Diskussion zu Energiesystemen richtet sich überwiegend an bilanziellen Werten für Energiebedarfe und Energielieferungen aus. Dies ist zunächst vertretbar, bedarf allerdings unbedingt der Schärfung durch eine Betrachtung zur zeitaufgelösten Bereitstellung von Energie. Es ist eine zentrale Dienstleistung eines Systems, seine Energie ohne zeitliche Beschränkung exakt bedarfsgerecht zur Verfügung zu stellen. Diese „Versorgungssicherheit“ ist ein wesentlicher Standortvorteil eines Landes und bildet eine Grundlage geordneter wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Lebens. Dieser Grundforderung für ein Energiesystem wird Primärelektrizität aus Wind und Sonne nicht gerecht. Energie aus Wasserkraft und Biomasse erfüllt diese Forderungen, sind allerdings in fast allen Ländern kapazitiv zu klein, um die Schwankungen von Wind und Sonne auszugleichen.

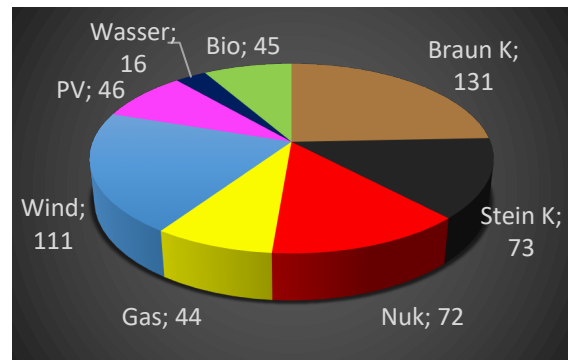


Abbildung 5: Energiequellen für die Stromerzeugung (2017, Daten BMWi, 2018).

Aus den Daten der Abbildung 5 geht hervor, dass das heutige Energiesystem in Deutschland weitgehend noch aus frei steuerbaren Energieträgern (fossil, nuklear) versorgt wird, aber der Anteil erneuerbarer Energieträger zu mehr als 50 % volatile Quellen (Wind, Sonne) enthält. Wird dieser Anteil wie gewünscht wesentlich größer, so sind Flexibilisierungsmaßnahmen erforderlich, die weitgehend auf die Nutzung von speicherbaren Energieträgern hinauslaufen. Weitere notwendige Maßnahmen sind der Einsatz von Batterien, mechanischen Speichern und Wärmespeichern, die allerdings zusammen nicht ausreichen, um das Stromsystem bedarfsgerecht steuerbar zu machen. Bedenkt man, dass das Stromsystem nur einen Bruchteil

des gesamten Energiesystems ausmacht und die zeitlichen Anforderungen hinsichtlich Zeitspannen und Kapazitäten noch weitere Dimensionen hat als die Kurzzeitstabilität beim Strom (Sommer-Winteraustausch, Großmengen für industrielle Prozesse) so wird klar, dass ohne stoffliche erneuerbare Energieträger kein technisch und ökonomisch effizienter Betrieb eines nachhaltigen Energiesystems möglich ist.

Für die gesellschaftliche Akzeptanz von neuen Energiesystemen ist es wenig attraktiv, eine wesentliche Einsparung der Nutzung von Endenergie als Voraussetzung zum Gelingen einer Energiewende anzusetzen. Energie ist eine Grundlage aller Aktivitäten in der Gesellschaft. Unbestreitbar sind einige davon unnötig und sollten abgestellt werden. Da allerdings eine Entscheidung über Einsparungen, die sich aus Verhaltensänderungen ergeben, sehr problematisch ist (etwa Tempolimit) und auch an der Frage der Stellung eines Landes im internationalen Wettbewerb (Deindustrialisierung) rührt, sind hier Widerstände sehr hoch. Eine global verteilte Gewinnung und Verteilung von erneuerbarer Energie macht es überflüssig, Einschränkungen im Gebrauch von Energie zu verlangen. Unberührt bleiben davon Reduktionen des Einsatzes von Energie, die sich durch technische oder freiwillige konsumtive Verbesserungen der Nutzungseffizienz ergeben. Eine bedarfsgerechte Energieversorgung sollte nicht durch Einsparziele und Nutzungsgrenzen bestimmt werden, da es dafür in einem globalen System mit subsidiärer Struktur keine zwingenden Argumente gibt. Dies widerspricht nicht der Einsicht, dass Energie als grundsätzlich wertvolles Gut überlegt einzusetzen ist. Wenn allen Nutzern von Energie ihr Wert hinreichend klar ist, sollten sich Verhaltensänderungen hinsichtlich einer systemischen Verschwendung von Energie ohne staatlichen Zwang einstellen. Dies gilt vor allem für die Mobilität (von Waren wie von Personen), wo der Staat über die Sinnhaftigkeit der zahlreichen Subventionen nachzudenken hat.

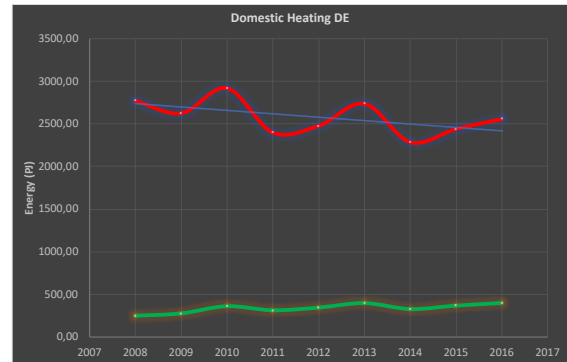


Abbildung 6: Verbrauch von Heizenergie für Raumwärme in Deutschland. Die untere Kurve (grün) zeigt den Anteil erneuerbarer Energien. Die Schwankungen sind auf die unterschiedlich harten Winter zurückzuführen. Die Trendlinie zeigt die geringe Einsparung von Heizenergie an. (Daten: BMWi 2018)

Bei der Raumwärme sind viele Fortschritte in Bewusstseinsbildung und in technischen Maßnahmen erreicht worden. Dies gilt aber nicht in ganz Europa. In Deutschland ist die konsequente Umsetzung durch hohe regulatorische Hürden (Bauauflagen, technische Vorschriften) aufwändig und träge, wie man auf Abbildung 6 aus dem zeitlichen Verlauf des Verbrauches von Heizenergie in Deutschland erkennen kann. Der Einsatz von Erneuerbaren für die Bereitstellung von Raumwärme ist stark verbesserungsfähig, besonders wenn man bedenkt, dass im bisherigen Anteil ein großer Beitrag aus der Biomasse steckt, der nicht leicht skaliert werden kann.

Energiesysteme subsidiär und international aufbauen

Eine hervorragende Eigenschaft von erneuerbarer Elektrizität ist, dass es ihre kostenlosen Ressourcen Sonne und Wind fast überall gibt, wo Menschen leben. Leider sind die besonders ergiebigen Orte, wo entsprechende Wandler mit hohen Nutzungsfaktoren (dem Verhältnis aus installierter Leistung und gewonnener Arbeit) betrieben werden können, aus eben diesem Grund menschlichem Leben nicht zuträglich (Wüsten, Sturmküsten, **Anlage 6**).

Die bisher wenig diskutierte Antwort auf diese Herausforderung ist es, erneuerbare Energie in großem Stil (Abbildung 3) transportierbar zu machen. Damit wird sie zu einer Handelsware,

die beliebig gelagert und transportiert werden kann, ganz so wie wir das von den fossilen Energieträgern her kennen.

Die scheinbar widersprüchliche Natur der volatilen und verteilten erneuerbaren Energie legt eine subsidiäre Gestaltung des Systems nahe. Dazu werden Strukturen gebraucht, welche die unterschiedlichen Elemente (Abbildung 2) des Energiesystems bedienen. „Struktur“ meint dabei nicht eine einheitliche Organisation, sondern eine Reihe von Unternehmen, welche unter regulatorischer Kontrolle des Staates in Kooperation und Wettbewerb die Energieversorgung sicherstellen. Je nach Ebene im subsidiären System ist staatliche Kontrolle regional, national, europäisch oder international zu organisieren. Sie wird unterschiedliche Instrumente benötigen, die teilweise existieren, die aber einer Ergänzung bedürfen, um optimal wirksam zu sein. Energiepolitik ist daher regional, national, europäisch und international und bedarf einer entsprechenden Koordination. Dies ist von der Politik teilweise erkannt (**Anlage 8**) wird aber bisher nicht wirksam praktiziert.

Erneuerbare Primär-Elektrizität wird am wirkungsvollsten sofort und nahe am Gewinnungsort genutzt. Das spricht für verteilte Systeme, welche die Volatilität im Strom kurzzeitig durch lokale Speicher elektrisch und thermisch ausgleichen. Um den Effizienzverlust und die Komplexität der lokalen Anlagen in Grenzen zu halten, sollte nicht Autarkie angestrebt, sondern eine Verschaltung von lokalen Stromversorgungen (Schwarkraftwerk) vorgenommen werden. Durch Zulieferungen von stofflichen Energieträgern sowie von Ergänzungsstrom ergibt sich eine lokale bedarfsgerechte Versorgung, in der die Nutzer auch als Produzenten auftreten. Die in Deutschland verfügbare solare Energielieferung ist allerdings überschaubar (**Anlage 7**) und wird durch die dichte Besiedelung und Akzeptanzprobleme weiter reduziert. Somit kann nur ein begrenzter Anteil der benötigten Energie lokal erzeugt werden.

Dieses Konzept stößt in Ballungszentren und für die Versorgung von Industrieanlagen ohnehin an seine Grenzen. Hier wird eine nationale Struktur sinnvoll sein, welche die gleichen Aufgaben wie die lokalen Strukturen hat, die Bereitstellung von Primärelektrizität und die

Zulieferung von (importierter) Energie. Vor allem wird diese Struktur regionale Ungleichgewichte ausgleichen und die bedarfsgerechte Stromversorgung garantieren. Dazu kann sich diese heute weitgehend existierende und im Ausbau befindliche Struktur weiter einer europäischen Vernetzung bedienen, die in Ansätzen ebenfalls bereits existiert. Die europäische Energieunion mit ihren wesentlich besseren Möglichkeiten der „Energieernte“ (**Anlage 7**) ist zwar ein Thema der politischen Agenda (**Anlage 8**), wird aber nicht sehr entschlossen vorangetrieben. Ein Kohlenstoffkreislauf in Europa mit z. B. *Pipeline*-Systemen für CO₂ und flüssige oder gasförmige Brennstoffe könnte einen erheblichen Anteil der europäischen Energieanwendungen bedienen (**Anlage 9**). Der dafür erforderliche technische und regulatorische Aufwand würde wesentlich dazu beitragen, dass die europäischen Energieziele tatsächlich erreicht werden. Entgegen den Einschätzungen der Bundesregierung erscheint dies mit den bisher wirkenden Maßnahmen nicht sicher gewährleistet (**Anlage 10**) Für die besonders energiehungrige Bereitstellung der synthetischen Kraftstoffe oder großer Mengen von Wasserstoff eignet sich ein weltweiter Stoffkreislauf (**Anlage 6**). Hier würden Tank-schiffe zum Einsatz kommen. Für den interkontinentalen Einsatz wären auch flüssige reversible Wasserstoffträger (13) (liquid organic hydrogen carriers, LOHC) und Ammoniak geeignet (**Anlage 9**).

Der Aufbau solcher Systeme über Grenzen von politischen Strukturen (regional, national europäisch), Industrien und Branchen sowie regulatorischen Systemen hinweg ist ein heroisches Werk mit sehr vielen Gestaltungsaufgaben der Politik. Ihr Erfolg würde sich unter anderem daran messen lassen, ob die erforderlichen Kapitalbeträge investiert werden. Darunter liegen technische Herausforderungen von ähnlichen Ausmaßen, die Steuerung, Digitalisierung und den störungsfreien und sicheren Betrieb betreffen. Die Vermittlung der Fakten und Hintergründe dazu an eine breite Bevölkerung in Zeiten nationalstaatlicher Bestrebungen ist eine weitere Aufgabe. Ohne die mehrheitliche Zustimmung der Nutzer wird es sehr schwer, das unbedingt notwendige Vertrauen von Investoren und Unternehmen zu derartigen Projekten

auf allen Ebenen eines subsidiären Systems zu bekommen.

Zur Internationalität der Energieversorgung gehört ein länderübergreifendes System für die Bepreisung von CO₂. Es mag opportun sein, aus Zeitgründen mit einem nationalen System zu beginnen, das dann aber kompatibel mit einem europäischen System angelegt sein muss. Damit begegnet man dem Argument, dass man in der Tat nicht warten kann, bis der „Letzte in Europa“ dieser Grundlage eines erfolgreichen Umbaus der Energieversorgung zustimmt. Nützlich wäre es, eine „Allianz der Einsichtigen“ zu formen und das Vorhaben zu beginnen: Viele Finanzminister wollen sich weltweit für eine wirksame Bepreisung von Kohlendioxid einsetzen und im Kampf gegen den Klimawandel international besser zusammenarbeiten. Das vereinbarten Ressortchefs aus allen Teilen der Welt, darunter Bundesfinanzminister Olaf Scholz, im Rahmen der Frühjahrstagung des Internationalen Währungsfonds und der Weltbank am 13.04.2019 in Washington (s. solarify.eu/internationale-klimakoalition-fuer-co2-bepreisung).

