



IMPULS

Wege zu einem integrierten Energiesystem – was jetzt geschehen muss

Deutschland kann bis zum Jahr 2050 treibhausgasneutral werden. Dafür braucht es innovative und effiziente Technologien sowie wirkungsvolle Rahmenbedingungen und ökonomische Anreize. Doch das allein reicht nicht: Die Energiewende wird nur gelingen, wenn Lösungen gemeinsam mit den Bürgerinnen und Bürgern entwickelt werden und alle Beteiligten dazu bereit sind, ihre Gewohnheiten an die Herausforderungen anzupassen. Schreiben wir die aktuelle Entwicklung hingegen fort, wird das CO₂-Budget für das 1,5-Grad-Ziel in rund 10 Jahren aufgebraucht sein.

Die Herausforderungen sind also groß: Wollen wir die Klimaziele erreichen, müssen der Energieverbrauch gesenkt, die Sektoren Strom, Wärme und Verkehr miteinander verknüpft und der Energiebedarf von Haushalten und Industrie flexibel gesteuert werden. Um die Weichen für ein solches **integriertes Energiesystem** zu stellen, gilt es, jetzt zu handeln. Denn Entscheidungen, Planung und Umsetzung brauchen viel Zeit, und Gelegenheitsfenster dürfen nicht verpasst werden: So werden private Fahrzeuge nur etwa alle zehn bis zwanzig Jahre ausgetauscht, Heizungssysteme alle 25 Jahre, und Kraftwerke bleiben oft 50 Jahre oder länger in Betrieb.

Die Bundesregierung muss gemeinsam mit den Bundesländern und Kommunen folgende Punkte zügig und entschlossen umsetzen, damit Deutschland seine Energieversorgung, -verteilung und -nutzung langfristig umstellen und seine internationalen Verpflichtungen erfüllen kann. Entscheidend dafür sind systemübergreifende Ansätze und eine offene und transparente Kommunikation. Mit wissenschaftlicher Expertise und fachübergreifenden Diskussionen liefert das Akademienprojekt „Energiesysteme der Zukunft“ (ESYS) einen Beitrag zu der Debatte, wie die Energiewende erfolgreich gestaltet werden kann.

10 Punkte für ein integriertes Energiesystem

1. Generationenprojekt Energiewende gemeinsam gestalten
2. Internationale Allianzen für einen sektorübergreifenden CO₂-Preis schmieden
3. Steuern, Abgaben und Umlagen reformieren
4. Energie- und Ressourceneffizienz priorisieren
5. Den Ausbau erneuerbarer Energien beschleunigen
6. Flexibilität und Sektorkopplung als Leitprinzipien der Energieversorgung verankern
7. Mobilität neu denken, Konzepte für einen klimaschonenden Verkehr entwickeln
8. Anstrengungen im Gebäudesektor deutlich erhöhen
9. Bioenergie systemdienlich nutzen
10. CCS-Technologie und CO₂-Kreislaufwirtschaft (CCU) neu diskutieren

1. Generationenprojekt Energiewende gemeinsam gestalten

Die Energiewende ist ein generationenübergreifendes Großprojekt. Sie bietet große Chancen – für saubere Luft, die Entwicklung neuer Technologien, Wertschöpfung und Export sowie nachhaltige Stadt- und Mobilitätskonzepte. Gleichzeitig verlangt sie der Gesellschaft viel ab, darunter hohe Investitionen, Veränderungen im Landschaftsbild, die Umstellung auf neue Technologien und die Bereitschaft zu anderen Lebensgewohnheiten. Fest steht: Damit Deutschland seinen Beitrag leisten kann, den globalen Klimawandel einzudämmen und die damit verbundenen Risiken zu begrenzen, muss die Energiewende gelingen. Gelingt die globale Energiewende nicht, drohen nachfolgenden Generationen große Belastungen. Doch wie kann die Politik den Stillstand überwinden, Widerstände auflösen, Ängste abbauen und die Menschen wieder für die Energiewende begeistern? Eine grundlegende Voraussetzung ist ein offener und transparenter Dialog. Dieser muss die Chancen in den Vordergrund stellen, darf jedoch die Folgen und Kosten einer konsequenten Klimapolitik nicht verschweigen. Vier Punkte sind dabei entscheidend:

