

# SIEMENS

*Ingenuity for life*



## Positionspapier

### Siemens Position zur Dekarbonisierung und Energiewende in Deutschland

## Die wichtigsten Ergebnisse

- Die Reduzierung der Treibhausgasemissionen (THG) um mindestens 80 % bis 2050 (gegenüber 1990) ist mit den vorhandenen Technologien technisch realisierbar, wobei die Kosten dafür mit den heutigen durchschnittlichen jährlichen Gesamtsystemkosten vergleichbar sind.
- Es müssen entsprechende politische Maßnahmen eingeleitet werden, um die Veränderungen zu bewirken.
- Die erforderlichen technologischen Umstellungen konzentrieren sich auf die folgenden vier wichtigsten Hebel:
  1. Integration fluktuierender erneuerbarer Energien, die mit über 80 % an der Gesamtstromerzeugung bis 2050 beteiligt sein werden. Dazu sind ein Netzausbau, eine Verstärkung und Modernisierung, ein Netzservice und entsprechende Speicherlösungen erforderlich.
  2. Transformation der konventionellen Stromerzeugung durch flexible kohlenstoffarme Kraftwerke, die für die Sicherheit der Energieversorgung und Systemstabilität sorgen.
  3. Ein Sektorkopplungsansatz für den Wärme-, Transport- und Industriesektor durch eine Kombination von Elektrifizierung und Nutzung strombasierter synthetischer Kraftstoffe.
  4. Intensivierung der Energieeffizienz als Grundlage für die Senkung des allgemeinen Primär- und Endenergiebedarfs entlang der gesamten Wertschöpfungskette.

# Deutschlands Energiewende

Deutschland ist weltweit als Vorreiter im Bereich der Technologien für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen und für sein Vorhaben bekannt, seine Wirtschaft zu dekarbonisieren. Bis 2050 will das Land ehrgeizige Ziele erreichen: Eine Emissionssenkung von 80-95 % CO<sub>2</sub>-Äquivalente gegenüber dem Stand von 1990, einen Anteil der erneuerbaren Energiequellen am Bruttostromverbrauch von mindestens 80 % und einen Rückgang von 50 % des Primärenergieverbrauchs gegenüber dem Volumen von 2008. Um diese Zielvorgaben bis 2050 zu erreichen, muss das Land einen klaren und gangbaren Weg zur Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen beschreiten, da sein aggregiertes CO<sub>2</sub>-Budget von 14 Gt (2015-2050) nicht überschritten werden kann, um das 2-Grad-Ziel des Pariser Klimaschutzabkommens einzuhalten.

Um Deutschlands jährliche Gesamtemissionen von 887 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (2015) drastisch zu senken, muss das Hauptaugenmerk auf der Energie liegen, denn 85 % dieser Emissionen fallen in Verbindung mit Energie an, während lediglich 15 % aus Nicht-Energiequellen wie der Landwirtschaft und industriellen Prozessen stammen. 42 % der energiebedingten Emissionen werden durch die Stromproduktion erzeugt; die übrigen Emissionen entstehen vorwiegend durch den Verkehr (28 %); die zentrale Wärmeerzeugung für industrielle Prozesse (13 %) und die dezentrale Wärmeerzeugung für Gebäude (17 %). Das zeigt, dass der Hauptfokus zwar auf dem Elektrizitätssektor liegen muss, die Dekarbonisierungsbemühungen jedoch letzten Endes alle Sektoren betrifft, einschließlich der Sektoren Transport, Wärme und Industrie. In all diesen Sektoren muss ein ausgewogenes Maßnahmenpaket umgesetzt werden. Dazu gehört die Elektrifizierung der Wärmeerzeugung und des Verkehrs sowie der Einsatz von mit Strom erzeugten synthetischen Kraftstoffen aus Power-to-X Anwendungen, um die Dekarbonisierung der Wirtschaft voranzubringen.

Der Hauptfokus der Energiewende in Deutschland liegt auf dem Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen mit gleichzeitigem Ausstieg aus der Kernenergie. Unterstützende Regelungen haben den Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch im Jahr 2015 auf 30 % anwachsen lassen, 10 % mehr als im Jahr 2005. Das mag wie ein Erfolg erscheinen, doch der Kohlendioxidausstoß bei der Stromerzeugung ist nur um -1 % im Jahr zurückgegangen, denn es wurde verstärkt Kohle eingesetzt, und dieser Prozentsatz ist nach 2015 sogar noch gestiegen. Deshalb ist für das Erreichen der Kohlenstoffreduktionsziele die Umstellung der konventionellen Stromerzeugung auf Technologien mit niedrigem Kohlendioxidausstoß unerlässlich und muss ein Grundpfeiler der nächsten Phase der Energiewende sein. Der zweite Grundpfeiler der Energiewende in Deutschland ist die Energieeffizienz, z. B. von Gebäuden, industriellen Anwendungen sowie E-Mobilität im Verkehrssektor.