Den Wandel zeitlich flexibel gestalten

Derzeit sind Politiker überzeugt, dass mengenmäßige Vorgaben an Aufbau und Einsparungen zeitlich klar gegliedert in offenbar jährlich nachvollziehbaren Schritten erfolgen sollen. Der Entwurf des deutschen Klimaschutzgesetzes sieht straffe Zeitpläne und Eskalationsstufen von Interventionen in jedem Sektor des Energiesystems vor. Dieser Planungsansatz passt nicht sehr gut zu Prozessen, die mit neuen Technologien und industriellen Strukturen die wirtschaftlich-technische Basis unseres Landes und Europas grundlegend verändern werden. Solche Prozesse bedürfen einer Anlaufphase, die von einer Hochlaufphase gefolgt ist um dann in ein gleichmäßiges Wachstum überzugehen. Die Entwicklungskurven von PV und Windkraft sind hervorragende Beispiele aus dem bisher erreichten Umbau der Energieversorgung, wie man aus Abbildung 1 erkennen kann. Eine geforderte zeitlich lineare Abarbeitung über- oder unterfordert das System in seiner Umgestaltung. Das Ausbleiben eines kontinuierlichen Wachstums nach der Hochlaufphase ist symptomatisch für das nicht-

systemische Handeln des Staates, der mit Festhalten an einer Technologieförderung das Wachstum bremst, anstatt durch Freigabe des Rahmens und Bepreisung von CO₂ die Einkopplung der Erneuerbaren in andere Sektoren zu unterstützen.

Viel nützlicher als ein zeitlich linearer Verlauf ist ein kontinuierliches Monitoring der erfolgten Änderungen, um rechtzeitig gegensteuern zu können. Dieses Instrument ist in Deutschland mit der Monitoring-Kommission beim BMWi bereits eingerichtet. Sie hat einen sehr detaillierten Kriterienkatalog mit Indikatoren (**Anlage 11**) gesammelt, mit dem sie die Zielerreichung in vielen Dimensionen abbilden und auch im zeitlichen Verlauf vorausschätzen kann. Eine vertrauensvolle Nutzung dieses Instrumentes minimiert unnötige Aufwendungen für einen sachlich nicht gerechtfertigten linearen Verlauf der Umgestaltung des Systems.

Eine zeitliche Flexibilität im Umbauprozess bedingt einen klaren, von allen Akteuren zur Kenntnis genommenen und zumindest mehrheitlich akzeptierten groben technischen Plan, wohin sich das Energiesystem entwickeln soll. Solch ein Plan könnte wie in Abbildung 7 skizziert aussehen. Das Grundkonzept in diesem Modell ist, möglichst viele Elemente und Relationen des heute existierenden Systems zu übernehmen und nach Möglichkeit nur an den Energieträgern (jeweils unterste Zeile in den Blöcken A, B, C) Veränderungen vorzunehmen. Am Ende des Prozesses ist das System vollständig defossilisiert und basiert auf freien Elektronen und synthetischen Brennstoffen (Kraftstoffe) als zwei Erscheinungsformen regenerativer Energie.

Ein derartiger Plan, der die Richtung der Veränderung weist, muss schemenhaft bleiben, da über die Laufzeit zu viele Einzelheiten angepasst werden müssen. Nötig sind allerdings quantitative Ziele (**Anlage 12**) für jedes Element des Energiesystems, die in hinreichend langen Zeitabständen (Dekaden) gefasst sind. Diese sind in **Anlagen 2, 10, 12** beispielhaft angegeben. Allerdings fehlen allgemein akzeptierte Transformationspfade dorthin. Bei der Aufstellung der quantitativen Ziele wurde kaum Rücksicht auf die systemische Wechselwirkung einzelner Festlegungen genommen.

Ein Beispiel hierfür wäre die Bevorzugung der Elektromobilität im System. Daher ist es notwendig, unter dem Gesichtspunkt der Entwicklung des Gesamtsystems die Zielkorridore noch einmal zu überprüfen. Dies sollte ausgehend von einer Information über den gegenwärtigen Stand und einer nachvollziehbaren Begründung für das Zahlenwerk in einem wesentlich transparenteren Prozess geschehen als er bisher Verwendung fand. Ein ungünstiges Beispiel für solch einen Prozess ist die Darstellung der Arbeit der Kohlekommission in Deutschland, die eine transparente Begründung für ihre Empfehlungen nicht gegeben hat.

Ein immerwährendes ad-hoc-Aushandeln der Richtung des Umbaus der Energieversorgung verbunden mit wiederholten Debatten über die Ziele und Grundlagen dazu kann es nicht geben. Dazu ist die Bedeutung des Energiesystems im Gefüge einer Gesellschaft zu groß. Eine fortwährende Einflussnahme wechselnder politischer Strömungen auf den Umbau der Energieversorgung kann es auch nicht geben. Dazu sind die Zeitspannen, in denen sich ein Wandel der Infrastruktur vollzieht, zu lange.

Daher ist die absolut vordringliche Aufgabe, eine verbindliche Einigung der relevanten Akteure über ein Konzept als notwendige Ergänzung zur Festlegung von Zielen, die weitgehend

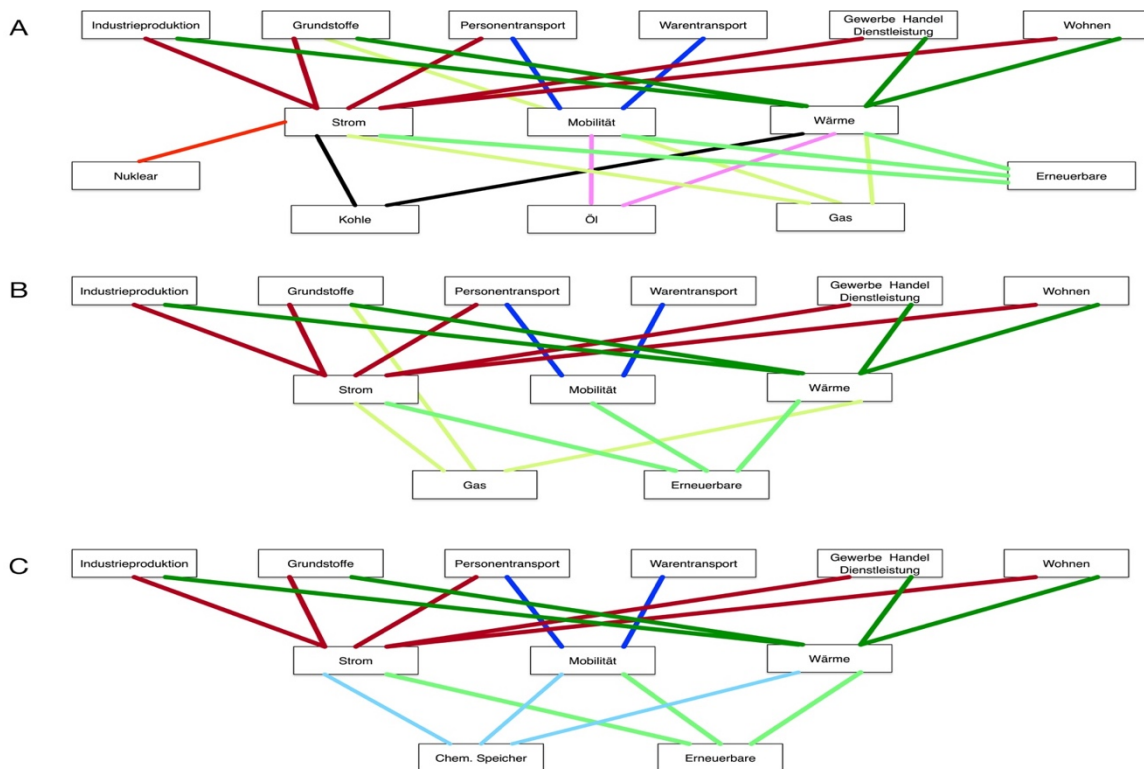


Abbildung 7: Ein Beispiel für einen Plan, wie sich das Energiesystem in Deutschland entwickeln könnte. In drei Phasen ist der derzeitige Zustand (A) ein Zwischenzustand (B, mit Ausstieg von Kohle und Öl) und ein Endzustand (C, defossilisiert) angedeutet.

Eine Konzeption des Energiesystems und eines Transformationspfades ist kein Fahrplan, da die systemische Komplexität, die lange Dauer des Transformationsprozesses und die Existenz zahlreicher von den Akteuren nicht beeinflussbarer Größen eine Planung in Einzelheiten unmöglichlich.

erfolgt ist, herbeizuführen. Eine „Ansage“ zu diesen Zielen ist kein geeignetes Mittel in europäischen Gesellschaften. Vielmehr sind umfangreiche Anstrengungen zur Information über Optionen an die Bevölkerung erforderlich. Allerdings sind die Methoden dazu nicht gut entwickelt, und die Kommunikation bedarf einer leistungsfähigen Begleitforschung, um die Konsequenzen der resultierenden Willensbildung differenziert genug einzufangen und für den Entscheidungsprozess verfügbar zu machen.

Die Forschung zu Energiesystemen

In Deutschland und in Europa wird umfangreich und seit langer Zeit bereits zu Optionen der Energieversorgung geforscht. Dies folgt aus der Armut Europas an fossilen Energieträgern und den resultierenden politischen Abhängigkeiten. Die Grundlagenforschung zu allen Fragen der Energiewandlung ist in Deutschland weit entwickelt (**Anlage 13**) und fest etabliert. Sie hat viele Ansätze hervorgebracht und sollte unabhängig von Zwängen zur Anwendung unbedingt weiter vorangetrieben werden. Die Erforschung wissenschaftlich-technischer Grundlagen sollte in unserem Land für alle Optionen der Energiewandlung offen sein. Dies gilt auch für nukleare Optionen, die außerhalb Deutschlands weiter betrieben werden und deren Folgen in Deutschland noch sehr lange präsent sein werden. Dies gilt weiter für die Fusion, deren Eignung als Energiequelle schnellstmöglich nachgewiesen werden sollte.

Zur Gestaltung der Energiewende in Deutschland, Europa und der Welt sind aber nicht nur exzellente Grundlagenkenntnisse erforderlich, sondern diese müssen in praxistaugliche Technologien umgesetzt werden. Diese bedürfen dann ausgiebiger Tests und einer Einführung in Märkte. Hier finden sich zahlreiche Ansätze der Energieforschung, die von der Politik intensiv gefördert werden. Allerdings werden die technologischen Realisierungen oftmals behindert, weil regulatorische Bedingungen einer Kommerzialisierung entgegenstehen. Diese ist Voraussetzung für das Engagement von privatem Kapital und für die Priorisierung von Forschungsanstrengungen.

Zudem werden Projekte parallel und Förderprogramme nicht ausreichend koordiniert angegangen. In der Planung der sehr aufwändigen Technologieprojekte kommt die systemische Betrachtung zu kurz. Dies gilt besonders für die Beurteilungen von Potenzialen für die Energiewende, bei denen heutige Randbedingungen für die Wirkung von Technologien für morgen zur Betrachtung kommen. Die Neigung, auf Grund der Verfügbarkeit neuer technologischer Ansätze aus der Forschung den regulatorischen sehr eng gefassten Rahmen zumindest zu hinterfragen (beispielsweise mit dem Mittel der „Reallabore“ - am 09. 04.2019

wurde immerhin ein „Netzwerk Reallabore der Nachhaltigkeit“ gegründet – s. solarify.eu/netzwerk-reallabore-der-nachhaltigkeit-gegrundet) ist gering. Dabei sind Instrumente der LCA (*life cycle analysis*) und der Szenarienbildung (14, 15) dazu sehr gut ausgearbeitet und weitgehend standardisiert.

Durch ihre retardierende Haltung verlieren Deutschland und Europa zunehmend an wissenschaftlichem und ökonomischem Boden gegenüber anderen Regionen in der Welt, die der Einführung neuer Technologien offener gegenüberstehen. Weiter wirkt eine extrem konservative Form der Technikbeurteilung der Übernahme von Risiken für neue Technologien entgegen. Dies beobachtet man sowohl in der Industrie als auch in der Gesellschaft, die der Industrie auch durch ausgeprägte Verfolgung individueller Interessen die Umsetzung neuer Technologien erschwert. Es sprengt den Rahmen dieser Arbeit aufzuzeigen, in wieweit das Verhalten der Industrie diese Reaktion befördert oder entsprechende Vorurteile in der Vergangenheit hat entstehen lassen. Als Folge ist zu erwarten, dass hier geförderte und entwickelte Technologien außerhalb Europas zuerst kommerziell eingesetzt werden und der wirtschaftliche Nutzen damit verloren wird.

Das Gesamtziel richtig setzen

Der fundamentale Eckwert zur Energieversorgung ist die Frage nach dem Gesamtziel. Dazu wurde in Deutschland eine jahrelange intensive Diskussion geführt, die nach einer Phase mit einer Vielzahl von Zielen eine hierarchische Ordnung von Zielen hervorgebracht hat (**Anlage 12**). Angaben über die europäischen Ziele finden sich in **Anlage 10**. Versucht man, diese Ziele zu kommunizieren oder kritisch zu hinterfragen, stellt man fest, dass es kein einheitliches Schema zu deren Begründung gibt. Dies ist auch eine Folge der nicht beachteten systemischen Natur der Energieversorgung. Dies gilt bereits für die Wahl der Zielkategorien aus **Anlage 12**.