- a) **Vision entwickeln:** Damit die Menschen bereit sind, die Energiewende und die erforderlichen Veränderungen mitzutragen, brauchen sie eine gemeinsame Vision. Dazu gehört auch umfangreiches Wissen über verfügbare Technologien, die einerseits hohe Lebensqualität sichern, andererseits aber die eigene Lebenswelt verändern.
- b) **Entscheidungen gemeinsam treffen:** Welche Technologien sollen vorrangig eingesetzt werden? Wie sollen Städte und der ländliche Raum zukünftig gestaltet werden? Welche Verantwortung tragen Bürgerinnen und Bürger, Unternehmen, die öffentliche Hand und die Politik bei der Transformation des Energiesystems? Nur wenn die Vor- und Nachteile verschiedener Optionen abgewogen werden und die Beteiligten zusammenkommen, können Wege für die Energiewende gefunden werden.
- c) **Folgen aufzeigen:** Eine konsequente Klimapolitik erfordert teils große Änderungen von Lebensgewohnheiten. Auto fahren, fliegen, Fleischkonsum, flexibler Energieverbrauch – die Klimaziele sind nur zu erreichen, wenn wir unser Leben in vielen Bereichen spürbar umstellen. Werden diese Veränderungen und Folgen einer engagierten Klimapolitik nicht transparent gemacht, können sich später große Widerstände entwickeln und die Energiewende ausbremsen.
- d) **Offen die Kosten ansprechen:** Die Energiewende ist mit erheblichen Investitionen verbunden, die sich pro Jahr bis 2050 im Mittel auf rund ein bis zwei Prozent des Bruttoinlandsproduktes belaufen können. Um den gesellschaftlichen Konsens zu bewahren, muss die Politik transparent über „Gewinner und Verlierer“ des damit verbundenen Transformationsprozesses sprechen sowie Lösungen für besonders betroffene Haushalte und Unternehmen finden. Gleichzeitig gilt es, den wertvollen Beitrag zu verdeutlichen, den die Energiewende zur Begrenzung des Klimawandels leisten kann. Da Deutschland eine Vorbildfunktion als leistungsfähige, energieintensiv wirtschaftende Industrienation hat, dürfte dieser Beitrag die mit der Energiewende verbundene Emissionsreduktion deutlich übersteigen.

2. Internationale Allianzen für einen sektorübergreifenden CO₂-Preis schmieden

Ein ausreichend hoher CO₂-Preis über alle Sektoren hinweg ist das zentrale Steuerungsinstrument für den Klimaschutz. Denn ein Preis auf CO₂ würde das Ziel, die Treibhausgasemissionen zu senken, in den Mittelpunkt stellen, emissionsintensive Energieträger aus dem Markt drängen und ineffiziente Prozesse unrentabel machen. Richtig ausgestaltet kann die CO₂-Bepreisung andere individuelle Fördermechanismen und sogar das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) überflüssig machen. Um den CO₂-Preis so auszurichten, dass ein für die kommenden Jahrzehnte festzulegendes CO₂-Budget erreicht wird, wäre es sinnvoll, mit diesem Ziel den **europäischen Emissionshandel (EU-ETS) auf alle Sektoren** zu erweitern.

Um Unternehmen und Investoren gleichzeitig die für ihr Handeln dringend benötigte Planungssicherheit zu verschaffen, sollte darüber hinaus im EU-ETS ein **Mindestpreis** eingeführt werden. Einige Fachleute empfehlen einen Mindestpreis von 30 Euro pro Tonne CO₂, während weitere Experten eine Lenkungswirkung ab einem Mindestpreis von 50 Euro pro Tonne CO₂ erwarten. Für einen erfolgreichen europäischen Beitrag zum Klimaschutz sollten langfristig alle Treibhausgase in allen Sektoren – insbesondere auch Methan- und Lachgas in der Landwirtschaft – entsprechend ihrer CO₂-Äquivalente bepreist werden.

Gelingt die Einigung auf einen europaweiten CO₂-Preis nicht, sollte Deutschland alles daransetzen, strategische Partner für eine **Vorreiterallianz in Europa** zu gewinnen, die harmonisierte nationale CO₂-Preise insbesondere auch außerhalb des EU-ETS einführt. Länder wie Frankreich, Großbritannien, Schweden oder Dänemark haben bereits erfolgreich einen CO₂-Preis etabliert und kämen als Partner für ein solches Bündnis infrage; die Niederlande wollen im Januar 2020 einen CO₂-Mindestpreis einführen.

Ein nationaler CO₂-Preis – der aber nie mehr sein kann als der Einstieg in eine wachsende internationale Allianz – wäre zwar auf längere Sicht nicht hinreichend, um den Klimaschutz erfolgreich voranzutreiben. Er würde aber immerhin dazu beitragen, dass Deutschland seine eigenen Klimaziele mit möglichst geringen Kosten erreichen kann und helfen, klimaschonende Technologien am Markt zu etablieren.

Ergänzend zu einem CO₂-Preis müssen **flankierende Maßnahmen** sicherstellen, dass Unternehmen, die im internationalen Wettbewerb stehen und aufgrund eines CO₂-Preises mit steigenden Produktionskosten rechnen müssten, ihre Produktion nicht in andere Länder verlagern („Carbon Leakage“). Je größer die internationale Allianz für den Klimaschutz, desto leichter ließen sich Carbon Leakage verhindern. Importierte Produkte müssten entsprechend ihres CO₂-Gehalts bepreist werden, damit den nationalen bzw. europäischen Unternehmen keine Nachteile entstehen. Ebenso ist die Politik gut beraten, für Bürgerinnen und Bürger aus den zusätzlichen Einnahmen aus der CO₂-Bepreisung Ausgleichszahlungen vorzusehen. Für besonders belastete Bürgerinnen und Bürger wären weitere Kompensationszahlungen zu erwägen.

Ein CO₂-Preis ist jedoch **kein Allheilmittel**. Das Preissystem muss durch Maßnahmen ergänzt werden, die einen Strukturwandel anstoßen und den Systemwandel einleiten können. Allen voran ist der Staat gefragt, Infrastrukturen um- und neu aufzubauen; zum Beispiel Ladesäulen, Wasserstoffversorgungsnetze sowie Schienennetze für den Individual- und Güterverkehr und den öffentlichen Nahverkehr. Denn nur wenn es genügend Alternativen gibt, kann der CO₂-Preis einen „**Technologieswitch**“ bewirken. Bestehende Effizienzvorgaben wie die Energieeinsparverordnung im Gebäudebereich oder die CO₂-Grenzwerte für Pkw und Lkw können sinnvoll sein und müssen separat diskutiert werden.