# Der Ansatz von Siemens

Um für unsere Kunden und die Gesellschaft ein führender Partner bei der Dekarbonisierung zu sein, ist es zwingend notwendig zu wissen, ob ein zukünftiges kohlenstoffarmes Energiesystem technisch und wirtschaftlich realisierbar ist. Dazu muss man wissen, welche technologischen Veränderungen in den nächsten 30 und mehr Jahren notwendig sein werden, welche Kosten damit verbunden sind und wann der richtige Zeitpunkt für diese Schritte gekommen ist. Am Beispiel Deutschland, das wir aufgrund seines ambitionierten Dekarbonisierungsplans ausgewählt haben, zeigen wir auf, wie eine Transformation mit einer Mindestreduktion von 80 % bei den Treibhausgasemissionen (THG) aussehen könnte. Zu diesem Zweck wurden umfassende multimodale Simulationstools angewandt (siehe Anhang) und die Ergebnisse mit externen Forschungsstudien verglichen. Die Ergebnisse hängen natürlich von den Eingangsparametern und bestimmten Annahmen ab – die Sensitivitätsanalyse hat jedoch gezeigt, dass die Ergebnisse insgesamt belastbar sind. Und obwohl sie in erster Linie für Deutschland gelten, wird es in zahlreichen Ländern ähnlich aussehen, was die wichtigsten Maßnahmen für eine Dekarbonisierung und die gangbaren Wege für eine Umstellung anbelangt.

## Erforderliche technologische Veränderungen

Die Reduzierung der THG-Emissionen um mindestens 80 % bis 2050 gegenüber 1990 ist mit den vorhandenen Technologien technisch und wirtschaftlich realisierbar, wobei die folgenden vier zentralen Hebel im Vordergrund stehen müssen:

1. Integration fluktuierender erneuerbarer Energien, die bis 2050 mit über 80 % an der Gesamtstromerzeugung beteiligt sein werden. Dazu sind ein Netzausbau, eine Verstärkung und Modernisierung, ein Netzservice und entsprechende Speicherlösungen erforderlich.
2. Transformation der konventionellen Stromerzeugung durch flexible kohlenstoffarme Kraftwerke, die für die Sicherheit der Energieversorgung und Systemstabilität sorgen.
3. Ein Sektorkopplungsansatz für den Wärme-, Transport- und Industriesektor durch eine Kombination von Elektrifizierung und Nutzung strombasierter synthetischer Kraftstoffe.
4. Intensivierung der Energieeffizienz als Grundlage für die Senkung des allgemeinen Primär- und Endenergiebedarfs entlang der gesamten Wertschöpfungskette.

Digitale Technologien und neue Geschäftsmodelle werden alle vier dieser Hebel möglich machen: Vom Design und der Produktsimulation, von Prozessen und kompletten Infrastrukturen bis hin zum Betrieb und den Wartungsphasen wird die Digitalisierung ganze

Wertschöpfungsketten verbessern, die oben genannten Hebel verstärken und dadurch die CO<sub>2</sub>-Emissionen positiv beeinflussen. Digitale Lösungen werden beispielsweise die Integration von erneuerbaren Energien fördern, eine schnellere Transformation des Energiesystems zu einem dezentralen System ermöglichen und gleichzeitig das Netz optimieren, um eine jederzeit stabile Energieversorgung sicherzustellen.

Darüber hinaus werden diese Hebel zu einer Steigerung der allgemeinen Stromerzeugungskapazitäten bis 2050 führen. Sie werden sich gegenüber dem heutigen Stand nahezu verdoppeln, vor allem durch die Elektrifizierung anderer Sektoren. Trotz der Kapazitätssteigerung fällt der Primärenergieverbrauch um nahezu 40 % durch den Einsatz effizienterer Technologien (z. B. Elektromotoren im Transportwesen, Wärmepumpen), die vorwiegend erneuerbare Stromquellen verwenden. Dies sollte einen Rückgang fossiler Primärenergieträger von nahezu 80 % bewirken.

Um die Lücke zwischen der zunehmenden nachhaltigen Energieerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen und dem Verbrauch in Wirtschaftszentren zu schließen, ist ein Ausbau des Übertragungsnetzes unverzichtbar. Ein Ausbau und eine Modernisierung auf Verteilungsebene sind überaus wichtig, um die Infrastruktur für das zukünftige Energiesystem bereitzustellen, das in der Lage ist, eine zunehmende Elektrifizierung durch die Integration von Sektoren zu bewältigen. Das intelligente Übertragungs- und Verteilnetz muss daher mit wachsendem Flexibilitätsbedarf durch Elektrizitäts-Verbindungsleitungen zu einem europäischen Netz verbessert werden.

## Hebel 1: Integration fluktuierender erneuerbarer Energien

Um den Kohlendioxid ausstoß zu senken, müssen wir mehr Strom aus kohlenstoffneutralen Quellen produzieren. Von dem Anteil erneuerbarer Energien an der Stromproduktion von 32 % entfallen 19 Prozentpunkte auf die schwankenden Energiequellen Wind und Sonne. Der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromproduktion wird jedoch auf über 80 % ansteigen. Davon wird die Onshore-Windenergie gefolgt von der Photovoltaik den Großteil stellen. Daher wird die Integration der veränderlichen Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien für das System eine Herausforderung im Hinblick auf das Netzdesign und die Systemstabilität. Diese erfordern einen dynamischeren Netzbetrieb, entsprechende Speicherkapazitäten für Spannungs- und Frequenzsteuerung sowie eine fortschrittliche Nachfragesteuerung, die Redispatch vermeidet.