Eine überzeugende Kommunikation und daraus resultierende Beschlussfassung und die darauf folgende lange Phase der Umsetzung verlangen eine konsistente und verbindliche Zieldefinition. Diese könnte sein, dass die

Energieversorgung zukünftig **nachhaltig** werden soll. Darunter ist ein System zu verstehen, das auf Grund der Nachhaltigkeitsbedingung gleichzeitig mehrere Ziele erfüllt, die derzeit ohne Zusammenhang postuliert werden.

Nachhaltig im vorliegenden Kontext meint:

- Den Interessen aller Beteiligten dauerhaft dienlich
- Für alle Akteure grundsätzlich zugänglich
- Die Biosphäre minimal tangierend
- Mit den Ausnahmen von Sauerstoff, Stickstoff und Wasser in geschlossenen Stoffkreisläufen funktionierend
- Unter vollständiger menschlicher Kontrolle funktionierend.

Solch eine Energieversorgung enthält einen Kohlenstoffkreislauf, verzichtet schnellstmöglich auf die Nutzung von Kohle und Petroleum und auf fossiles Gas, sobald der Kohlenstoffkreislauf in entsprechender Größe funktioniert (siehe Abbildung 7). Nukleare Energiewandlung in den bisherigen Kraftwerkstechnologien sind ausgeschlossen. In der Umsetzung wird auf Zugänglichkeit für alle geachtet werden. Pfadabhängigkeiten und unnötige, durch Regeln verursachte Kosten werden durch systemische Konzepte vermieden. Der Treiber für den Umbau ist die Möglichkeit, durch eine entsprechende Wandler- und Transport-Struktur erneuerbare Primärenergie von der Sonne ohne volumenabhängige Kosten und in menschlich-historischen Zeitmaßstäben dauerhaft zu nutzen - und nicht der Verzicht auf fossile Energieträger oder eine Einschränkung des Gebrauches von Energie. Diese Vision schließt mit ein, dass damit die natürlichen Ressourcen des Planeten bei der Energiewandlung und Verteilung weitgehend geschont werden.

Dafür sind enorme Mittel und einige neue Technologien in globalen Dimensionen nötig, die zu finanzieren sind. Finanzielle Aufwendungen für die Energienutzung fallen aber auch heute an (**Anlage 14**). Es geht um eine Substitution von Ressourcen und die Finanzierung der einmaligen Transformationskosten, die erhebliche Beträge annehmen. Diese Beträge hängen maßgeblich davon ab (**Anlage 15**), inwieweit systemisch optimale Transformationspfade, sinnvolle Zielstrukturen und Kooperationen zwischen Staaten, Industriebranchen und

zwischen der nutzenden Gesellschaft und den umsetzenden Akteuren (Beispiel Netzausbau) gefunden werden.

Vergleicht man die Daten aus **Anlagen 14 und 15**, erkennt man mit der nötigen groben Annäherung eine Entsprechung der Größenordnung der Werte. Die Verfügbarkeit derartiger finanzieller Mittel in Deutschland und Europa setzt allerdings eine mindestens stabile wirtschaftliche Lage voraus. Ohne diese zentrale Voraussetzung kann ein Umbau des Energiesystems an mangelnden Ressourcen scheitern. Die Zahlen zeigen auch sehr deutlich, dass der Staat diese Mittel in keinem Fall aufbringen oder nur nennenswert teilfinanzieren könnte. Daher ist die proaktive Beteiligung von Wirtschaft und Privatleuten unabdingbar. Es wird in der Diskussion propagiert, dass eine Steuer auf die CO₂-Emissionen die nötigen Mittel für den Umbau liefern könnte. Ihre Einführung würde jedoch einen erheblichen Bruch mit dem Ziel bedeuten, alle Maßnahmen und somit auch die Höhe der Steuer konsistent begründen zu können. Das unbedingt verbesserungsbedürftige ETS unterliegt nicht diesem Problem. Trotzdem hat der Staat über die Zuteilung von Zertifikaten einen global steuernden Einfluss. Der primäre Zweck der Bepreisung sollte die Motivation der Nutzer sein möglichst umfassend und schnell auf den Gebrauch von nicht nachhaltigen Energieträgern zu verzichten. Die Finanzierung des Energiesystems muss sich aus seiner Nutzung ergeben.

Ein Argument gegen die Verwendung von Erneuerbarer primärerer Elektrizität (16) zur Speicherung in chemischen Energieträgern (abgeschwächt in Wasserstoff) ist die geringe Prozesseffizienz solcher Verfahren. Dies ist zunächst richtig, da jede Verlängerung der Prozesskette von der Gewinnung erneuerbarer Energie zur letztendlichen Anwendung unweigerlich Verluste mit sich bringt. Unter diesen ist die „Aufladung“ der chemischen Batterie namens CO₂ mit die verlustreichste (3, 17) weil dabei zwangsläufig das nicht erwünschte Wasser gebildet werden muss. Chemische Forschung kann hier noch erhebliche Verbesserungen (etwa einen Faktor 2) erbringen, allerdings wird dafür ein langer Atem notwendig sein. Für erste industrielle Anwendungen (in Deutschland etwa Carbon2Chem, s.

solarify.eu/carbon2chem-von-ccs-zu-ccu) reichen die Effizienzen heute aus. Gleichwohl bleibt die Nutzung von chemischen erneuerbaren Energieträgern „ineffizient“ bezüglich einer hypothetischen direkten Verwendung von elektrischer Energie. Die Transportfähigkeit auf allen Skalen im System, die daraus resultiert, ist ein zentrales Element einer schnellen und dauerhaften Umstrukturierung des Energiesystems. Erweitert man den Betrachtungsrahmen der Effizienz hin auf das gesamte System und betrachtet die Verfügbarkeit der erneuerbaren Energie zu jedem beliebigen Zeitpunkt mit, so ändert sich die Beurteilung der Prozesseffizienz und die systemische Dienstleistung von in CO₂ gespeicherter Energie mit ihren Vorteilen wird zum überwiegenden Argument.

Epilog

Der Umbau des Energiesystems ist eine Revolution und nicht nur ein Impuls. Bis heute hat diese Idee aber noch nicht gezündet. Erfolgreiche Revolutionen benötigen breite Unterstützung. Zu viele Brüche im Zusammenwirken der Akteure, die es zahlreich gibt, verhindern eine konzertierte Aktion. In keinem Fall kann der Umbau des Energiesystems als staatlicher Plan mit sektoralen Zielen, mit spezifischen Vorschriften für einzusetzende Technologien und zeitlichen Taktungen funktionieren. Die Rolle des Staates ist es vielmehr, stabile und allgemein gültige Rahmenbedingungen zu schaffen und deren Einhaltung zu garantieren. Anreize aus staatlichen oder Umlagemitteln (wie das EEG) bewirken keine relevante Änderung für das gesamte System, wenn sie punktuell angelegt sind (technologisch fixiert), zu lange gewährt werden und nicht automatisch bei Erreichen vorher bestimmter Ziele auslaufen.

Erfolgreiche Revolutionen setzten in der Regel die Aufklärung der Revolutionäre voraus. In puncto Energiewende wurde es bisher versäumt, in einem umfassenden Dialog zwischen Gesellschaft und Politik/Wirtschaft eine vertrauensvolle Basis der Zusammenarbeit auf der Grundlage einer verbindlichen Definition der Ziele des Umbaus der Energieversorgung zu schaffen. Damit fehlt der Revolution namens „Energiewende“ die gemeinsame Richtung, die

Akteure arbeiten teils gegeneinander oder verharren in abwartender Stellung.

Ein breites Bewusstsein von den Charakteristiken des Energiesystem Umbaus zu schaffen ist die allererste und wichtigste Aufgabe. Dadurch wird der Fortschritt dieses Prozesses, der bisher nur in Zielen aber kaum in Wegen definiert wurde, wesentlich beschleunigt. Von großer Bedeutung ist die Vermittlung der subsidiären Struktur der Energieversorgung und damit der Ausweitung des Raumes für Optionen von regionalen Lösungen über die nationale Ebene hin zur internationalen und vor allem europäischen Dimension. Auf der untersten Ebene der individuellen Befassung mit Energie wird damit eine breite Teilhabe erreicht und die Abstraktheit der Problematik aufgelöst. Dass nationale und internationale Aktionen mühevoll und langwierig sind, darf nicht davon abhalten, solche Architekturen mit Nachdruck anzustreben. Nationale vorbereitende Lösungen können Teile des subsidiären Systems schneller realisieren. Sie sind dann willkommen, wenn sie automatisch internationalen Regelungen weichen. Dies ist besonders einfach, wenn die internationale Dimension von Anfang an mitgedacht wird, selbst wenn sie erst später realisiert wird.

Der Weg zum beschleunigten Umbau des Energiesystems führt über einen Umbau des regulatorischen Ansatzes hin zu einem technologieoffenen Raum, in dem die Akteure ihre Konzepte ohne Bevorzugung durch staatliche Steuerung implementieren können. Es wird eine treibende Kraft benötigt, die am Besten in einer geeigneten Bepreisung fossiler Energieträger realisiert wird, da diese alle Anwendungen gleichmäßig erfassen kann.

Das in Deutschland eingesetzte „Klimakabinett“ ist ein Ansatz, um die auf viele Regierungsstellen verteilte Aufgabe des Umbaus des Energiesystems zu koordinieren. Dort könnte das zentrale Konzept der systemischen Behandlung umgesetzt werden. Günstig wäre es, die hohen Erwartungen an die Politik durch einige systemisch wirkende Vorabmaßnahmen (**Anlage 16**) so zu erfüllen, dass ohne Schaden für den langfristig anzulegenden Umbau des Energiesystems gleichwohl eine anhaltende Motivation zu dessen Realisierung entsteht.

Die Politik geht die Revolution der Energieversorgung sehr zaghaft an und verbleibt im Bereich der wenig „schmerzhaften“ Maßnahmen, die allerdings auch nur wenig wirksam sind. Es darf erwartet werden, dass sich der Raum für das „politisch Mögliche“ erheblich ausweitet, wenn eine hinreichende und nicht-ideologische Information und Kommunikation mit den Nutzern des Energiesystems erfolgt.

Die hier entwickelten Vorstellungen legen eine entschlossene Weiterentwicklung des bisher verfolgten Weges in eine nachhaltige

Energiezukunft nahe. Die bisher gemachten Ansätze und erreichten Veränderungen sollen jedoch keineswegs gering geschätzt werden. Vielmehr sollen diese Gedanken motivieren, den systemischen Charakter der Energieversorgung über alle Ebenen des Systems hinweg als Leitmotiv zum Entwurf eines schlüssigen Transformationsprozesses zu nutzen. Diesen zu gestalten und unmittelbar umzusetzen, ist eine vordringliche Aufgabe in Deutschland und Europa mit einer andauernden Priorität auch nach der derzeitigen Hochphase in den Medien.

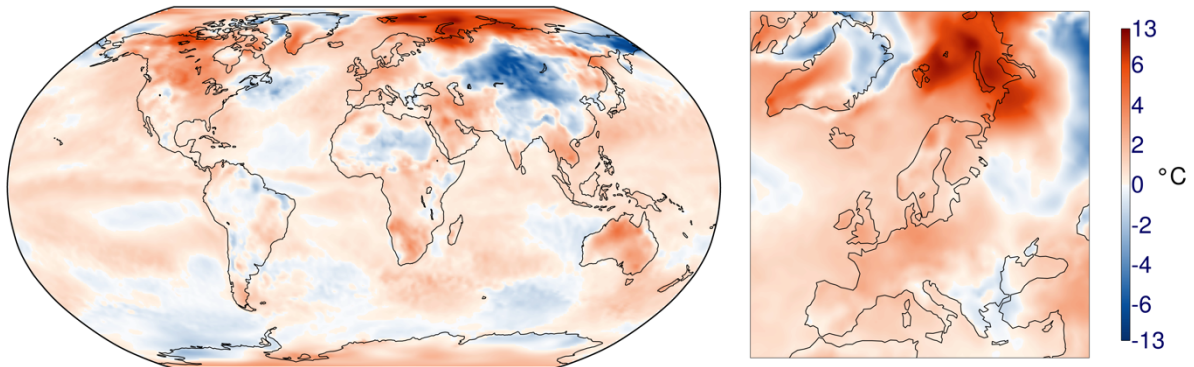
Anlagen

Das gezeigte Material dient der punktuellen Erläuterung von Aussagen im Text.
Keinesfalls ist beabsichtigt, eine zusammenfassende Darstellung der
behandelten Sachverhalte zu liefern.