3. Steuern, Abgaben und Umlagen reformieren

Der Energieverbrauch wird heute mit einer Vielzahl von Steuern, Abgaben und Umlagen belastet, die je nach Energieträger und Sektor sehr unterschiedlich ausfallen. Dazu gehören Netzentgelte, Konzessionsabgaben, Energiesteuern, Kraftstoffsteuern und die EEG-Umlage. Das Problem: Diese Belastung ist nicht systematisch am CO₂-Gehalt der Energieträger ausgerichtet und entfaltet daher nur eine begrenzte klimapolitische Lenkungswirkung. So wird insbesondere Strom aus Erneuerbaren durch die Stromsteuer und die EEG-Kosten deutlich höher belastet als Benzin, Heizöl und Erdgas. Die Folge: Strom als Antrieb im Verkehr oder zur Wärmezeugung zu nutzen, ist vergleichsweise teuer, selbst wenn er aus regenerativen Quellen stammt. Das heutige System setzt also implizit unterschiedliche CO₂-Preise an, die aus klimapolitischer Sicht eine völlig falsche Wirkung entfalten.

Dieses System muss **dringend reformiert und verschlankt** werden, damit sich klimaschonende Energieträger am Markt durchsetzen können und eine Kopplung der Sektoren Strom, Wärme und Verkehr unter Marktbedingungen möglich wird. Dafür muss die Basis für alle **Steuern, Abgaben und Umlagen im Energiebereich einheitlich** werden. Eine solche Reform, verbunden mit der Einführung eines wirksamen, einheitlichen CO₂-Preises, würde dafür sorgen, dass diejenigen Technologien die Kosten tragen, die am meisten Kohlendioxid ausstoßen. Gleichzeitig würden klimaschonende Technologien entlastet, und spezifische Technologieförderungen könnten teilweise entfallen. Durch eine solche **verursachungsgerechte Belastung** würden die Gesamtkosten der Energiewende voraussichtlich deutlich sinken.

Überschussstrom, der ohne weitere Maßnahmen nicht genutzt werden kann, sollte zu einem eigenen Tarif, der stark von Abgaben und Umlagen befreit ist, angeboten werden können. Voraussetzung dafür ist, dass es insgesamt nicht zu Mindereinnahmen kommt und keine ungewünschten Lenkungswirkungen entstehen.

4. Energie- und Ressourceneffizienz priorisieren

Die Energiewende in Deutschland wird nur gelingen, wenn der Energieverbrauch deutlich sinkt. Effiziente Wankungsketten und eine höhere Effizienz auf der Nutzungsseite helfen substanzial, den Energieverbrauch zu reduzieren. Wo immer möglich, sollte **Strom als primärer Energieträger** zum Einsatz kommen – zum Beispiel, um Elektrofahrzeuge oder Wärmepumpen anzutreiben – und damit ineffiziente Verbrennungsprozesse ersetzen. Nicht mit Strom abdeckbare Bereiche wie der Flugverkehr oder verschiedene industrielle Prozesse können mit Wasserstoff oder synthetischem Methan bzw. Kraftstoffen bedient werden.

Der Ausbau der Erneuerbaren und der Stromnetze führt zu einem erheblichen Verbrauch von materiellen Ressourcen und zu massiven Eingriffen in Landschaft, Ökosysteme und die Lebenswelt der Bürgerinnen und Bürger. **Energieeffizienz** kann zur Stellschraube werden, um den Ausbau zu begrenzen und die Belastungen möglichst gering zu halten. Da Effizienzstandards häufig aufgrund von Rebound-Effekten nicht die angestrebte Wirksamkeit entfalten können, muss eine **erfolgreiche Effizienzstrategie** zudem die folgenden Maßnahmen umfassen:

- a) Eine **effektive Bepreisung von CO₂**, die langfristig planbar ist, setzt Anreize zum sparsamen Umgang mit Energie bei gegebenem Kapitalstock und zur Investition in effiziente Maschinen, Geräte und Fahrzeuge.
- b) Investitionen in die **Erforschung energieeffizienter und ressourcensparender Technologien** sind notwendig, um die Kosten der Technologien zu verringern und den Verbrauchern Alternativen zu bieten.
- c) **Markteinführungsprogramme** für neue Technologien können den CO₂-Preis zeitweise ergänzen, um die Lücke zwischen Forschung und Markteinführung zu überbrücken, da hohe Stückzahlen eine Kostenreduktion ermöglichen (**Economy-of-Scale-Effekt**) und so den Markteintritt erleichtern.
- d) **Anreizprogramme zum Austausch älterer Technologien** – etwa Prämien beim Austausch von Ölheizungen und ineffizienten Kühlgeräten – helfen zusätzlich, den Einsatz effizienter Technologien zu erhöhen. So könnten insbesondere einkommensschwächere Haushalte dabei unterstützt werden, kapitalintensive Geräte und Anlagen auszutauschen.
- e) **Aufklärungskampagnen**, eine Ausweitung der **Energieberatung** und **verhaltensökonomisch fundierte Maßnahmen** sind weitere wichtige Bausteine einer Effizienzstrategie. Durch sanftes „Anstupsen“ („Nudging“) könnten Bürger zu energiesparendem Verhalten ermutigt werden. So können Energielabels auf Haushaltsgeräten nachweislich dazu beitragen, dass Konsumenten stromsparende Geräte wählen.
- f) **Digitalisierung** und eine **intelligente Steuerung** des Energiesystems können den Energieverbrauch senken. Sie sorgen dafür, dass Energie vor allem dann genutzt wird, wenn sie wenig CO₂ verursacht, etwa zu Zeiten hoher Sonneneinstrahlung. Die Digitalisierung muss jedoch durch Regulierungen stärker unterstützt und durch Standards und Datenschutzrichtlinien sicher gestaltet werden.
- g) Ein **effizienter Umgang mit Materialressourcen** ist ein Schlüsselement für eine erfolgreiche Energiewende. Ansätze aus der **Kreislaufwirtschaft** helfen, den Bedarf nachhaltig zu decken: Produkte durch ressourcenschonende Alternativen (**Substitution**) zu ersetzen, aus hochwertigem Recycling zu gewinnen und durch höhere **Langlebigkeit, Reparaturfähigkeit** und die **„Sharing Economy“** länger nutzbar zu machen, reduziert den Rohstoffbedarf und die Umweltbelastungen. Zudem wird Deutschland dadurch unabhängiger von Importen.