Elektrische Speicherlösungen können eine kurzfristige Stromknappheit ausgleichen, um die Tageslastprofile zu stabilisieren und die Netzstabilität zu verbessern. Nach aktuellen Kostenschätzungen sind sie jedoch als langfristige Speicherlösungen nicht geeignet. Zu diesem Zweck können Gaskraftwerke mit Gas- und Dampfturbinen (Kombikraftwerk) und einstufigen Gasturbinen den notwendigen Reservestrom zur Verfügung stellen und für

Flexibilität und Zuverlässigkeit des Energiesystems sorgen. In Zeiten mit vorübergehendem Überangebot aus erneuerbaren Energiequellen wird die Wärmespeicherung (niedrige und hohe Temperatur) ebenfalls zu einer wichtigen energieerhaltenden Technologie. Sie ist nach derzeitigen Kostenschätzungen im Vergleich zum elektrischen Speichersystem eine wettbewerbsfähige Technologie. Zudem sind Power-to-X-Technologien wie die Umwandlung von Energie in Wasserstoff ein weiterer zentraler Faktor, wenn es darum geht, ein Gleichgewicht zwischen Verbrauch und Stromproduktion aus erneuerbaren Energiequellen herzustellen. Die Umwandlung von überschüssigem Strom aus erneuerbaren Energien in gasförmige oder flüssige Kraftstoffe bietet eine Möglichkeit für eine langfristige saisonale Speicherung großer Energiemengen. Zudem können sie in anderen Sektoren, vor allem in industriellen Prozessen und im Transportwesen, verwendet werden. Somit werden synthetische Kraftstoffe aus erneuerbaren Energiequellen zweifelsohne an Bedeutung gewinnen.

Um die Lücke zwischen der zunehmenden nachhaltigen Energieerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen und dem Verbrauch in Wirtschaftszentren zu schließen, ist ein Ausbau des Übertragungsnetzes ebenfalls unverzichtbar. Eine optimierte Kombination von Gleichstrom- und Wechselstromübertragung sowie unterirdische gasisolierte Übertragungsleitungen (GIL) werden die Stützpfeiler eines zuverlässigen Übertragungsnetzes sein. Die Nachfrage nach synthetischen Kraftstoffen wird aufgrund eines wachsenden Strombedarfs im Zuge der Sektorintegration noch steigen.

Darüber hinaus sind eine umfangreiche Erweiterung des Stromnetzes sowie eine Verstärkung und Modernisierung auf Verteilungsebene wichtig, um eine Infrastruktur für das zukünftige Energiesystem bereitzustellen, das nicht nur für einen Ausgleich zwischen lokaler Stromerzeugung, dezentralen Energiesystemen und Speichern sorgt, sondern auch E-Mobilität und eine flexible Nachfragesteuerung ermöglicht. Im Rahmen einer solchen Netzerweiterung und Modernisierung werden Hardware, Automatisierung und digitale Technologien integriert. Netzservices und der Schutz des Netzes vor Cyber-Angriffen werden für eine maximale Versorgungssicherheit und Netzbelastbarkeit sorgen. Des Weiteren werden Zusatzleistungen, die die notwendige Flexibilität verwalten, in einem intelligenten Markt immer wichtiger. Schließlich muss das intelligente Übertragungs- und Verteilungsnetz mit seinen zunehmenden Flexibilitätsanforderungen durch Elektrizitäts-Verbindungsleitungen verbessert und in das europäische Netz eingebunden werden.

## Hebel 2: Transformation konventioneller Stromerzeugung

Die Dekarbonisierung der konventionellen Erzeugung von Energie und Schaffung eines flexiblen, zuverlässigen Systems, das sich vor allem durch einen niedrigen Kohlendioxid ausstoß auszeichnet, ist für eine Kohlenstoffneutralität des Energiesektors unerlässlich. Der Grund dafür ist, dass die konventionelle Energieerzeugung

für die nächsten Jahrzehnte unverzichtbar bleiben wird, um das Energiesystem zu speisen.

Gasbetriebene Kraftwerke, mit Kombi- als auch mit einfachen Turbinen, sowie Gasmotoren werden bei der Dekarbonisierung eine große Rolle spielen. In den ersten Jahren der Umstellung werden sie als Grund- und Mittellastsysteme dienen. Später, wenn der Anteil der erneuerbaren Energien am System steigt, werden sie zunehmend als Reservesystem genutzt. Die Wahl der Technologie wird von Lastfaktoren abhängig sein, von der Anwendung – z. B. für Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) oder Spitzenkraftwerke, die nur bei Stromspitzenbedarf produzieren – von den Flexibilitätsanforderungen und vom Versorgungszweck (z. B. öffentlich oder Selbstversorgung). Gasmotoren eignen sich zum Beispiel aufgrund ihrer Flexibilität sehr gut für selbstversorgende Systeme und sie sind ein wichtiger Hebel für dezentrale Energiesysteme (DES).

Für eine Reservestromversorgung, die naturgemäß mit niedrigen Volllaststunden bewerkstelligt wird, werden Technologien mit relativ geringen Investitionskosten an Bedeutung gewinnen: Zum Beispiel einfache Gasturbinenanlagen in Kombination mit energieeffizienten Technologien wie flexiblen, effizienten Gas- und Dampfturbinenkraftwerken.