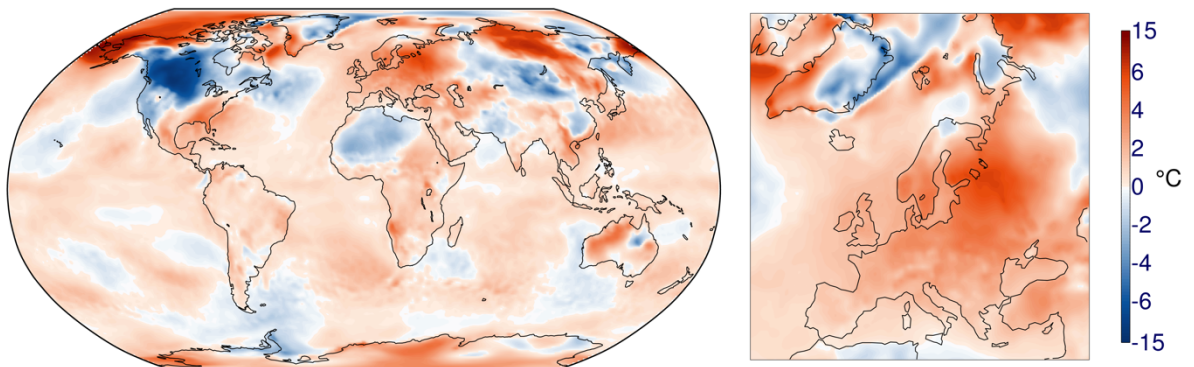
Anhang 1

Bodentemperaturverteilung in der Welt und in Europa Anfang 2019.

Surface air temperature anomaly for December 2018 relative to 1981-2010



Surface air temperature anomaly for February 2019 relative to 1981-2010



Die Karten geben lediglich Momentaufnahmen wieder. Sie beschreiben das „Wetter“ und nicht das Klima. Sie belegen aber klar, wie weit die Erderwärmung (am Boden) bereits zugenommen hat. Man erkennt weiter die großen Unterschiede und den daraus resultierenden „kleinen“ globalen Mittelwert.

Anlage 2

Ziele des Klimaschutzgesetzes

Aus der Homepage des BMU: bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/nationale-klimapolitik/klimaschutzgesetz/

„Das BMU hat im Februar 2019 den Entwurf eines Klimaschutzgesetzes zur Information und frühzeitigen Stellungnahme an das Bundeskanzleramt übersandt. Oberstes Ziel ist es, die gemeinsam vereinbarten Klimaschutz-Ziele einzuhalten. Außerdem sollen die Verantwortlichkeiten eindeutig geregelt, Verlässlichkeit für alle Beteiligten geschaffen und Kompensationszahlungen bei Nichterreichung der Ziele vermieden werden. Der Gesetzentwurf sieht vor, dass alle Bereiche (zum Beispiel Verkehr, Industrie, Landwirtschaft, Energie, Gebäude) ein festes Einsparziel und jährliche sinkende Jahresemissionsmengen zugewiesen bekommen sollen. Jedes Ministerium entscheidet in eigener Verantwortung, welche Maßnahmen es vorschlagen wird, um die erforderlichen Einsparungen zu erreichen. Wird das Ziel verfehlt, soll mit einem Sofortprogramm umgesteuert werden. Das Klimaschutzgesetz soll in einem zweiten Schritt durch ein Maßnahmenprogramm ergänzt werden. Bereits vereinbart ist, dass die zuständigen Ministerien Vorschläge für Klimaschutz-Maßnahmen in ihrem jeweiligen Bereich vorlegen. Zusätzlich wird ein eigenes Klimakabinett eingesetzt, in dem die rechtlich verbindliche Umsetzung der Klimaszutzziele für 2030 vorbereitet wird.“

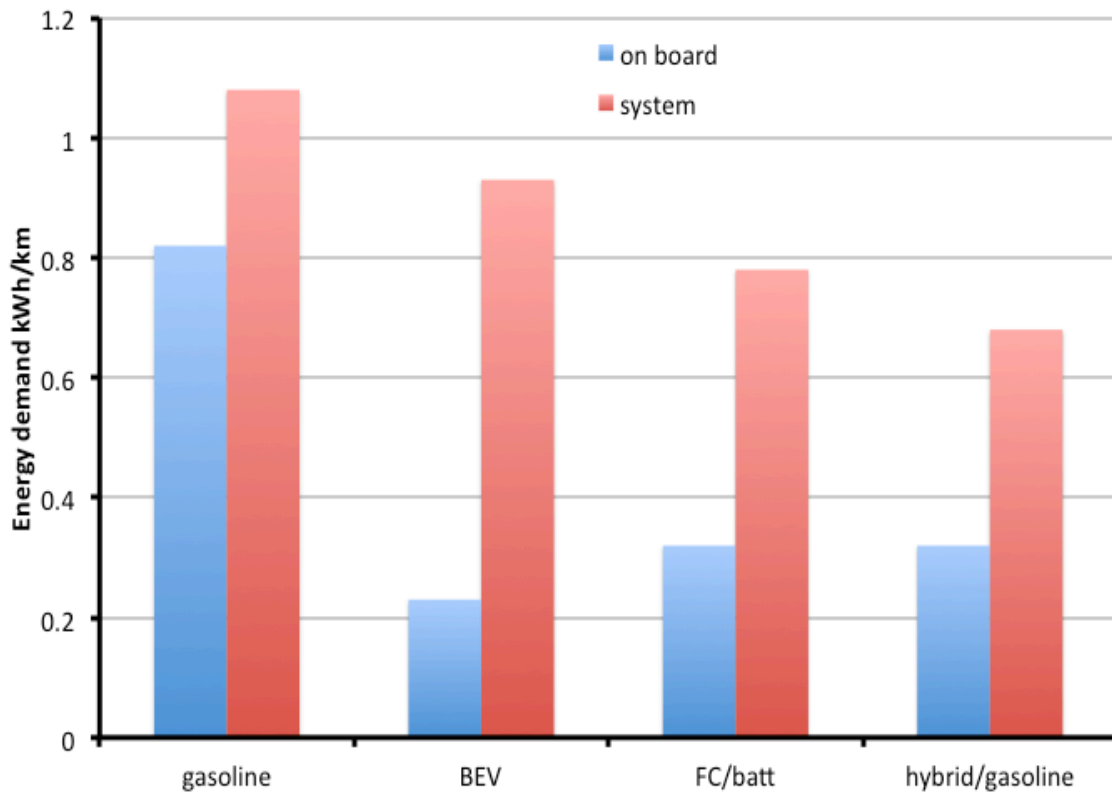
Emissionen der in die Zieldefinition einbezogenen Handlungsfelder

Handlungsfelder	1990 (in Millionen Tonnen CO ₂ -Äquivalent)	2014 (in Millionen Tonnen CO ₂ -Äquivalent)	2030 (in Millionen Tonnen CO ₂ -Äquivalent)	2030 (Minderung in Prozent gegenüber 1990)
Gesamtsumme	1248	902	543 bis 562	56 bis 55
Energiewirtschaft	466	358	175 bis 183	62 bis 61
Gebäude	209	119	70 bis 72	67 bis 66
Verkehr	163	160	95 bis 98	42 bis 40
Industrie	283	181	140 bis 143	51 bis 49
Landwirtschaft	88	72	58 bis 61	34 bis 31
Teilsumme	1209	890	538 bis 557	56 bis 54
Sonstige	39	12	5	87

Quelle: Bundesumweltministerium (2016). Klimaschutzplan 2050.

Anlage 3

Zur Effizienzbetrachtung in der e-Mobilität. Wählt man das Fahrzeug als Referenzrahmen, ist die e-Mobilität klar das günstigste System, wenn man den spezifischen Energieeinsatz alleine betrachtet. Außer Acht gelassen werden dabei die Effekte der Herstellung des Fahrzeugs und die Pfade zu dieser neuen Technologie. Betrachtet man aber die e-Mobilität im Energiesystem als Ganzes, so schlagen die Verluste für die Bereitstellung der Energie erheblich zu Buche.



Energieaufwand für einen Pkw mit unterschiedlichen Antriebssträngen. Blau: Effizienz im Fahrzeug, rot: Effizienz im europäischen Energiesystem. Nach(18)

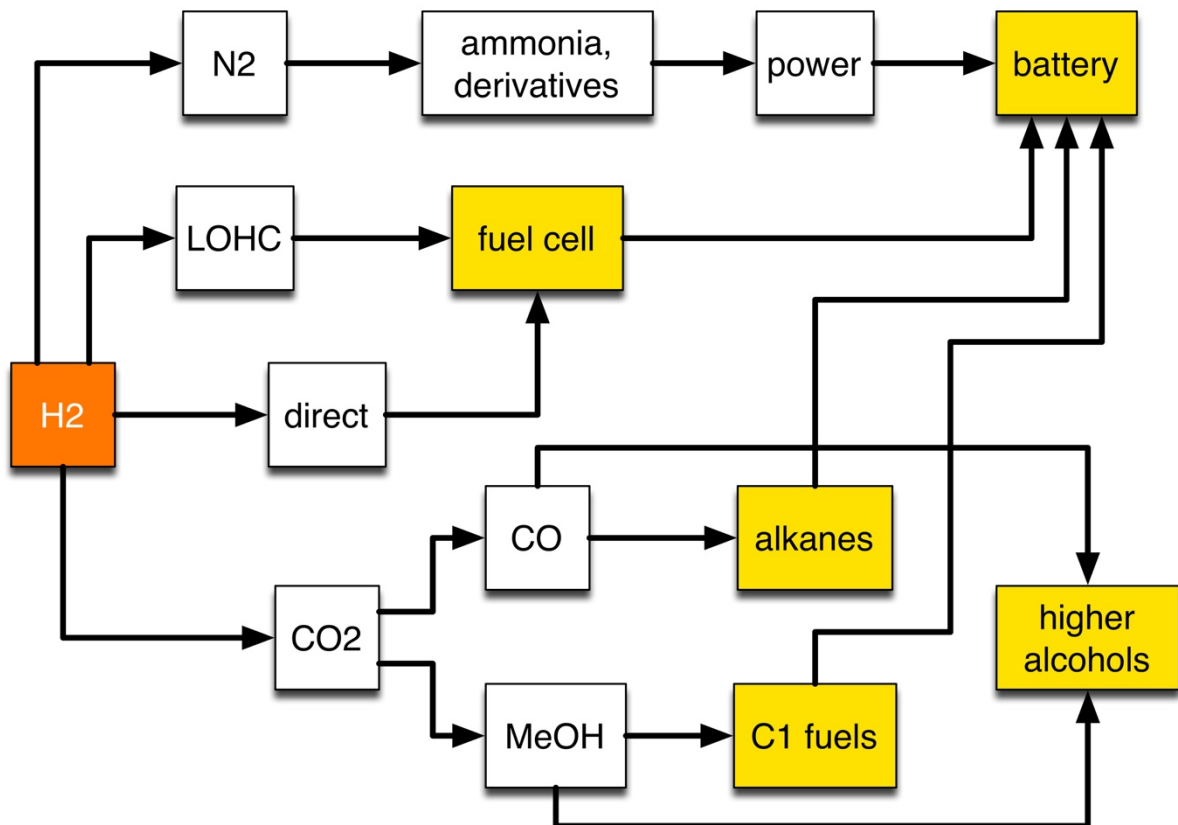
Regulatorisch ist die Anerkennung der e-Mobilität als Nullemissionstechnologie sicher unzutreffend, da in Europa selbst im Jahre 2050 derzeit von einem Kohlenstoff-Fußabdruck des Stromsystems von 220 g CO₂ pro kWh ausgegangen(15) wird, was zu systemischen Emissionen von ca. 150 g/km Fahrleistung führt.

Anlage 4

Es gibt viele Vorschläge für synthetische Kraftstoffe. Sie sollten nach den folgenden Kriterien ausgewählt werden:

- Kompatibilität mit heutigen Infrastrukturen
- Kompatibilität mit Motorsystemen
- Machbarkeit mit heutigen Kraftstoffen (als Einführungshilfe)
- Unterdrückung lokaler regulierter Emissionen (Stickoxide, Staub, VOC)
- Energiedichte je nach Anwendungsfall.

Mögliche Strukturen sind im Schaubild angegeben.

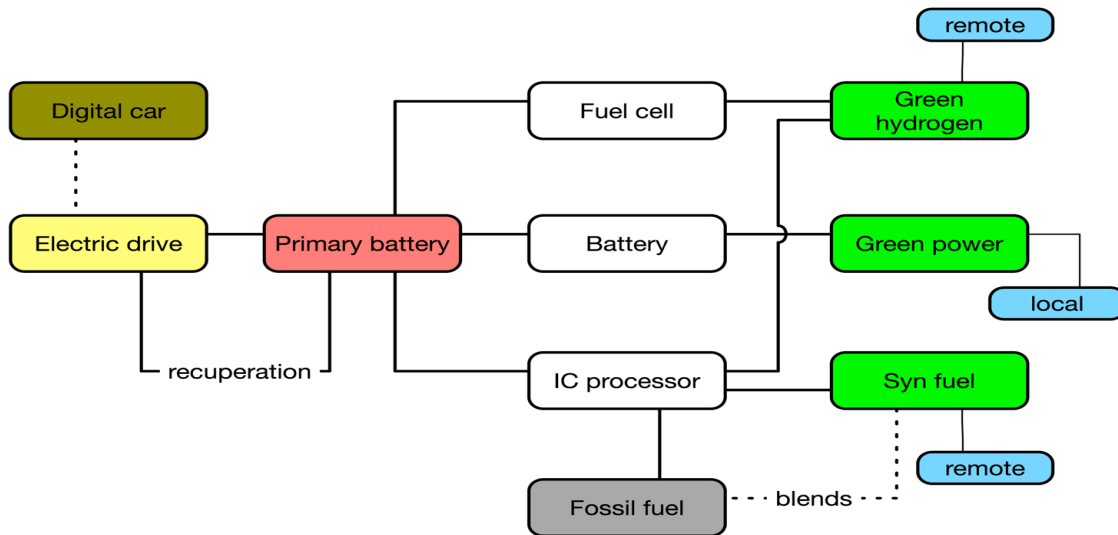


Alle auf CO₂ basierenden Molekülstrukturen und reiner Wasserstoff lassen sich in heutigen Verbrennungsmotoren nach geringfügigen Anpassungen einsetzen.