5. Den Ausbau erneuerbarer Energien beschleunigen

Strom aus erneuerbaren Quellen wird zum wichtigsten Energieträger der Zukunft. Er wird nicht nur für klassische Stromanwendungen gebraucht, sondern auch zum Heizen, für industrielle Prozesse und um Fahrzeuge anzutreiben. Um den steigenden Strombedarf decken und fossile Kraftwerke vom Netz nehmen zu können, müssten Photovoltaik- und Windkraftanlagen massiv ausgebaut werden – aber ebenso die Stromnetze, die unverzichtbar sind, um Erneuerbare in das System zu integrieren. Im Jahr 2050 kann das **Fünf- bis Siebenfache** der heutigen Leistung von Windkraft- und Solaranlagen notwendig sein. Das würde einen Ausbau von etwa **8 bis 12 Gigawatt pro Jahr** bedeuten; etwa das Doppelte der vergangenen Jahre und deutlich mehr, als die im EEG vorgesehenen Ausbaukorridore vorsehen.

Das zentrale Instrument dafür, diesen massiven Ausbau voranzutreiben, liegt in der Einrichtung eines verlässlichen CO₂-Preissystems. Nur wenn Treibhausgase mit einem hinreichend hohen Preis versehen sind, etwa in einem europaweiten, alle Sektoren umspannenden EU-ETS, werden sich erneuerbare Energien direkt am Markt gegen emissionsintensive fossile Energieträger durchsetzen können. Sollte es nicht gelingen, rasch einen ausreichend hohen CO₂-Preis zu etablieren, müsste der Ausbau der Erneuerbaren durch andere Instrumente vorangetrieben werden, zum Beispiel durch eine Erhöhung der Ausbaukorridore. Dadurch würden allerdings die Gesamtkosten vermutlich deutlich steigen.

Eine weitere **Herausforderung ist der Flächenbedarf**: Bei der Windenergie reichen die heute verfügbaren Flächen nicht aus, um den zukünftigen Bedarf zu decken. Um mehr Windanlagen errichten zu können, sollten die bestehenden Abstandsregelungen angepasst und Genehmigungs- und Raumordnungsverfahren vereinfacht werden. Ein so starker Ausbau von Windenergieanlagen verändert jedoch das Landschaftsbild und ist für viele Menschen schwer vorstellbar. Um die Bürgerinnen und Bürger von Anfang an einzubeziehen und ihnen die Vorteile und Chancen dieser Veränderungen aufzuzeigen, muss die Politik einen aktiven Dialog mit ihnen führen und sie in Entscheidungen und Verfahren einbinden.

Für Photovoltaik steht grundsätzlich weit mehr Fläche zur Verfügung als benötigt wird. Möglicherweise könnte Photovoltaik insofern auch einen größeren Beitrag zur zukünftigen Stromerzeugung leisten, wenn die kostenoptimalen Ausbaumengen für Windenergie an Land nicht erreichbar sind. Allerdings könnten auch hier Freiflächenanlagen bei intensivem Ausbau auf Akzeptanzprobleme stoßen. Zwar sind die Potenziale für Photovoltaik in der bebauten Umwelt mengenmäßig mehr als ausreichend, allerdings sind die Stromgestehungskosten in der Regel höher als bei Freiflächenanlagen. Deshalb sollten Maßnahmen zur gezielten Entwicklung kostengünstiger integrierter Photovoltaik-Konzepte unter Einbeziehung moderner, hochautomatisierter Fertigungsverfahren für angepasste Photovoltaik-Module angegangen werden. Es bestehen vielfältige Möglichkeiten: von der Gebäudeintegration über die Integration in urbane Räume, zum Beispiel über Parkplätzen und an Lärmschutzwänden, bis hin zur Mehrfachnutzung von Flächen in der Landwirtschaft (Agro-Photovoltaik).