Eine frühe Umstellung von Kohle auf Gas, die in diesem Jahrzehnt beginnt, führt zu geringeren CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten und kann dazu beitragen, den Kohlendioxidausstoß bis 2035 um 50 % zu senken, einfach aufgrund der höheren Effizienz von GuD-Kraftwerken und der geringeren Kohlenstoffintensität von Erdgas im Vergleich zur Kohle. Damit wird sich die Stromerzeugung aus Gas von 2015 bis 2050 verdoppeln, während die Kohlenutzung ausläuft. Durch den allmählichen Ersatz von Gas in der Wärmeerzeugung, wird sich der Erdgasverbrauch insgesamt bis 2050 ungefähr halbieren.

Zusätzlich bietet die schrittweise Dekarbonisierung von konventionellem Strom einen zeitlichen Spielraum, um verschiedene andere Technologien zu fördern. So können beispielsweise die Kosten für E-Mobilität gesenkt oder bahnbrechende neue, noch zu entwickelnde Technologien implementiert werden. Eine Verzögerung bei der Stilllegung von Kohlekraftwerken wird die Gesamtsystemkosten erhöhen und ein Umschwenken auf andere Sektoren erfordern. Zum Beispiel müsste eine schnellere Elektrifizierung des Transportsektors erfolgen, will Deutschland seine ehrgeizigen Reduktionsziele erreichen.

Strebt man eine kohlenstofffreie zuverlässige Energieversorgung an, wird zudem ein Umstieg von Erdgas auf SynFuels (synthetische Brennstoffe) notwendig sein.

### Hebel 3: Sektorkopplung für den Wärme-, Transport- und Industriesektor – Elektrifizierung und strombasierte synthetische Kraftstoffe

Sektorintegration ist ein wichtiger Baustein, um allgemeine Emissionssenkungen zu erreichen, da sie eine höhere Effizienz ermöglicht, die Systemstabilität unterstützt und erneuerbare Energieerzeugung und sektorübergreifenden Bedarf ins Gleichgewicht bringt. Ein umsichtiges Vorgehen bei der Elektrifizierung sowie die Nutzung synthetischer Kraftstoffe für den Wärme- und Verkehrssektor sind nicht nur wirtschaftlich sinnvoll, sondern gewährleistet auch die Sicherheit, Energieversorgung und Flexibilität des Energiesystems.

#### Integration des Wärmesektors

Heutzutage wird Wärme größtenteils durch fossile Brennstoffe erzeugt. Erneuerbare Energien sind lediglich zu 13 % daran beteiligt. Die Elektrifizierung dezentraler und zentraler Wärme spielt eine maßgebliche Rolle für die Dekarbonisierung der Industrie und des Gebäudesektors, denn sie ersetzt sukzessive die fossilen Brennstoffe.

Während dezentrale Wärme vorwiegend elektrisch durch Wärmepumpen in Kombination mit solarthermischen Anlagen erzeugt wird, ist für die Elektrifizierung von zentraler Wärme (industrielle und Fernwärme) ein Umstieg auf einen Mix aus Biomasse, Widerstandsheizelementen und Wärmepumpen zu beobachten. Aus wirtschaftlicher Sicht sollte die Elektrifizierung zentraler Heizungsanlagen schrittweise erfolgen: In den ersten Jahrzehnten Elektrifizierung der Wärme bei Temperaturen von unter 150 °C durch konventionelle und neue Hochtemperatur-Wärmepumpen in Verbindung mit Widerstandsheizung und thermischen Energiespeichern. Eine Erhitzung auf höhere Gradzahlen (>150 °C) wird immer noch größtenteils durch die Verbrennung von Gas und Kohle erfolgen. Für diesen höheren Temperaturbereich werden Biomasse und Elektrifizierung aufgrund der höheren Kosten wahrscheinlich erst in den letzten Dekaden vor 2050 eingesetzt werden. Diese Technologien können dann jedoch Gas und Kohle ersetzen, um die höchsten CO<sub>2</sub>-Zielvorgaben zu erreichen. In diesem höheren Temperaturbereich befindet sich die Elektrifizierung auch in Konkurrenz zu strombasierten synthetischen Kraftstoffen (SynFuels), die unserer Einschätzung nach zu einem erheblichen Anteil daran beteiligt sein werden.

Die Gebäudeisolierung, die den allgemeinen Wärmebedarf um nahezu 20 % senken kann, wenn man nur Neubauten berücksichtigt, geht am besten mit der Gebäudeautomatisierung einher. Neben den zusätzlichen Einspareffekten geht es bei der Gebäudeautomatisierung auch um Komfortaspekte wie die Sicherstellung einer guten Luftqualität. Darüber hinaus trägt sie dazu bei, über einen langen Zeitraum ein hohes Effizienzniveau zu gewährleisten. Zudem ist sie eine Voraussetzung für die Integration der Gebäudeinfrastruktur in das Elektrizitätssystem, sie sorgt für flachere Lastprofile und

unterstützt die Systemstabilität. Zusammen ermöglichen beide Maßnahmen, die Kosten, Energieeinsparungen und den ökologischen Lebenszyklus in das richtige Verhältnis zueinander zu bringen.