Kompatibilitäten mit Motorkonzepten und die massive Minderung lokaler Emissionen wurden eindeutig (19-24) nachgewiesen.

Anlage 5

Die Kombination von elektrischem Antrieb und vielen Optionen zur Energieversorgung jenseits einer relativ kleinen Batterie für Mittelstreckenfahrten verspricht einen sehr energie-günstigen Antriebsstrang, der „multimodal“ mit Energie versorgt werden kann.



Die Indikatoren „local“ und „remote“ beziehen sich auf die Quelle der erneuerbaren Energie relativ zum Ort der Nutzung des Fahrzeuges (auf einer globalen Skala).

Eine Realisation und ihre Verbrauchswerte findet man zum Beispiel bei Obrist.



HyperHybrid Leading Energy Efficiency

- Battery operation below 65km/h and hybrid mode above (HICE “On”)
- Concept fulfills requirements for governmental subsidies
- Continuous speed 145km/h - Top speed 168km/h
- 58km battery electric driving range (NEDC)
- Patent protected technology

CO₂ Emission: **31g/km**
CO₂ Class: **A+++**

Brand: Geely
Model: Emgrand EC7
Powertrain: HyperHybrid
Fuel: 95 octane gas

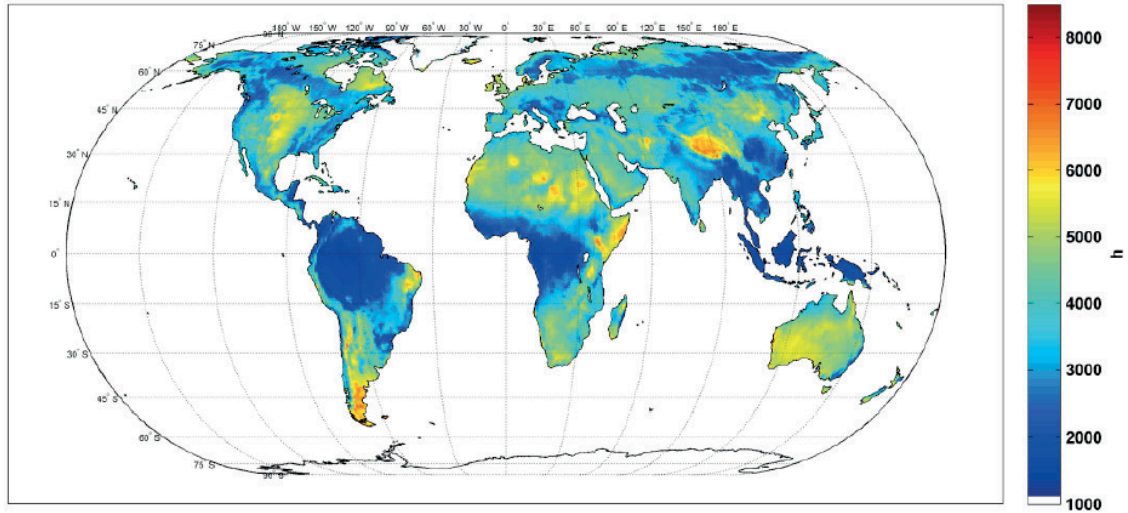
ECE101 Fuel Consumption (NEDC)
Urban: 1.0l/100km
Extra-Urban: 1.6l/100km
Total: 1.4l/100km



Anlage 6

Die Internationale Energieagentur erstellte einen Bericht, aus dem das Potenzial erneuerbarer Energien als Funktion des Ortes auf der Erde dargestellt ist. Die Maßeinheit ist in der folgenden Karte die Anzahl von Volllaststunden mit der Energiegewinnung aus Sonne und Wind zusammen genommen.

Figure 8. Hybrid solar and wind full load hours adjusted by critical overlap in 2005



Disclaimer: The boundaries and names shown and the designations used on maps included in this publication do not imply official endorsement or acceptance by the IEA.

Source: Adapted and based on Fasihi, Bogdanov and Breyer (2016), "Techno-Economic Assessment of Power-to-Liquids (PtL) Fuels Production and Global Trading Based on Hybrid PV-Wind Power Plants".

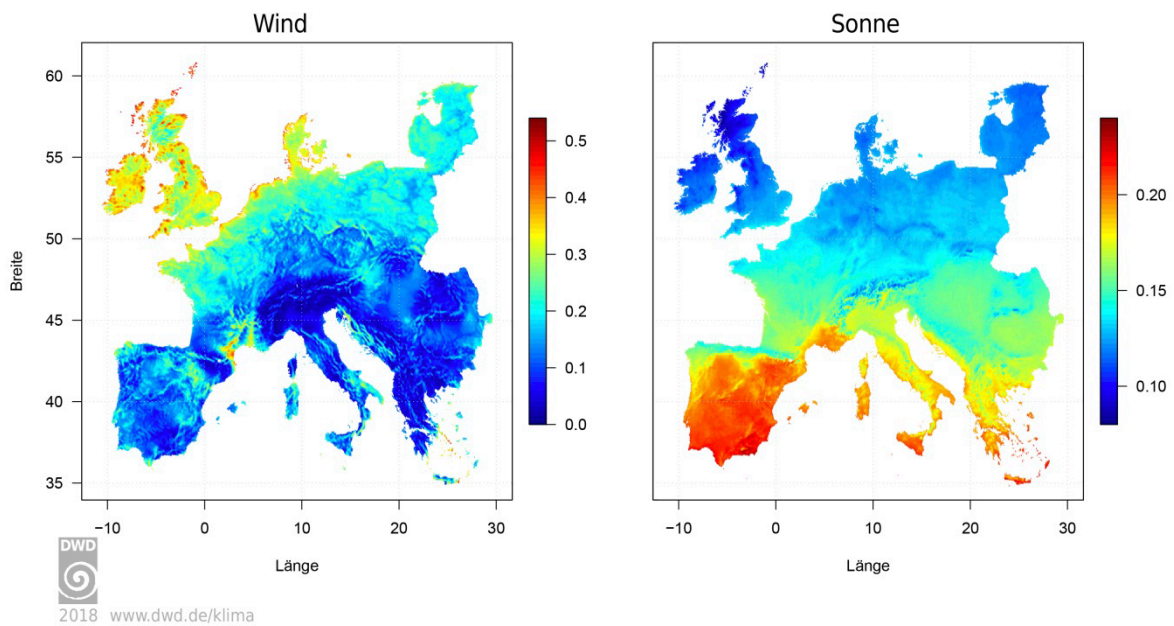
Aus: (25)

Lohnend vor allem für die Herstellung stofflicher Energieträger sind vor allem Regionen mit kumulativ mehr als 5000 Volllaststunden pro Jahr.

Anlage 7:

Der Deutsche Wetterdienst hat kumulativ für Europa die Sammeleffizienz von Wind und Sonnenkraftwerken ermittelt. Aus den Faktoren ergibt sich in Übereinstimmung mit Anlage 6, dass es in Deutschland mäßig gute Sammelstandorte gibt, die ungleichmäßig über das Land verteilt sind und nicht den Bedarfszentren entsprechen. Man versucht, dies durch den Netzausbau auszugleichen mit dem Leitbild der „Kupferplatte Deutschland“. Eine europäische Version dürfte viel zu aufwändig sein. Die Wandlung in Wärme und stoffliche Träger, also die „Sektorenkopplung“ als Alternative und als Transportform (siehe Abbildung 2) ist bisher nicht wesentlich in die Planung eingegangen.

Der mittlere Kapazitätsfaktor für Windenergie und Sonnenenergie über Europa (Mittelwert 1995 bis 2015)



Anlage 8

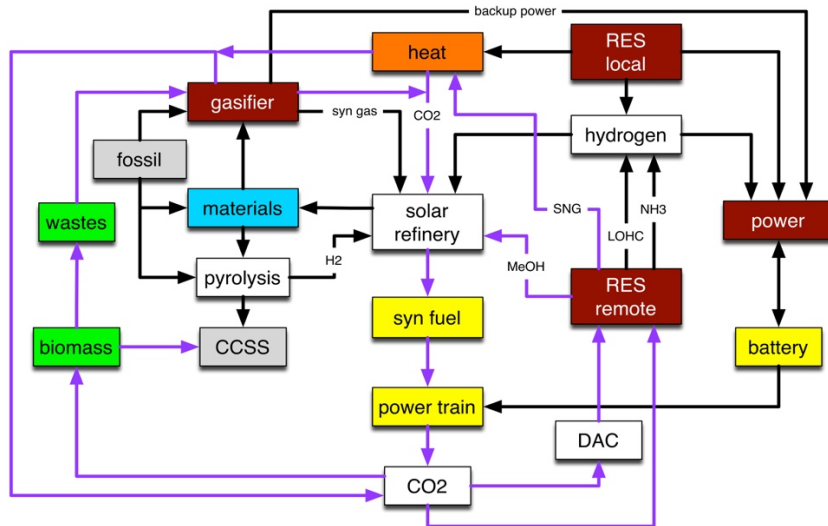
Deutschland unternimmt zahlreiche Ansätze einer europäischen Energiepolitik. In Summe scheint es aber, dass die Positionen, die Deutschland in Europa vertritt, eher retardierend und industriell-protektionistisch denn innovativ sind. Dies ist allerdings leider auch bei einigen anderen Nationen zu beobachten.

- Verordnung zur Governance der Energieunion
- Novelle der Erneuerbare-Energien-Richtlinie
- Novelle der Energieeffizienz-Richtlinie
- Novelle der Gebäudeeffizienz-Richtlinie
- Initiative „Beschleunigung der Umstellung auf saubere Energie in Gebäuden“
- Überarbeitetes Energieeffizienz-Label
- Risikovorsorge-Verordnung
- Novelle der Gasversorgungssicherheits-Verordnung
- Grenzüberschreitender Netzausbau
- Mitteilung der Kommission zum Schutz der kritischen Energie und Verkehrsinfrastruktur Europas
- Mitteilung der Kommission zum Interkonnektivitätsziel für 2030
- Regionale Kooperationen
- Novelle der Grenzüberschreitende-Erneuerbare-Energien-Verordnung (GEEV)
- Strom-Engpassbewirtschaftung an der deutsch-österreichischen Grenze
- Verordnung zum Elektrizitäts-Binnenmarkt
- Richtlinie zum Elektrizitäts-Binnenmarkt
- ACER-Verordnung
- Verordnung zur Festlegung einer Leitlinie über den Systemausgleich im Elektrizitätssystem
- Novelle der Erdgasbinnenmarkt-Richtlinie
- Tallinn e-Energy Declaration
- Energiediplomatie-Aktionsplan

Aus: 6. Monitoringbericht zur Energiewende (BMWi 2018)

Anlage 9

Etwas detailliertere Version eines Kreislaufes für erneuerbare Energie, der in Europa (und global) etabliert werden könnte. Alle nötigen Technologien sind prinzipiell, wenn auch mit sub-optimalen Prozesseffizienzen, verfügbar. Es sollte unbedingt vermieden werden, eine technische Monokultur zu schaffen. Vielmehr haben alle angegebenen Verfahren Vor- und Nachteile, die sich am besten in der gemeinsamen Nutzung ausgleichen lassen.



Die farbigen Pfeile deuten den Kreislauf des Kohlenstoffes an. „RES remote“ bezeichnet vom Nutzer entfernte erneuerbare Energie, wobei „entfernt“ eine Distanz meint, die sich mit Stromleitungen nicht ökonomisch überbrücken lässt. Ist die Entfernung geeignet für Stromtransport, gilt die Ressource als „lokal“. CCSS bezeichnet mit „carbon capture and solid storage“ das Verfahren der Mineralisation und Lagerung von ehemals biogenem Kohlenstoff.

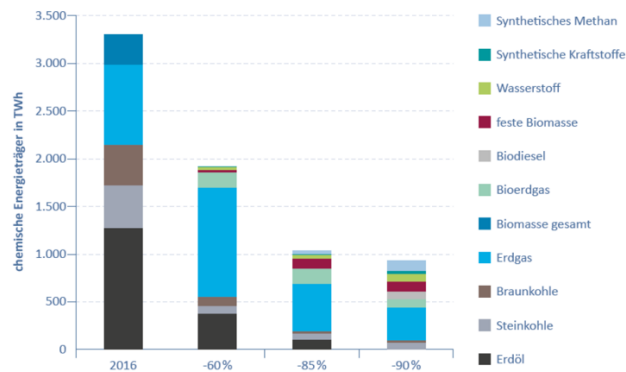


Abbildung 12: Zusammensetzung der chemischen Energieträger (einschließlich Biomasse) in den Modellrechnungen im Jahr 2050. Gezeigt sind Ergebnisse von drei ausgewählten Modellrechnungen mit unterschiedlichen Zielwerten energiebedingter CO₂-Emissionen (drei rechte Balken), sowie die Zusammensetzung im Jahr 2016³⁹ (linker Balken).