6. Flexibilität und Sektorkopplung als Leitprinzipien der Energieversorgung verankern

Um die schwankende Einspeisung aus Windkraft- und Solaranlagen auszugleichen und zu jedem Zeitpunkt eine hohe Versorgungssicherheit und Systemstabilität zu garantieren, wird Flexibilität im Energiesystem zu einer Grundanforderung. Dabei sind Lösungen für **kurzfristige** und **langfristige Zeiträume** notwendig. Während technische Lösungen grundsätzlich zur Verfügung stehen, bietet der Markt bisher nur begrenzte Anreize, diese Elemente der Flexibilität auch zu nutzen. Beispielsweise wird die Netznutzung nicht zeitlich oder räumlich flexibel bepreist, was zu strukturellen Engpässen führen kann. Ein **neues Strommarktdesign**, das eine flexible Erzeugung, einen flexiblen Verbrauch und Speicher anreizt und langfristige Rahmenbedingungen für Investitionssicherheit schafft, kann **Geschäftsmodelle für die verschiedenen Flexibilitätsanbieter** ermöglichen.

Folgende Punkte sind dabei relevant:

- a) **Kurzfristige Flexibilität:** Zur Überbrückung weniger Stunden stehen zum Beispiel Pumpspeicherwerke, Batterien oder flexible Erzeuger und Verbraucher zur Verfügung. Diese können auf allen Spannungsebenen einen Beitrag zur Netzdienlichkeit und Systemstabilität liefern. Zudem können **Power-to-X-Technologien** wie thermische Speicher oder Gas- und Kraftstofferzeugungsanlagen Energie bei Stromerzeugungsspitzen aufnehmen und für andere Sektoren zur Verfügung stellen. Für einen marktgerechten Einsatz von sehr vielen Erzeugern, Speichern und Verbrauchern mit geringer Leistung werden außerdem neue Lösungen mit geringen Transaktionskosten benötigt.
- b) **Langfristige Flexibilität:** Um die Versorgung in langen wind- und sonnenarmen Zeiten („**Dunkelflauten**“) zu sichern, werden weiterhin regelbare Kraftwerke benötigt, voraussichtlich etwa im Umfang des heutigen Kraftwerksparks. Sie sollten vorwiegend mit Wasserstoff und synthetischen Brenn- und Kraftstoffen aus Langzeitspeichern – die in Deutschland überwiegend Salzkavernen sein werden – betrieben werden, Übergangsweise auch mit Erdgas. Allerdings werden diese Kraftwerke mit immer niedrigerer Auslastung laufen. Ob das heutige Marktdesign im Sinne eines „Energy-Only-Marktes“ sicherstellen kann, dass sie sich dennoch refinanzieren können, ist noch nicht absehbar. Die Politik sollte jetzt damit beginnen, ein Marktdesign zu entwickeln, das Aufbau und Betrieb von flexiblen Reservekraftwerken langfristig sicherstellt.
- c) **Regionale Märkte für Flexibilität:** Für die Stromverteilnetze fallen für Endverbraucher ähnlich hohe Kosten an wie für die Stromerzeugung. Um den Verteilnetzausbau gering zu halten, sind Maßnahmen für ein aktives Netzmanagement erforderlich. Einen Ansatz bieten regionale, räumlich kleinteilige Märkte für Flexibilitäten. So kann eine **zellulare Struktur** entstehen, die Teile des Gesamtsystems durch Flexibilität, digitale Steuerung und Marktmechanismen zuverlässig betreibbar macht und den Ausbaubedarf von Verteilnetzen verringert.
- d) **Resilientes System schaffen:** Die Flexibilisierung macht eine durchgehende **Digitalisierung des Energiesystems** notwendig. Damit einhergehende Fragen der Cybersecurity, des Datenschutzes, des Informationsmanagements und der Resilienz sind von hoher Bedeutung. Redundanzen über Hardwareregulungen auf Frequenz und Spannung sind ein wichtiges Element, um die Basisversorgung auch bei Ausfällen oder Hackerangriffen aufrechtzuerhalten.

7. Mobilität neu denken, Konzepte für einen klimaschonenden Verkehr entwickeln

Der Verkehrssektor bildet das **Schlusslicht der Energiewende**: Der Energieverbrauch und der Anteil erneuerbarer Energien am Endverbrauch sind heute auf dem gleichen Stand wie vor etwa 30 Jahren. Effizienzverbesserungen in der Motorentechnik werden durch größere, leistungsstärkere und mehr Fahrzeuge, höhere Anforderungen an Abgasbehandlung sowie einen steigenden Güterverkehr auf der Straße überkompensiert.

Nur mit einem **Technologiemix** kann der Verkehr klimafreundlich werden. Da **batterieelektrische Fahrzeuge** regenerativ erzeugten Strom direkt und effizient nutzen, sind sie eine Schlüsseltechnologie der Mobilität der Zukunft. Im **Stadtverkehr** und im Kurzstreckenpersonen- und innerstädtischen Lieferverkehr werden sie eine zentrale Rolle einnehmen. Aber auch für schwere Lkw, Busse und Pkw für lange Strecken gibt es umfangreiche Forschung, Entwicklung und eine Vielzahl von Produkten.

Für einen Durchbruch der Elektromobilität wird jedoch eine flächendeckende Ladeinfrastruktur benötigt. Die Politik sollte dafür die Rahmenbedingungen schaffen und ergänzende Maßnahmen wie steuerliche und rechtliche Vereinfachungen für das Laden beim Arbeitgeber prüfen. Standardlademöglichkeiten für jeden Haushalt würden das Problem zudem erheblich entspannen.