Wärmespeicherung im niedrigen und mittleren Temperaturbereich wird als Haupthebel für die Ausgewogenheit zwischen Angebot und Nachfrage angesehen. Wärmespeicherung kann die Energieeinsparungen und das Energieeffizienzpotenzial anderer Technologien maximieren, den Einsatz erneuerbarer Energien und Abwärme erleichtern und die Flexibilität verbessern. Dennoch werden unter dem Gesichtspunkt der Autarkie elektrische Speichersysteme in dezentralen Einheiten voraussichtlich eine wichtige Rolle spielen und schließlich zu einer unentbehrlichen Komponente einer jeden dezentralen Energiesystemanwendung (DES) werden.

### Integration des Transportsektors

Im Gegensatz zum Wärmesektor hat die Elektrifizierung in einigen Bereichen des Transportsektors bereits stattgefunden. Heute werden der städtische Schienen- und öffentliche Nahverkehr (U-Bahn, Straßenbahnen, S-Bahnen) nahezu vollständig mit Elektrizität betrieben. Im Zuge der steigenden Nachfrage nach öffentlichen Verkehrsmitteln wird dieser Sektor sicherlich noch weiter wachsen. Eine weitere modale Verlagerung von Individualverkehr auf öffentliche Verkehrsmittel, von der Straße auf die Schiene wäre ein zusätzlicher Hebel für die Dekarbonisierung. Diese Möglichkeit wurde jedoch nicht bei den Simulationen berücksichtigt, auf denen unsere Ergebnisse basieren, da der Anteil des öffentlichen Nahverkehrs bzw. des Schienenverkehrs in der Vergangenheit trotz des erklärten politischen Ziels, diesen auszubauen, kleiner geworden ist.

Im Vergleich zum Schienenverkehr baut der Straßenverkehr in großem Maß auf den Einsatz von Verbrennungsmotoren und er nimmt weiter zu, und zwar nicht nur in Deutschland, sondern auch weltweit. Allein 2017 wurden in Deutschland über 45 Millionen PKWs zugelassen, nahezu 2 % mehr als im Vorjahr. Daher spielt wie im Wärmesektor die Elektrifizierung in Verbindung mit synthetischen durch Strom erzeugten Kraftstoffen eine entscheidende Rolle bei der Dekarbonisierung des Straßenverkehrs. Aufgrund der derzeitigen Kosten und Reichweite rechnen wir damit, dass erst nach 2030 Elektrofahrzeuge einen nennenswerten Anteil am Straßenverkehr haben werden. Außerdem muss zunächst die Infrastruktur in Form von Ladestationen landesweit installiert werden, damit der Straßenverkehr seinen Teil zur Dekarbonisierung der Wirtschaft beitragen kann. Parallel dazu werden grüne SynFuel-Anwendungen wie der Einsatz von Wasserstoff in Raffinerien und methanolbetriebene Fahrzeuge den konventionellen Brennstoffmix verbessern und dadurch die Gesamtemissionen verringern.

Während die Elektrifizierung des Passagierverkehrs sich hauptsächlich durch Elektroautos vollzieht, stellen für den Güterferntransport eHighway-Trolleysysteme eine flexible Technologie mit großem Potenzial dar. Für das Fahren in Straßenabschnitten ohne Oberleitungen werden die LKWs

mit Hybridlösungen ausgestattet wie Batterien oder Power-to-Gas-/Power-to-Liquid-Lösungen. Für kurze Strecken (z. B. für den Lieferverkehr in Stadtgebieten) werden batteriebetriebene Fahrzeuge zu einer attraktiven technologischen Alternative.

Die Elektrifizierung des Straßentransportsektors (sowohl des Personen- als auch des Güterverkehrs) sowie der Einsatz von mit Strom erzeugten synthetischen Kraftstoffen wird zu einem Rückgang des Bedarfs an flüssigem Kraftstoff (Rohöl) um nahezu 70 % führen, was wiederum Deutschlands Abhängigkeit von Ölimporten verringern wird.

Neben dem Straßenverkehr ist die Dekarbonisierung des Luft- und Seeverkehrs von größter Bedeutung. Hier erfolgt die Elektrifizierung durch eine Kombination von Hybridsystemen und dem Einsatz von synthetischen Kraftstoffen wie Wasserstoff. Der Kraftstoffverbrauch der Flugzeuge macht heute mehr als die Hälfte der Gesamtbetriebskosten aus. Hybrid- oder voll elektrische Antriebe werden den Kraftstoffverbrauch senken und die aerodynamische Effizienz durch einen verteilten Antrieb erhöhen. Sie werden auch erheblich weniger Lärm verursachen, was besonders für den Nachtflugverkehr an Flughäfen relevant ist. Hybrid-Antriebssysteme für Flugzeuge mit weniger als 100 Sitzplätzen sollen bis 2030 auf den Markt kommen. Für größere Flugzeuge werden strombasierte synthetische Kraftstoffe eingesetzt.