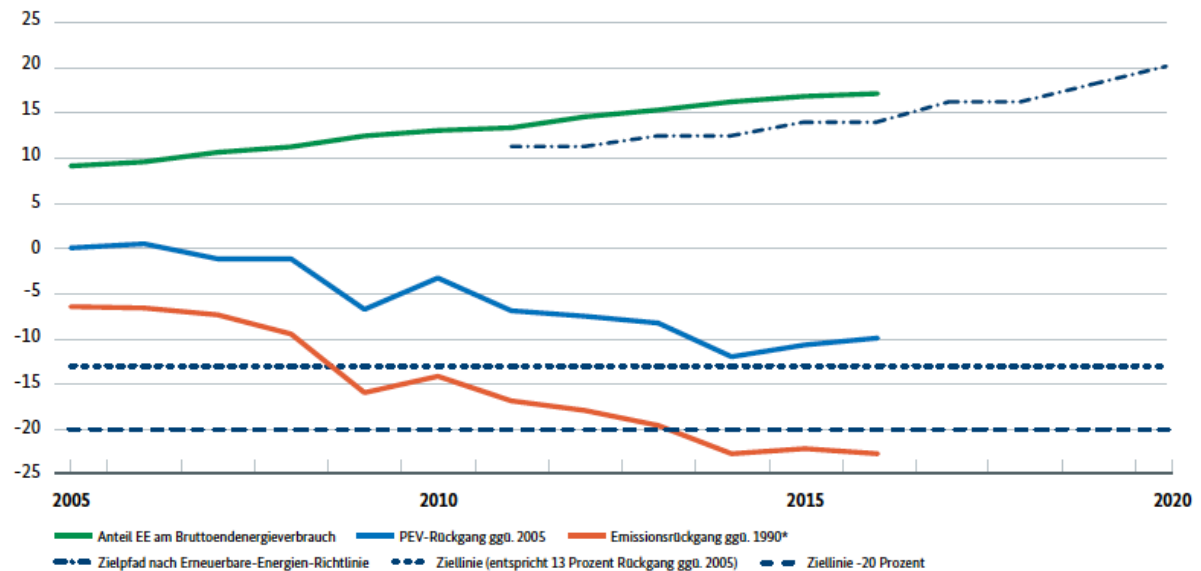
Eine Projektion der Größe chemischer Speicher findet sich in der ESYS-Stellungnahme „Sektorkopplung“ (2017)

Anlage 10

Die europäischen Energieziele in naher Zukunft scheinen nach Beurteilung der Bundesregierung (6. Monitoringbericht, 2018) gut erreichbar. Die Datenlage lässt diese Interpretation zu, gibt aber wenig Anlass zur Hoffnung, dass so die gewünschten ambitionierten weiteren Ziele erreichbar sein werden. Hier ist ein erheblicher „Aufbruch“ notwendig.

Abbildung 3.1: EU-Fortschritt bezüglich der 20-20-20-Ziele

in Prozent



*Daten für 2016 basieren auf Schätzungen der EEA

Quelle: Eurostat 02/2018 (EE- und PEV-Zahlen; PEV ohne nicht-energetischen Verbrauch); EEA 12/2017 (Emissionszahlen; ohne LULUCF, aber mit indirektem CO₂ und mit internationalem Luftverkehr); eigene Berechnungen

	2016	2020-Ziele	2030-Ziele (gemäß informeller Einigung im Trilog)	Bemerkungen
THG-Reduktion (ggü. 1990)	23 Prozent	mind. 20 Prozent	mind. 40 Prozent	verbindlich
THG-Reduktion im ETS (ggü. 2005) ¹	26 Prozent	21 Prozent	43 Prozent	verbindlich
THG-Reduktion im Non-ETS-Bereich (ggü. 2005) ¹				
• für EU gesamt	13,3 Prozent ²	10 Prozent	30 Prozent	verbindlich
• für Deutschland	4,9 Prozent ²	14 Prozent	38 Prozent	verbindlich
EE-Anteil				
• am Bruttoendenergieverbrauch auf EU-Ebene	17 Prozent	20 Prozent	32 Prozent	verbindlich
in Deutschland	14,8 Prozent	18 Prozent	keine länder- spezifischen Ziele	verbindlich
• im Wärme-/Kältesektor	13,2 Prozent		Anstieg von 1,1 Pro- zentpunkten pro Jahr (bei Anrech- nung von Abwärme und -kälte 1,3 Pro- zentpunkte pro Jahr)	indikativ
• im Verkehr	7,1 Prozent (EU) 6,9 Prozent (Deutschland)	10 Prozent	14 Prozent	kein Sektorziel, son- dern Verpflichtung, eine Inverkehrbrin- gerquote einzuführen
Verminderung des Energieverbrauchs				
• auf EU-Ebene	10 Prozent Rückgang des PEV ggü. 2005	um 20 Prozent ³ (entspricht 13 Pro- zent Rückgang des PEV ggü. 2005)	um 32,5 Prozent ³	keine Angabe
• in den einzelnen EU-Mitgliedstaaten		indikative nationale Beiträge zur Ziel- erreichung	indikative nationale Beiträge zur Ziel- erreichung	indikativ
		zudem Endenergie- einsparungen von 1,5 Prozent pro Jahr	zudem reale End- energieeinsparungen von 0,8 Prozent pro Jahr	verbindlich
Interkonnektivität in den EU-Mitgliedstaaten	2017 in Deutsch- land: 9 Prozent	10 Prozent	15 Prozent ⁴	indikativ
Stromhandel/-austausch		Gesamtsystem effizienter machen und Versorgungssicherheit erhöhen		

Quelle: BMWi 02/2018

1 siehe Kapitel 3.2

2 vorläufige Werte; Stand für EU gesamt: 09/2017; Stand für Deutschland: 01/2018; dabei sind die 2005-Basisjahr-Emissionen nach EEA wie folgt berechnet:

2005 Basisjahr-Emissionen = absolutes 2020-Ziel/(1+% des 2020-Ziels)

3 ggü. der Referenzentwicklung für 2020 bzw. 2030 (gemäß Primes-2007-Modell für die EU-Kommission)

4 Konkretisierung durch zusätzliche Schwellenwerte

Anlage 11

Die Monitoring-Kommission für die Energiewende hat die folgenden Kriterien für die Feststellung des Fortschrittes der Energiewende in Deutschland in verschiedenen Zielkategorien festgelegt. (Quelle 6. Monitoring Bericht zur Energiewende BMWi 2018)

Europa International	<ul style="list-style-type: none"> • EU-Ziele 2020/2030 • Physikalische Stromflüsse • Emissionshandel EU-ETS • Lastenteilung im Nicht-ETS-Bereich • Globale Investitionen in erneuerbare Energien und Energieeffizienz • Globale CO₂-Emissionen • Globale installierte Leistung erneuerbare Energien
Erneuerbare Energien	<ul style="list-style-type: none"> • Anteil der erneuerbaren Energien (EE) am Bruttoendenergieverbrauch • Anteil der EE am Bruttostromverbrauch • Erneuerbare Stromerzeugung nach Technologien • Bruttostromerzeugung nach Energieträgern • Anteil der EE am Wärme- und Kälteverbrauch • Anteil der EE im Verkehrssektor • EEG-Umlage nach Technologiesparten • Summe EEG-Umlage und Börsenstrompreise
Effizienz und Verbrauch	<ul style="list-style-type: none"> • Primärenergieverbrauch • Primär- und Endenergieproduktivität • Bruttostromverbrauch
Gebäude	<ul style="list-style-type: none"> • Anteil des gebäuderelevanten Endenergieverbrauchs am gesamten Energieverbrauch • Gebäuderelevanter Endenergieverbrauch/Endenergieverbrauch Wärme • Spezifischer Endenergieverbrauch Raumwärme • Primärenergiebedarf der Gebäude
Verkehr	<ul style="list-style-type: none"> • Endenergieverbrauch im Verkehr • Spezifischer Endenergieverbrauch Verkehr • Bestand an mehrspurigen Kraftfahrzeugen mit Antriebsart Elektro • Bestand an mehrspurigen Fahrzeugen mit Antriebsart Brennstoffzellen und Erdgas • Verlagerung auf die Schiene • Verlagerung auf den ÖPNV
Treibhausgasemissionen	<ul style="list-style-type: none"> • Treibhausgasemissionen • Treibhausgasemissionen nach Quellgruppen • Energiebedingte CO₂-Emissionen nach Sektoren • Vermiedene Treibhausgasemissionen durch erneuerbare Energien • Spezifische Treibhausgasemissionen bezogen auf Bevölkerung und BIP

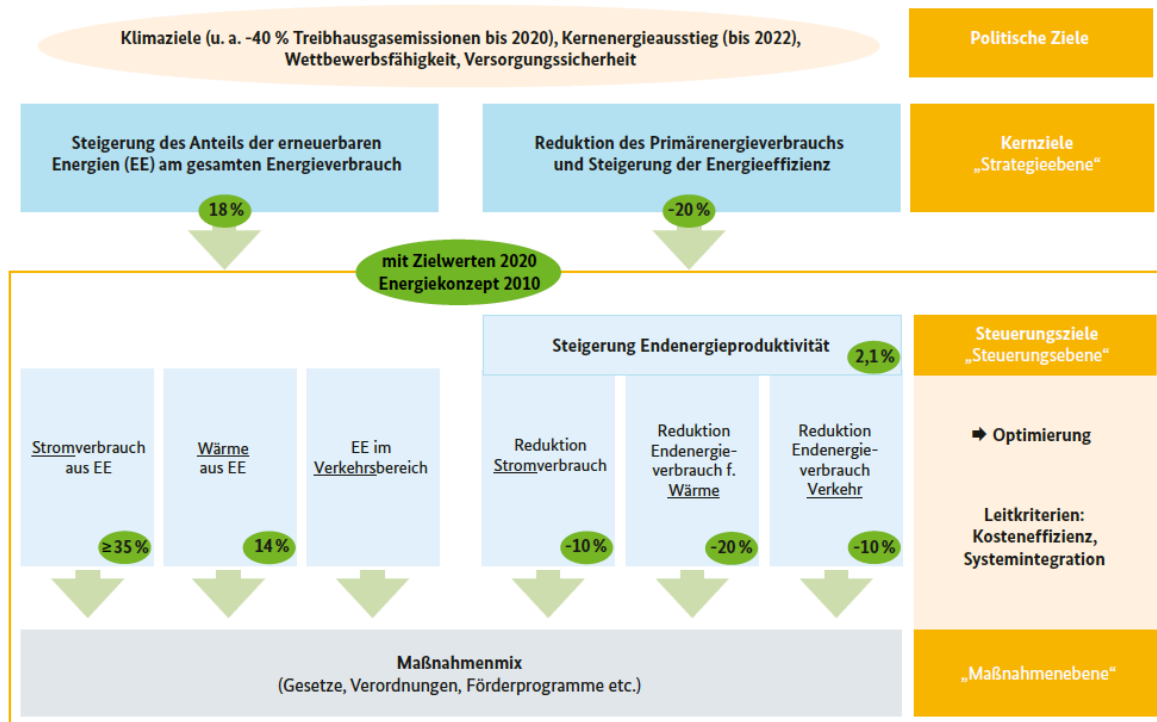
Versorgungssicherheit Kernenergieausstieg	<ul style="list-style-type: none"> • Installierte Leistung Stromerzeugungsanlagen • Verteilung der Kraftwerkskapazitäten auf Bundesländer • Kraft-Wärme-Kopplung inklusive Stromerzeugung • Zu- und Rückbau konventioneller Erzeugungskapazitäten • Leistung Pumpspeicherkraftwerke • Fahrplan Kernenergieausstieg • SAIDI-Strom • In Bau befindliche konventionelle Kraftwerke
Bezahlbarkeit Wettbewerbsfähigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Letztverbraucherenausgaben für Strom und Anteil am BIP • Energieausgaben privater Haushalte • Strompreise privater Haushalte • Energiekosten der Industrie • Öl- und Gaspreise • Börsenstrompreise • Strompreise nicht begünstigter Industrieunternehmen • Gesamtwirtschaftliche Energieausgaben • Energiepreise im internationalen Vergleich
Umweltverträglichkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Umweltbezogenes Monitoring der Energiewende anhand eines geeigneten Indikatorensatzes (wird entwickelt)
Netzinfrastuktur	<ul style="list-style-type: none"> • EnLAG- und Bundesbedarfsplan-Projekte • Netzinvestitionen • Netzentgelte • Kosten für Systemdienstleistungen
Sektorkopplung Digitalisierung	<ul style="list-style-type: none"> • Anzahl und Stromverbrauch Wärmepumpen • Anzahl und Stromverbrauch Elektromobilität • Fernsteuerbarkeit und Fernmessbarkeit von EE-Anlagen • Smart Meter in privaten Haushalten • Smart Meter in der Industrie • Digitalisierung der Energiewende und Energiewirtschaft
Energieforschung Innovation	<ul style="list-style-type: none"> • F&E-Ausgaben der Industrie • Forschungsausgaben des Bundes im Energieforschungsprogramm • Projektförderungen aus EU-Mitteln • Patente • Marktverbreitung innovativer Technologien im Energieverbrauch
Investitionen Wachstum Beschäftigung	<ul style="list-style-type: none"> • Investitionen in erneuerbare Energien und Energieeffizienz • Investitionen in Netze und Elektrizitätsversorgung • Durch den Einsatz von erneuerbaren Energien eingesparte Primärenergieträger • Beschäftigte im Bereich erneuerbarer Energien • Beschäftigte in der Energiewirtschaft

Quelle: eigene Darstellung BMWi 03/2018

*Neu gegenüber dem fünften Monitoring-Bericht ist das Indikatorenfeld zum neu aufgenommenen Kapitel 11 „Umweltverträglichkeit der Energieversorgung“

Anlage 12

Zielsysteme für die Energieversorgung. In Deutschland wird folgender hierarchischer Ansatz verfolgt:



Quelle: eigene Darstellung BMWi 10/2016

Neben dieser Hierarchie hat man eine Kategorie weiterer Ziele geschaffen, die neben den obigen Zielen stehen.