Wasserstoff oder elektrische Oberleitungen könnten helfen, die Emissionen im **Schwerlast- und Fernverkehr** zu senken. Sie benötigen jedoch eine eigene Infrastruktur. Die Politik müsste solche großflächigen Infrastrukturmaßnahmen durch verlässliche Rahmenbedingungen und Regulierungen absichern.

Biokraftstoffe und **synthetische Kraftstoffe** werden im Mobilitätssektor insbesondere im **Güter-, Schiffs- und Flugverkehr** eine wichtige Rolle spielen. Da sie gut speicher- und transportierbar sind und damit aus sonnen- und windreichen Regionen importiert werden können, eignen sie sich gut zur Ergänzung der heimischen Energieversorgung. Bei **Importen** synthetischer Kraftstoffe ist darauf zu achten, dass auch global betrachtet die CO₂-Emissionen zurückgehen: Wenn ein Land synthetische Energieträger herstellt und exportiert, selbst aber noch Stromerzeugung mit fossilen Brennstoffen betreibt, werden insgesamt keine Emissionen eingespart.

Doch eine rein technologische Weiterentwicklung wird nicht reichen. Ein Verkehrskonzept, das hauptsächlich auf einen Individualverkehr im Auto setzt, verbraucht viele Ressourcen. Es gilt, **Mobilität neu zu denken**, die räumliche Vernetzung von **Lebens- und Arbeitswelten neu zu organisieren** und **neue Verkehrskonzepte** zu entwickeln. Insbesondere in den Städten bieten die **Verkehrsvermeidung**, das Teilen von Fahrzeugen („**Sharing**“) sowie **emissionsfreie** (Fuß- und Radverkehr) und **emissionsärmere** (ÖPNV, E-Bikes, Pedelecs, Elektroautos, E-Scooter) **Verkehrsarten** große Potenziale. Autonom fahrende Fahrzeuge, die pro Nutzung gebucht werden, führen nicht zwangsläufig zu weniger Verkehr, aber zu einem deutlich geringeren Verbrauch an Parkraum und Materialressourcen.

Wichtige Bausteine für die künftige Mobilitätsstrategie sind eine vorausschauende Stadtplanung („Stadt der kurzen Wege“) und Regulierungen, die klimaschonenden Verkehrsträgern Vorrang geben. Zeitvariable Mautsysteme – heute mit digitalen Technologien effizient umsetzbar – können zudem helfen, das Verkehrsaufkommen an Knotenpunkten und zu Stoßzeiten zu reduzieren. Steuerliche Anreize wie die Entfernungspauschale, die eine hohe Verkehrsleistung fördern, sollten ebenso kritisch geprüft werden wie ein Tempolimit auf Autobahnen und die Subventionierung von Flughäfen. Daneben sollte der weitere Ausbau des **schienengebundenen Verkehrs** für Personen und Güter Teil einer langfristigen, möglichst europäischen Strategie sein.

8. Anstrengungen im Gebäudesektor deutlich erhöhen

Die Wärmeversorgung im Gebäudesektor ist für rund ein Viertel der energiebedingten CO₂-Emissionen in Deutschland und ein Drittel des Energieverbrauchs verantwortlich. Die besondere Herausforderung bei der Absenkung der Emissionen ergibt sich aus der langen Lebensdauer der Heizungstechnologien (etwa 25 Jahre), der Gebäude (70 bis 100 Jahre) und den üblicherweise langen Abständen zwischen routinemäßigen Umbauten (20 bis 40 Jahre). Sollen die Klimaziele erreicht werden, müssen die Emissionen im Gebäudesektor ganz erheblich sinken.

Dafür gilt es, bis zum Jahr 2050 alle auf **fossilen Brennstoffen basierenden Heizungen zu ersetzen**. Damit weniger Energie benötigt wird, muss fast der gesamte Gebäudebestand hohen Dämmstandards genügen. Das kann nur gelingen, wenn die **Sanierungsrate** von heute rund einem Prozent auf mindestens 1,5 bis 2 Prozent gesteigert wird.

Schlüsseltechnologien für die Gebäudeheizung sind elektrische Wärmepumpen, Wärmenetze und Wärmespeicher. Gespeist werden können Wärmenetze durch hocheffiziente, flexible Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (KWK), Wärmepumpen und Stromdirektheizungen in Verbindung mit zentralen Wärmespeichern, die gleichzeitig die Flexibilität des Gesamtsystems erhöhen. In Gebieten mit hohen Potenzialen sollten zudem **Geo- und Solarthermie** ausgebaut werden. **Abwärme aus der Industrie** über Wärmenetze stärker zu nutzen, trägt zusätzlich dazu bei, Energieeffizienzpotenziale zu heben.

Die Umstellung des Gebäudesektors ist dringend notwendig, aber im Hinblick auf die Verteilung der Kosten besonders schwierig. Denn aufwändige Gebäudetechnik würde Wohnen insgesamt teurer machen, was vor allem einkommensschwache Haushalte belasten würde. Zudem haben Vermieter nur einen geringen Anreiz, Heizungssysteme umzustellen, wenn sie selbst nicht von geringeren Heizkosten profitieren („Mieter-Vermieter-Dilemma“).