In der Schifffahrt haben wir einen steigenden Bedarf an Strom aus dem Hafennetz, um CO<sub>2</sub>- und Partikelemissionen wie PM<sub>10</sub> zu senken. So ist die Verbrennung von Schiffstreibstoffen während der Liegezeit im Hafen zur Energieerzeugung eine der Hauptursachen für die lokale Luftverschmutzung. Innerhalb von acht Stunden produziert ein im Hafen liegendes Kreuzfahrtschiff ungefähr so viele Emissionen und Feinstaub wie 6.000 Fahrzeuge auf einer Fahrstrecke von 1.000 km. Mit dem Landstromversorgungssystem SIHARBOR können Schiffe im Hafen die von ihnen benötigte elektrische Energie von Land beziehen und ihre Generatoren abschalten. Sie erfüllen damit die immer strengeren Umweltvorschriften für Häfen weltweit. Der Seeverkehr ist für rund 2 % der weltweiten Emissionen verantwortlich und wird bis 2050 wahrscheinlich um 50-250 % zunehmen. Hybride Antriebssysteme für Fähren nutzen überschüssige Energie, die in Batterien gespeichert wird, um ohne Dieselerbrennung auszukommen. Mit dem Hybridsystem können bis zu 15 % des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes verringert werden. Eine Untersuchung zeigt, dass es profitabel wäre, allein in Norwegen sieben von zehn Fähren mit batteriebetriebenen oder hybriden Alternativen zu ersetzen.

Im Vergleich zu anderen Sektoren wird es wahrscheinlich im Personenverkehr disruptive Innovationen und richtungweisende Technologien geben. Hier sollte sich die Zahl der Verkehrsmittel durch Verhaltensänderungen wie die Zunahme von Sharing-Optionen oder autonome Verkehrsmittel auf der Straße oder in der Luft verringern. Die Anzahl der zurückgelegten Kilometer und der Strombedarf dürften sich jedoch weiter erhöhen.

### Integration der Industrie

Die Dekarbonisierung des Industriesektors ist nicht nur aufgrund energiebedingter Emissionen erforderlich, z. B. im Zusammenhang mit Wärmeprozessen (siehe oben), sondern auch in Verbindung mit der Verarbeitung von Ausgangsstoffen, die bislang vorwiegend auf fossilen Brennstoffen und Rohstoffen basiert. Bei industriellen Prozessen könnte beispielsweise der grüne Wasserstoff Spitzenreiter für die Implementierung von SynFuels in Energiesystemen werden. Zudem kann umweltfreundlicher Wasserstoff für das Hydrotreating von Rohöl oder als Reduktionsmittel verwendet werden.

Schließlich könnten Lösungen wie Carbon Capture and Storage (CCS) für nicht energiebedingte Emissionen wie die Zersetzung von Kalk in der Zementindustrie ebenfalls eine realisierbare Option sein, um das CO<sub>2</sub>-Minderungsziel von >90 % zu erreichen.

### Hebel 4: Energieeffizienz

Energieeffizienz ist ein weiteres sehr wichtiges Instrument, um die angestrebten Emissionsminderungen zu erreichen, denn sie führt zur Senkung des generellen Primärenergiebedarfs. Sie basiert auf Effizienzmaßnahmen sowohl auf der Nachfrageseite als auch auf der Seite der Energieerzeugung.

Auf der Nachfrageseite geht es dabei um Technologien wie hocheffiziente elektrische Antriebe, Wärmepumpen, Gebäudeautomatisierung, Züge etc. Auf der Seite der Energieerzeugung geht es um die Effizienz der Kraftstoffnutzung, z. B. die kombinierte Kraft-Wärme-Erzeugung (KWK), wo immer diese möglich ist. Beim Übergang zu einem ganzheitlicheren und systematischeren Energiesystemkonzept kann die Effizienz durch die Kombination eines Energiemanagementsystems mit dezentralen Energielösungen noch weiter erhöht werden. Dies ermöglicht Flexibilität sowohl auf der Energieerzeugungs- als auch auf der Nachfrageseite, z. B. für eine intelligente Lastverlagerung.

Trotz der Tatsache, dass aus kostenoptimierter Sicht die direkte Elektrifizierung des Wärme- und Transportsektors zu einem Anstieg des Strombedarfs um nahezu 50 % führt, sinkt der Primärenergieverbrauch um fast 40 %. Das ist vor allem auf den Einsatz energieeffizienterer Technologien wie Elektromotoren im Transportwesen oder Wärmepumpen zurückzuführen. Für diese Technologien kommen vorzugsweise erneuerbare Elektrizitätsquellen zum Einsatz. Dies sollte bis 2050 zu einem Rückgang von nahezu 80 % des Verbrauchs von fossilen Primärenergien führe.

### Wirtschaftliche Auswirkungen

Trotz dieses Wandels im Bereich der Energiesysteme werden sich die durchschnittlichen jährlichen Gesamtsystemkosten für die Erreichung einer 80-prozentigen Treibhausgasreduzierung voraussichtlich in einem ähnlichen Bereich bewegen wie im Referenzjahr 2015 (unter Berücksichtigung jährlicher Investitionen mit einem Abschreibungszeitraum von zehn Jahren).

Zudem ist ein deutlicher Wandel zu beobachten: Waren bei dem bisherigen Energiesystem, das von umfangreichen fossilen Brennstoffimporten abhängig ist, die Betriebskosten (OPEX) vorrangig, werden bei den neuen Energiesystemen die Kapitalausgaben (CAPEX) in den Überlegungen sehr viel stärker im Vordergrund stehen. Damit kommt den Investitionsbedingungen für Kraftwerke eine größere Bedeutung zu, wie etwa den finanziellen Risiken, der Berechenbarkeit politischer Maßnahmen oder den marktgängigen Volllaststunden. Aus diesem Grund ist eine alternative Marktausgestaltung erforderlich, die etwa eine verbindliche Kapazität belohnt.