Versorgungssicherheit	Die Energienachfrage in Deutschland jederzeit effizient decken.
Kernenergieausstieg	Die letzten Kernkraftwerke mit dem Ablauf des Jahres 2022 abschalten.
Bezahlbarkeit Wettbewerbsfähigkeit	Bezahlbarkeit von Energie erhalten und die Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands sichern.
Umweltverträglichkeit	Die Energieversorgung umwelt-, klima- und naturverträglich gestalten.
Netzausbau	Netze bedarfsgerecht ausbauen und modernisieren.
Sektorkopplung Digitalisierung	Die Potenziale einer effizienten Sektorkopplung und der Digitalisierung für das Gelingen der Energiewende nutzen.
Forschung Innovation	Zukunftsweisende Innovationen für den Umbau der Energieversorgung vorantreiben.
Investitionen Wachstum Beschäftigung	Arbeitsplätze in Deutschland erhalten und ausbauen und Grundlagen für dauerhaften Wohlstand und Lebensqualität schaffen.





Quelle: eigene Darstellung BMWi 03/2018

Eine zugehörige Liste der quantitativen Ziele hat man ebenfalls geschaffen.

Tabelle 2.1: Ziele auf europäischer und internationaler Ebene

Europa International	Einen verlässlichen europäischen und internationalen Rahmen für mehr Klimaschutz, Erneuerbare und Energieeffizienz schaffen.
---------------------------------------	--

Tabelle 2.2: Quantitative Ziele der Energiewende und Status quo (2016)

	2016	2020	2030	2040	2050
Treibhausgasemissionen					
Treibhausgasemissionen (gegenüber 1990)	-27,3%*	mindestens -40 %	mindestens -55 %	mindestens -70 %	weitgehend treibhausgas-neutral -80 % bis -95 %
Erneuerbare Energien					
Anteil am Bruttoendenergieverbrauch	14,8 %	18 %	30 %	45 %	60 %
Anteil am Bruttostromverbrauch	31,6 %	mindestens 35%**	mindestens 50 % EEG 2017: 40 bis 45 % bis 2025**	mindestens 65 % EEG 2017: 55 bis 60 % bis 2035	mindestens 80 %
Anteil am Wärmeverbrauch	13,2 %	14 %			
Effizienz und Verbrauch					
Primärenergieverbrauch (gegenüber 2008)	-6,5 %	-20 %			
Endenergieproduktivität (2008–2050)	1,1 % pro Jahr (2008–2016)	2,1 % pro Jahr (2008–2050)			
Bruttostromverbrauch (gegenüber 2008)	-3,6 %	-10 %			
Primärenergiebedarf Gebäude (gegenüber 2008)	-18,3 %				
Wärmebedarf Gebäude (gegenüber 2008)	-6,3 %	-20 %			
Endenergieverbrauch Verkehr (gegenüber 2005)	4,2 %	-10 %			

Quelle: eigene Darstellung BMWi 03/2018

* vorläufiger Wert für 2016

** Mit dem Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD wurde ein weiterer zielstrebig, effizienter, netzsynchroner und zunehmender marktorientierter Ausbau der erneuerbaren Energien beschlossen. Unter diesen Voraussetzungen ist ein Anteil von etwa 65 Prozent erneuerbare Energien bis 2030 angestrebt; entsprechende Anpassungen werden vorgenommen. Sonderausschreibungen im Bereich Wind und Solarenergie sollen zum Klimaschutzziel 2020 beitragen. Die Herausforderung besteht in einer besseren Synchronisierung von erneuerbaren Energien und Netzkapazitäten.

Anlage 13:

Die Aufwendungen für Energieforschung sind in Europa erheblich. Deutschland nimmt hier eine führende Stellung ein. Auch im nationalen Forschungsprogramm wird viel für Energieforschung getan.

Abbildung 19: Länderverteilung der Zuwendungsempfänger und Fördermittel (absolut und prozentual) im Kernbereich der Energieforschung in „Horizont 2020“ im Jahr 2016 in Mio. €

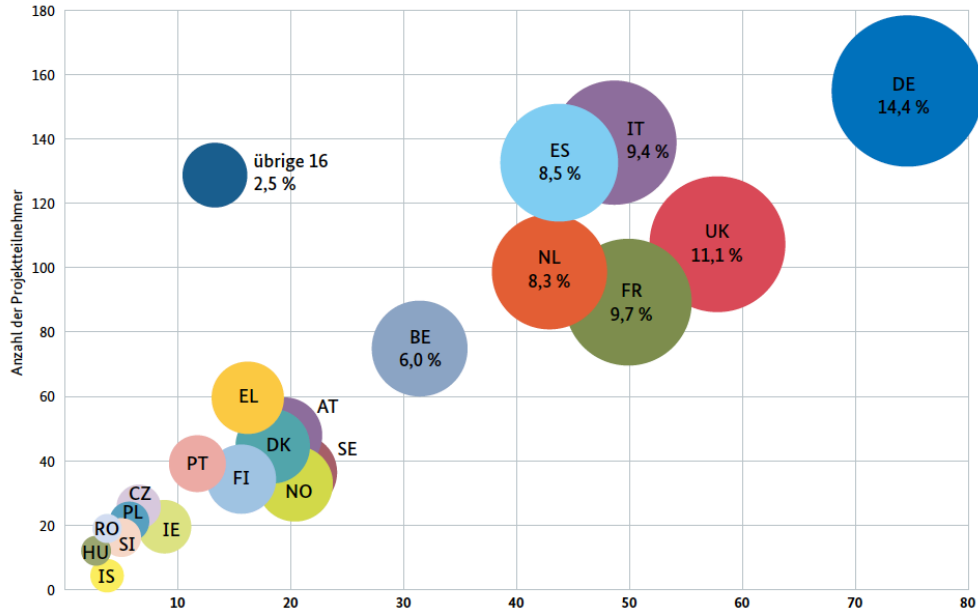


Abbildung 17: Aufwendungen für die nichtnukleare Energieforschung nach Ländern 2008–2016 in Mio. € (Daten siehe Tabelle 8)

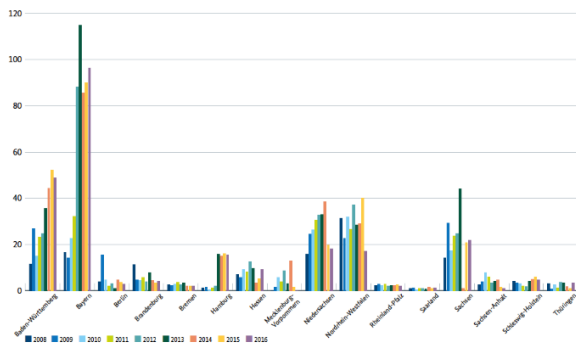
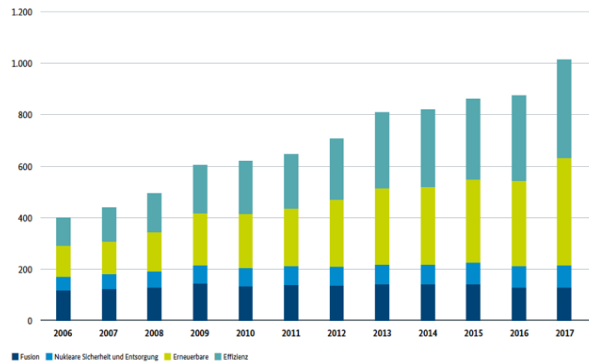


Abbildung 1: Übersicht der Themen im Energieforschungsprogramm des Bundes in Mio. € (Daten siehe Tabelle 1)

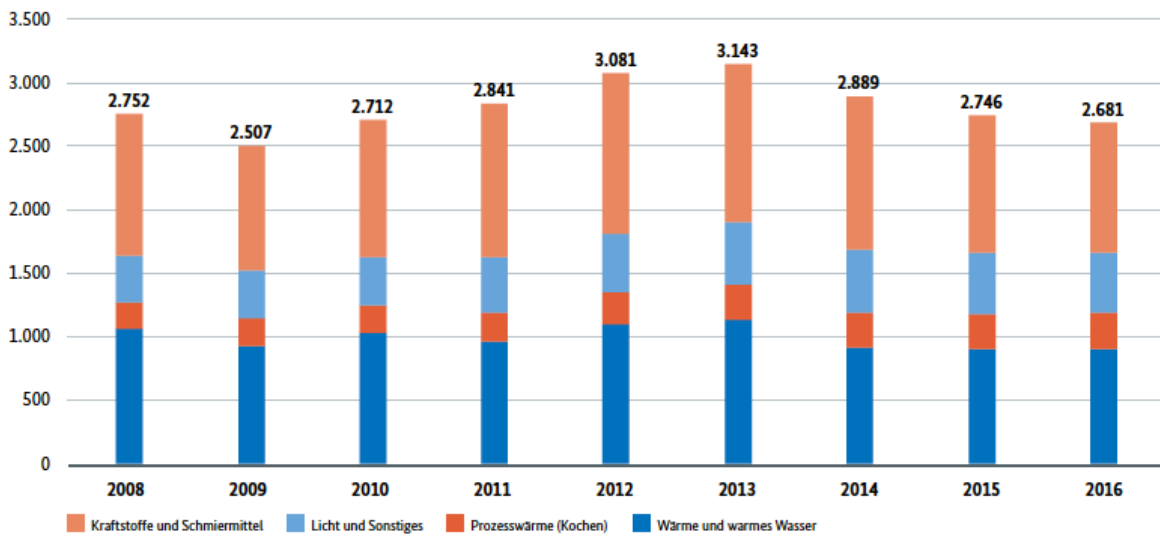


Quelle: Bericht zum 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung (BMW, 2018)

Anlage 14

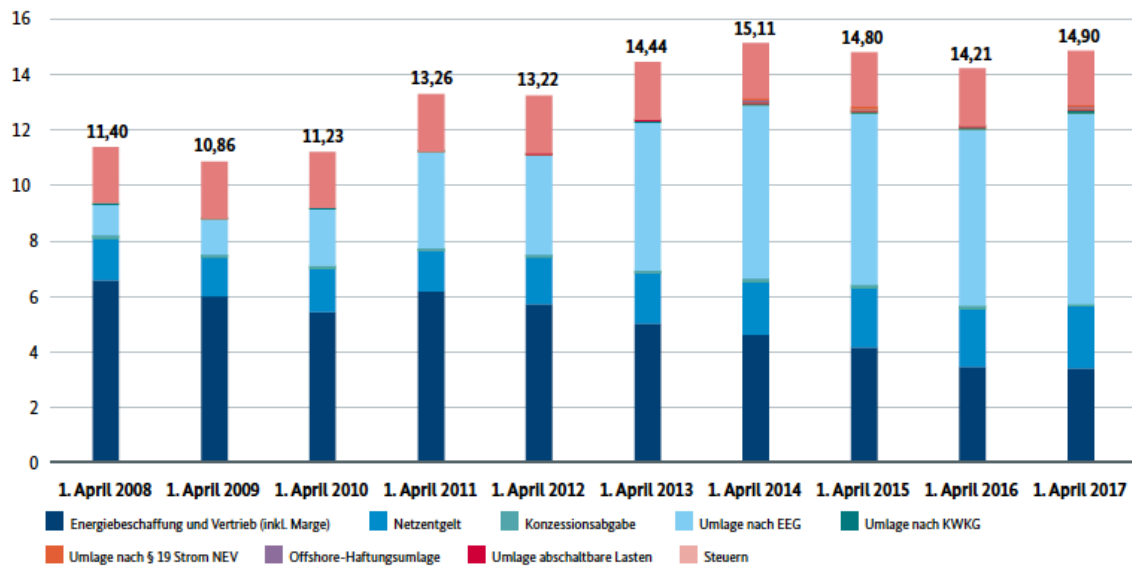
Strompreise sind trotz ihrer Spitzenwerte in der EU der relativ geringste Anteil im Energiebudget deutscher Privathaushalte. In der Summe geben die Privathaushalte etwas mehr als 100 Milliarden € jährlich für hauptsächlich fossile Energie aus. Stromkosten für Industrieunternehmen setzen sich anders zusammen. Je Ausnahmeregelungen bezahlen sie zwischen ca. 6 und 15 Cent/kWh. Der Anteil der Stromkosten an den Produktionskosten variiert sehr stark von Branche zu Branche in der Spanne von 0,5 % bis etwa 6 % mit einem Mittelwert von etwa 3 % (Quelle BMWi Daten 2018).