Doch dürfen diese Herausforderungen nicht dazu führen, dass die Anstrengungen im Gebäudesektor ausbleiben. Denn ein rasches Handeln ist essenziell für den Erfolg der Energiewende. Die Politik muss schnell Lösungen finden, um die Kosten so zu verteilen, dass sie für alle tragbar sind. Eine Möglichkeit ist eine Pro-Kopf-Rückzahlung eines Teils der Einnahmen aus dem CO₂-Preis. Hiervon würden vor allem einkommensschwache Haushalte profitieren, da sie im Schnitt weniger verbrauchen als einkommensstärkere Haushalte. Zudem kann es sinnvoll sein, die **Gebäudesanierung steuerlich zu fördern, Effizienzvorgaben für Heizungen** festzulegen, die sich stärker an den CO₂-Emissionen orientieren, und die **Beratungsangebote** für Hauseigentümer und Mieter auszuweiten.

Die **Qualität der Ausführung von Sanierungsmaßnahmen** und der Installation komplexer energietechnischer Anlagen hat einen entscheidenden Einfluss auf die erzielte Energieeinsparung und die Nutzerzufriedenheit. Maßnahmen zur Qualitätssicherung, die eine hohe Qualität in der Breite sicherstellen, spielen deshalb eine wichtige Rolle. Dazu gehören auch Aus- und Weiterbildungsinitiativen für Planer und Installateure.

9. Bioenergie systemdienlich nutzen

Als vielfältigster Energieträger unter den Erneuerbaren wird Bioenergie in Zukunft eine wichtige Rolle im Energiesystem einnehmen. Da sie gut speicherbar ist, kann Bioenergie die schwankende Windkraft- und Solarenergie ergänzen und die Energieversorgung stabilisieren. Biomasse ist jedoch eine wertvolle Ressource mit begrenzten Potenzialen, die möglichst effizient eingesetzt werden sollte. Um schädliche Umweltauswirkungen zu vermeiden, sollten vorrangig **Rest- und Abfallstoffe** genutzt werden. Agrarpflanzen und Waldholz für Energiezwecke zu verwenden, birgt hingegen große ökologische Risiken und sollte vermieden werden.

Bisher für den Anbau von Energiepflanzen verwendete Flächen könnten für Photovoltaik-Freiflächenanlagen genutzt werden. Dies hätte positive Auswirkungen auf die Biodiversität und die extensive Landwirtschaft. Die heute für Energiepflanzen verwendete landwirtschaftliche Fläche würde reichen, um den gesamten Strombedarf durch Photovoltaik auf diesen Flächen zu gewinnen.

Um das knappe Potenzial an Biomasse nicht zu verschwenden, ist es ratsam, Bioenergie in der Stromerzeugung vorrangig als **Flexibilitätstechnologie** einzusetzen. Zum Heizen sollte sie möglichst nur in effizienten Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen genutzt werden. Diese könnten schon kurzfristig eine klimafreundliche Strom- und Wärmeversorgung unterstützen. Ein wichtiges zukünftiges Einsatzgebiet kann die Erzeugung von **Mittel- und Hochtemperaturwärme** für die **Industrie** sein, da Biomasse und Biogas als hochwertiger Brennstoff bei hohen Temperaturen verbrannt werden können. Elektrische Lösungen wie Wärmepumpen und Elektrodenheizkessel stoßen hier an ihre Grenzen. Biomasse eignet sich auch zur **Erzeugung von Kraftstoffen**. Diese können insbesondere für den Flug-, Schiffs- und Schwerlastverkehr sinnvoll sein, wo elektrische Antriebe nicht funktionieren, und stellen eine Alternative zu synthetischen Kraftstoffen aus Power-to-X dar.

Um den Übergang der heutigen Bioenergienutzung auf zukünftige Anwendungsfelder zu gestalten, sollte die Bundesregierung eine umfassende **Biomassestrategie** entwickeln. Diese muss sicherstellen, dass Bioenergie einen möglichst großen Beitrag zum Klimaschutz und zu einer sicheren und bezahlbaren Energieversorgung leistet. Darüber hinaus werden klare, umwelt- und sozialgerechte Kriterien für den Anbau von Biomasse – insbesondere bei importierten Produkten – benötigt, sodass die Voraussetzungen dafür bestehen, dass ihre Nutzung zugleich gesellschaftlich akzeptiert wird.

10. CCS-Technologie und CO₂-Kreislaufwirtschaft (CCU) neu diskutieren

Technologien für die Abscheidung und Speicherung von Kohlendioxid (Carbon Capture and Storage CCS) sind in Deutschland umstritten. Allerdings wurde ihr Einsatz bisher vor allem für Kohlekraftwerke bewertet. Dies steht in Deutschland nicht mehr zur Debatte. Doch die CCS-Technologie sollte aus einem anderen Grund neu diskutiert werden: Ein Teil der **Emissionen aus Landwirtschaft und Industrie** lässt sich kaum vermeiden. Das gilt etwa für die heutigen Verfahren zur Stahl- und Zementherstellung, bei denen immer CO₂ freigesetzt wird. Zudem kommen – wie im Sonderbericht „1,5°C globale Erwärmung“ des Weltklimarates IPCC dargestellt – globale Klimaschutzszenarien überwiegend zu dem Ergebnis, dass der Atmosphäre in einigen Jahrzehnten CO₂ entzogen werden muss.