Im Vergleich zur Beibehaltung des vorhandenen Systems (Business-as-usual ohne weitere Begrenzung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes) sind die Systemkosten sicherlich höher. Allerdings würde man einen hohen Preis zahlen: Die Zielvorgabe, einschließlich des aggregierten CO<sub>2</sub>-Budgets von 14 Gt, und die notwendigen Maßnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels würden nicht erreicht.

## Politische Empfehlungen

Die oben genannten Veränderungen werden ohne die entsprechenden politischen Maßnahmen, von denen einige unten beschrieben werden, nicht erreicht. Eine Unterlassung oder ein Aufschub würde zu höheren Gesamtsystemkosten führen und andere Maßnahmen würden dann forciert, wie etwa der frühere Ausbau der Elektromobilität.

### 1. Ausbau erneuerbarer Energien

Die fluktuierenden erneuerbaren Energien verursachen geringe OPEX-Kosten und hohe CAPEX-Kosten. Die Investitionsbedingungen, vor allem die Kapitalkosten, spielen eine große Rolle für eine kostengünstige Nutzung erneuerbarer Energieträger und sollten im Mittelpunkt politischer Überlegungen stehen. Ideale Investitionsbedingungen erfordern vorhersehbare, vertrauenswürdige, lineare und technologiespezifische Ausbaupläne für erneuerbare Energien. Ausbaupläne sollten zu einem frühen Zeitpunkt bekannt gegeben werden, eine langfristige Perspektive beinhalten, und die damit angestrebten Ziele sollten mit den vereinbarten Klimazielen im Einklang stehen. Um marktbedingten Risiken Rechnung zu tragen, sollte die marktbasierende Umsetzung durch klare Regeln für eine Beschränkung unterstützt werden.

### 2. Umstellung der übrigen konventionellen Stromerzeugung auf kohlenstoffarme Kraftstoffe und die Neugestaltung des Strommarktes

Zusätzlich zum Ausbau erneuerbarer Energien ist es notwendig, die Umstellung der übrigen konventionellen Stromerzeugung auf kohlenstoffarme Kraftstoffe und die Neugestaltung des Strommarktes zu beschleunigen, um

ausreichende Investitionen in ein nachhaltiges, sicheres und effizientes Energiesystem sicherzustellen.

Da die Dekarbonisierung des herkömmlichen Energiemixes zur größten Herausforderung bei der Einhaltung der Klimaschutzverpflichtungen wird, sollten die politischen Entscheidungsträger Maßnahmen ergreifen, die auf eine voraussehbare Stilllegung der CO<sub>2</sub>-intensivsten Kraftwerke hinwirken. Zudem müssen die Strommärkte umgestaltet werden, um Investitionen in ein sauberes, zuverlässiges und bezahlbares Energiesystem anzustoßen, die von Zahlungen aus dem Markt oder von Förderregelungen losgelöst sind.

### 3. Schnellere Dekarbonisierung anderer Sektoren mit Sektorintegration

Transportwesen: Entscheidungsträger müssen nachdrücklich eMobility-Lösungen vorantreiben – für den Straßen-, Zug-, Bus-, See- und Luftverkehr. Straßenbasierte eMobility-Lösungen sind neben der Verkehrsverlagerung auf die Schiene entscheidend für eine effiziente und nachhaltige Zukunft des Transportwesens. Vor allem der Güterverkehr verursacht erhebliche Emissionen, die auch noch weiter zunehmen werden. eHighway, die Elektrifizierungslösung von Siemens für den schweren Gütertransport, ermöglicht deutliche Emissionsminderungen und gleichzeitig einen kostengünstigen LKW-Betrieb.

Um die zunehmenden THG-Emissionen im Straßengüterverkehr zu reduzieren, empfehlen wir, auf der Grundlage der erwarteten Ergebnisse der eHighway-Pilotprojekte in Deutschland eine Oberleitungsinfrastruktur und hybride Oberleitungs-LKW einzuführen. Mit einer internationalen Koordination der Implementierung könnten sich für Deutschland noch größere Vorteile ergeben. Deshalb sollte Deutschland unverzüglich damit beginnen, auf eine internationale Koordination, vorzugsweise auf EU-Ebene, hinzuarbeiten.

Power-to-X-Technologien: Power-to-X kann zur Dekarbonisierung beitragen, z. B. in der Industrie oder im Transportsektor. Mit Wind- oder Solarenergie produzierter „grüner“ Wasserstoff könnte den „grauen“ Wasserstoff (heute rund 99 %) ersetzen, der mit Erdgas oder Flüssiggas hergestellt wird. Die Verwendung von grünem Wasserstoff allein für den Entschwefelungsprozess in der Diesel- und Benzinherstellung könnte den CO<sub>2</sub>-Ausstoß um 90 % reduzieren.

In der Stahlindustrie laufen ebenfalls Pilotprojekte, die beweisen sollen, dass „grüner“ Wasserstoff zur Dekarbonisierung kohlenstoffintensiver Prozesse beitragen kann.

Entscheidungsträger sind gefordert, die regulatorischen Rahmenbedingungen anzupassen, die den Einsatz von Power-to-X-Technologien behindern, wie etwa für die Verwendung von grünem Wasserstoff in industriellen Prozessen (Raffinerien, Chemieindustrie etc.) zur CO<sub>2</sub>-Minderung.