Abbildung 10.3: Durchschnittliche jährliche Energieausgaben privater Haushalte in Euro



Quelle: BMWi auf Basis StBA und AGEb 11/2017

Abbildung 10.7: Strompreise für Industrieunternehmen, die nicht unter Entlastungsregelungen fallen in ct/kWh



Quelle: BNetzA 11/2017. Die Daten sind jeweils zum Stichtag 1. April des Jahres ermittelt worden. Angenommen wird ein Jahresverbrauch von 24 GWh (Jahreshöchstlast 4.000 kW und Jahresnutzungsdauer von 6.000 Stunden) in der Mittelspannung. Angaben zu Steuern bis 2013 inklusive Umsatzsteuer.

Anlage 15

Die Gesamtkosten des Umbaus des Energiesystems hängen stark von den politisch angestrebten Zielen ab (hier als CO₂ Einsparziel definiert). Sie steigen stark überproportional mit ambitionierten Zielen, die eventuell zweifelhaft in ihrer nachhaltigen Wirkung sein können. Man beachte den Referenzwert für die nötigen kumulierten Investitionen der ohnehin fällig wird, selbst wenn keine weiteren Maßnahmen zum Umbau des Energiesystems ergriffen werden.

(Quelle; esys: Stellungnahme „Sektorenkopplung (2017)“)

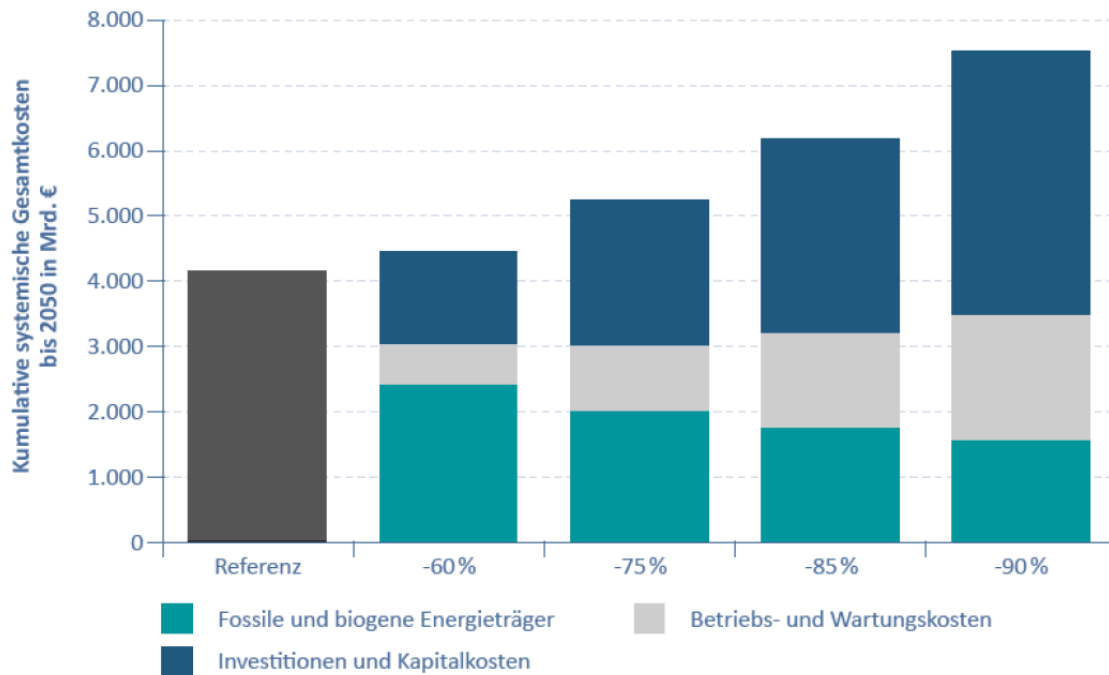


Abbildung 13: Kumulative systemische Gesamtkosten bis zum Jahr 2050 für Systementwicklungen, die sich hinsichtlich der Zielwerte der Reduktion energiebedingter CO₂-Emissionen unterscheiden.

Anlage 16

Beispielhafte Vorschläge für „Vorabmaßnahmen“, die das Klimakabinett zusätzlich zu existierenden Aktionen ergreifen könnte. Sie sind so konzipiert, dass sie deutlich sichtbar werden und als Teile einer dauerhafteren Strategie dienen. Sie testen die Bereitschaft der Akteure auch „schmerzhafte“ Maßnahmen mitzutragen. Die folgenden Stichpunkte müssten zu ausgearbeiteten Optionen entwickelt werden. Sie sind weder nach Priorität noch zeitlicher Reihenfolge geordnet.

1. Auftrag an das BMBF, eine Informations- und Kommunikationsstruktur zu realisieren, die eine breite Beteiligung der Bürger ermöglicht. Verantwortungen für Inhalte festlegen. Geeignete Begleitforschung einrichten. Ressourcen hinreichend nachhaltig bereitstellen. Beginn mit Piloten in 2020.
2. Stilllegungsprämien für Kohlekraftwerke degressiv gestalten. Wenn bis 2022 stillgelegt wird, gibt es die vereinbarte Prämie, danach für jedes Jahr 10 % Abzug. Verpflichtung, die Prämien in nationale Energieinfrastruktur nachweislich zu investieren.
3. Kohleregionen als industrielle Standorte für die systemische Energieindustrie erhalten und ertüchtigen. Alle Strukturmaßnahmen darauf ausrichten. Tätigkeiten: Ersatzstrom für volatile Erneuerbare, power2X Produkte wie Kraftstoffe. Dies nicht mehr nur erforschen, sondern umsetzen.
4. Dazu diese Gebiete sofort zu Ausnahmeregionen erklären, in denen der Gebrauch von Erneuerbaren Energien nicht den Regelungen des EEG unterliegt.
5. Ertüchtigung der Wasserstoff-Infrastruktur durch nationale Vernetzung und Erweiterung um Pipeline-Systeme in den Süden Europas.
6. Parallel Aufbau einer Wasserstofferzeugung in industriellem Maßstab in Südeuropa (siehe Anlage 7). Schaffung der regulatorischen gesicherten Rahmenbedingungen für diese europäische Kooperation.
7. Vorantreiben der Konzepte zu Reallaboren mit attraktiven Rahmenbedingungen in ganz Deutschland.
8. Vorbereitung der Beendigung der EEG -Regelungen des in ganz Deutschland. Dies gleichzeitig mit der Einführung einer Bepreisung von CO₂. Auftrag an das BMWi dazu mehrere Optionen unter Berücksichtigung der europäischen Dimension zu erarbeiten.
9. Priorisierung des Umbaus der regulatorischen Bedingungen gemeinsam mit der Wirtschaft, um die Nutzung und die dringend nötigen Zubauten an Erneuerbaren effektiv zu koordinieren.
10. Erneuerbare Energie ohne EEG-Auflagen in die Wärmeerzeugung einkoppeln.
11. Einführung des generellen Tempolimits.
12. Planung plausibilisieren, wie grüner Wasserstoff und grüner Strom in Deutschland für den Verkehr verfügbar gemacht wird, wie diese Ressourcen mit den übrigen Anforderungen geteilt werden, und wer für die Versorgung die Verantwortung (und Kosten) übernimmt.
13. Europäische Harmonisierung der Einrichtung von Ladeinfrastrukturen und Wasserstofftankstellen, um einen grenzüberschreitenden Verkehr zu garantieren.
14. Produktion und schrittweise Einführung synthetischer Kraftstoffe in geeigneten Segmenten vor allem des Schwerverkehrs.
15. Einrichtung einer interministeriellen Koordinierungsstruktur für die Energieforschung mit subsidiären Einheiten. Die existierenden Strukturen stark straffen, arbeitsfähig machen und einen Weg zur Umsetzung der Beschlüsse definieren.

Literatur und Quellen

1. Rockstrom J., Gaffney O., Rogelj J., Meinshausen M., Nakicenovic N., Schellnhuber HJ. CLIMATE POLICY A roadmap for rapid decarbonization. *Science*. 2017;355(6331):1269-71.
2. Ausfelder F., Beilmann C., Bertau M., Brauning S., Heinzl A., Hoer R., et al. Energy Storage Technologies as Options to a Secure Energy Supply. *Chemie Ingenieur Technik*. 2015;87(1-2):17-89.
3. Schlögl R. Pack die Sonne in den Tank: Zur Weiterentwicklung nachhaltiger Energiesysteme. *Angew Chem*. 2018;131:349-54.
4. Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina (2013): Bioenergie – Möglichkeiten und Grenzen. : Leopoldina; 2013.
5. Abanades JC, Rubin ES, Mazzotti M., Herzog HJ. On the climate change mitigation potential of CO₂ conversion to fuels. *Energy & Environmental Science*. 2017;10(12):2491-9.
6. Leitner W., Klankermayer J., Pischinger S., Pitsch H., Kohse-Hoinghaus K. Advanced Biofuels and Beyond: Chemistry Solutions for Propulsion and Production. *Angewandte Chemie-International Edition*. 2017;56(20):5412-52.
7. Hariharan S., Mazzotti M. Kinetics of flue gas CO₂ mineralization processes using partially dehydroxylated lizardite. *Chemical Engineering Journal*. 2017;324:397-413.
8. Klankermayer J., Wesselbaum S., Beydoun K., Leitner W. Selective Catalytic Synthesis Using the Combination of Carbon Dioxide and Hydrogen: Catalytic Chess at the Interface of Energy and Chemistry. *Angewandte Chemie-International Edition*. 2016;55(26):7296-343.
9. Truffer B., Schippl J., Fleischer T. Decentering technology in technology assessment: prospects for socio-technical transitions in electric mobility in Germany. *Technological Forecasting and Social Change*. 2017;122:34-48.
10. Altenburg T., Schamp EW, Chaudhary A. The emergence of electromobility: Comparing technological pathways in France, Germany, China and India. *Science and Public Policy*. 2016;43(4):464-75.
11. Gust D., Moore TA, Moore AL. Solar Fuels via Artificial Photosynthesis. *Accounts of Chemical Research*. 2009;42(12):1890-8.
12. Palzer A., Henning HM. A Future German Energy System with a Dominating Contribution from Renewable Energies: A Holistic Model Based on Hourly Simulation. *Energy Technology*. 2014;2(1):13-28.
13. Reuss M., Grube T., Robinius M., Preuster P., Wasserscheid P., Stolten D. Seasonal storage and alternative carriers: A flexible hydrogen supply chain model. *Applied Energy*. 2017;200:290-302.
14. Henning HM, Palzer A. A comprehensive model for the German electricity and heat sector in a future energy system with a dominant contribution from renewable energy technologies Part I: Methodology. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2014;30:1003-18.
15. Artz J., Muller TE., Thenert K., Kleinekorte J., Meys R., Sternberg A., et al. Sustainable Conversion of Carbon Dioxide: An Integrated Review of Catalysis and Life Cycle Assessment. *Chemical Reviews*. 2018;118(2):434-504.

16. Smit B, Graham R., Styring P., Yao J., Clough P., Lee JSM, et al. CCS - A technology for the future: general discussion. *Faraday Discussions*. 2016;192:303-35.
17. Schlögl R. Die mobilisierte Energiewende. *Angew Chem*. 2017;129(37):11164-7.
18. Lombardi L., Tribioli L., Cozzolino R., Bella G. Comparative environmental assessment of conventional, electric, hybrid, and fuel cell powertrains based on LCA. *International Journal of Life Cycle Assessment*. 2017;22(12):1989-2006.
19. Hartl M., Seidenspinner P., Jacob E, Wachtmeister G. Oxygenate screening on a heavy-duty diesel engine and emission characteristics of highly oxygenated oxymethylene ether fuel OME1. *Fuel*. 2015;153:328-35.
20. Deutsch D., Oestreich D., Lautenschütz L., Haltenort P., Arnold U., Sauer J. High Purity Oligomeric Oxymethylene Ethers as Diesel Fuels. *Chemie Ingenieur Technik*. 2017;89(4):486-9.
21. Iannuzzi SE, Barro C., Boulouchos K., Burger J. Combustion behavior and soot formation/oxidation of oxygenated fuels in a cylindrical constant volume chamber. *Fuel*. 2016;167:49-59.
22. Maus W., Jacob E. Future-safe combustion-engined Drives - The Role of sustainable Fuels. Liebl J., Beidl C., editors 2015. 283-4 p.
23. Omari A., Heuser B., Pischinger S. Potential of oxymethylenether-diesel blends for ultra-low emission engines. *Fuel*. 2017;209:232-7.
24. Deutz S., Bongartz D., Heuser B., Katelhon A., Langenhorst LS, Omari A., et al. Cleaner production of cleaner fuels: wind-to-wheel - environmental assessment of CO₂-based oxymethylene ether as a drop-in fuel. *Energy & Environmental Science*. 2018;11(2):331-43.
25. Philibert C. *Renewable Energy for Industry*. Paris: International Energy Agency; 2017.