Wenn es nicht zeitnah gelingt, andere Lösungen zur Marktreife zu bringen, könnte **CCS als Brückentechnologie** notwendig sein, um CO₂ aus unvermeidbaren Prozessemissionen einzufangen und zu speichern und Kohlendioxid mittels Biomasse langfristig der Atmosphäre zu entziehen (Bioenergie mit CCS, kurz BECCS). Trotz massiver Anstrengungen im Klimaschutz könnte es ohne den Einsatz von CCS sehr schwierig werden, die langfristigen Ziele des Pariser Klimaschutzabkommens zu erreichen. In diesem Falle gilt es abzuwägen, welcher Kompromiss sinnvoll ist: Der Einsatz von CCS oder das Risiko, die Klimaziele zu verfehlen.

Entscheidend ist, in der Diskussion den immensen **klimapolitischen Handlungsdruck** im Blick zu behalten und zu kommunizieren. So stellen CO₂-Entnahmetechnologien wie CCS keinesfalls eine Alternative, sondern eine **Ergänzung** zu ambitionierten CO₂-Vermeidungsstrategien dar. Sie können als „ultima ratio“ angesehen werden, wenn Maßnahmen der CO₂-Minderung nicht rechtzeitig entwickelt werden können oder nicht schnell genug greifen. Wichtig ist es daher, die CCS-Technologie auch in Deutschland weiterzuentwickeln statt sie vorschnell als Teil des Lösungsinstrumentariums auszuschließen.

Kohlendioxid könnte jedoch in einer klimaneutralen Welt sogar als **Rohstoff** notwendig sein. Synthetische Kraftstoffe und viele Produkte der chemischen Industrie benötigen kohlenstoffhaltige Ausgangsstoffe. Wenn im Endverbrauch CO₂ in die Atmosphäre gelangt, muss sichergestellt werden, dass das eingangs verwendete Kohlendioxid klimaneutral gewonnen wurde, etwa aus der Biomassenutzung oder durch Entzug aus der Luft (**Carbon Capture and Utilization; CCU**).

Das Akademienprojekt „Energiesysteme der Zukunft“ (ESYS)

Mit der Initiative „Energiesysteme der Zukunft“ (ESYS) geben acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina und die Union der deutschen Akademien der Wissenschaften Impulse für die Debatte über Herausforderungen und Chancen der Energiewende in Deutschland. Im Akademienprojekt erarbeiten mehr als 100 Fachleute aus Wissenschaft und Forschung in interdisziplinären Arbeitsgruppen Handlungsoptionen zur Umsetzung einer sicheren, bezahlbaren und nachhaltigen Energieversorgung.

Der Impuls „Wege zu einem integrierten Energiesystem – was jetzt geschehen muss“ (erschien im Juli 2019) ist im Rahmen der ESYS-Mitgliederversammlung 2018 entstanden und wurde in einem mehrstufigen Redaktionsprozess von den Mitgliedern des Projekts erstellt.

Kontakt

Dr. Ulrich Glotzbach

Leiter der Geschäftsstelle „Energiesysteme der Zukunft“

Markgrafenstraße 22, 10117 Berlin

Tel.: +49 30 2067957-0

E-Mail: glotzbach@acatech.de

www.energiesysteme-zukunft.de

Mehr zum Thema:**Ausgewählte Veröffentlichungen des Akademienprojekts „Energiesysteme der Zukunft“**

Wie kann Bioenergie systemdienlich im Energiesystem genutzt werden und zum Klimaschutz beitragen? Antworten liefert die **Stellungnahme *Biomasse im Spannungsfeld zwischen Energie- und Klimapolitik. Strategien für eine nachhaltige Bioenergienutzung*** (erschieden im Februar 2019).

Trägt die Governance-Verordnung der EU dazu bei, die europaweiten Klimaziele zu erreichen? In der **Stellungnahme *Governance für eine Europäische Energieunion. Gestaltungsoptionen für die Steuerung der EU-Klima- und Energiepolitik bis 2030*** benennen die deutschen Wissenschaftsakademien flankierende Maßnahmen (erschieden im Dezember 2018).

Wie das gesamte Energiesystem – bestehend aus Stromerzeugung, Wärmeversorgung und Verkehr – klimafreundlich gestaltet werden kann, wird in der **Stellungnahme *»Sektorkopplung« – Optionen für die nächste Phase der Energiewende*** diskutiert (erschieden im November 2017).

In der dazugehörigen **Analyse *»Sektorkopplung« – Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems*** werden die durchgeführten Modellrechnungen und der Vergleich verschiedener Energieszenarien ausführlich erklärt (erschieden im November 2017).

Wie das Energiesystem der Zukunft Störungen und Angriffe bewältigen und aus Krisen lernen kann, beschreibt die **Stellungnahme *Das Energiesystem resilient gestalten. Maßnahmen für eine gesicherte Versorgung*** (erschieden im Mai 2017).

Die **Stellungnahme *Rohstoffe für die Energiewende. Wege zu einer sicheren und nachhaltigen Versorgung*** beleuchtet, wie Deutschland unabhängiger von Importen werden und die Versorgung mit Metallen langfristig sichern kann (erschieden im Februar 2017).

Wie könnte die Stromversorgung im Jahr 2050 aussehen? Die **Stellungnahme *Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050: Stabilität im Zeitalter der erneuerbaren Energien*** zeigt verschiedene Möglichkeiten auf (erschieden im Dezember 2015).

ESYS-Publikationen im Überblick

Alle Publikationen des Akademienprojekts „Energiesysteme der Zukunft“ können online heruntergeladen oder kostenfrei bestellt werden: <https://energiesysteme-zukunft.de/publikationen/>