### 4. Maximal effiziente Energienutzung

Die Energieverschwendung zu vermeiden, ist ein kostengünstiges Instrument einer kohlenstoffarmen Wirtschaft, da es die Notwendigkeit kapitalintensiver Investitionen im Stromsektor verringert.

Aus diesem Grund sollte das Prinzip der „Energieeffizienz an erster Stelle“ durch ein hoch gestecktes Energieeffizienzziel untermauert werden, das politisch beschlossen und verbindlich ist. Gleichzeitig sollte die Richtlinie technologieneutral sein: Es sollte Aufgabe der Marktakteure sein, die beste und kosteneffizienteste Lösung zur Erreichung dieses Ziels zu finden.

Zusätzlich sollten die politischen und regulatorischen Rahmenbedingungen langfristig Bestand haben und negative Interdependenzen vermeiden, die zu kollidierenden Marktanreizen führen. Politische Entscheidungsträger sollten das Bewusstsein der Öffentlichkeit für Energieeffizienz schärfen und Energiemonitoring mittels Digitalisierung fördern. Dazu bedarf es wiederum der Implementierung von Energiemanagementsystemen.

Schließlich müssen klare Anreize für Investitionen in Energieeffizienz geschaffen werden, z. B. über öffentliche F&E-Förderprogramme oder Steuergutschriften.

### 5. Einführung einer CO<sub>2</sub>-Bepreisung

Ein festgelegter Preis für Kohlenstoff sollte die echten Kosten erfassen, die mit Kohlenstoffemissionen verbunden sind. Er sollte hoch genug sein, um eine Umstellung auf kohlenstoffarme Technologien im Einklang mit den Verpflichtungen aus dem Pariser Klimaschutzabkommen COP21 in Gang zu setzen.

In Europa hat der rein volumenabhängige Emissionshandel nicht die gewünschte Wirkung erzielt. Deutschland und andere EU-Mitgliedstaaten haben verschiedenste politische Maßnahmen eingeleitet, die den CO<sub>2</sub>-Ausstoß gesenkt und in der Folge den Kohlenstoffmarkt verzerrt haben. Das wird sich nicht ändern. Daher erachtet Siemens die Einführung einer Preisgestaltung für Kohlenstoff als unvermeidlich. Dies könnte in Form einer Kohlenstoffsteuer oder eines Mengensteuerungssystems mit einem entsprechenden Mindestpreis erfolgen. Das vorhersehbare Preissignal ist wichtig, um einen zuverlässigen Rahmen für Investoren zu schaffen.

Weitere politische Maßnahmen sollten eingeleitet werden, um zu verhindern, dass die Dekarbonisierungswirkung der Kohlenstoffbepreisung untergraben wird. Siemens unterstützt den Vorschlag der Europäischen Kommission, in der EU-Rechtsprechung eine Obergrenze für CO<sub>2</sub>-Emissionen einzuführen.

2016 hat sich Siemens der Carbon Pricing Leadership Coalition of the World Bank (CPLC) angeschlossen, um sich für die weltweite Einführung eines Preises für Kohlenstoff einzusetzen.

# Anhang

## Beschreibung des Szenarien-Modellierungskonzepts

Siemens verfügt über ein hohes Maß an Erfahrung mit Modellierungs- und Simulationstools. Um Ergebnisse des vorliegenden Whitepapers abzuleiten, wurden zwei Arten von Simulationstools verwendet.

### Übersicht über den ESDP-Modellansatz

Das ESDP (Energy System Development Plan) -Tool ist eine Siemens-interne Entwicklung zur Optimierung von Energiesystemen. Es verfügt über ein kostenoptimierendes makroökonomisches Gleichgewichtsmodell (Teilmodell), das gleichzeitig sowohl die (stündlichen) Betriebszeitpläne als auch die Kapazitäten innerhalb eines Energiesystems optimiert. Es wird eine makroökonomische Kostenfunktion erstellt, die die Investitions-, Fix- und variablen Betriebskosten jeder Technologie sowie ihrer Transportinfrastruktur abdeckt. Die Kosten werden über mehrere simulierte Jahre aggregiert und auf ihren aktuellen Barwert abgezinst, der für die optimalen Entwicklungspfade des Systems effektiv optimiert wird. Der Modellansatz ist multimodal, d.h. er ist in der Lage, die Kopplungen mehrerer Energiebereiche wie Strom, Wärme oder Gas zu berücksichtigen. Das System kann parametrisiert werden, um das Energiesystem für einzelne betrachtete Jahre zu optimieren. Normalerweise kommt es jedoch zur Anwendung, um die bestmöglichen Entwicklungspfade ausgehend vom jetzigen Zeitpunkt für einen bestimmten Betrachtungshorizont zu ermitteln. Das Modell kann für Punktmodelluntersuchungen verwendet werden, die eine kompakte Datenaufbereitung vorsehen oder mehrere Einzelregionen mit der erforderlichen Verbundkapazität zwischen ihnen modellieren können. Das System ermöglicht die Definition mehrerer Szenarien, die entweder als vollständig kostenoptimierte Lösungen ermittelt oder mehr oder weniger vom Nutzerverhalten bestimmt werden können. Ein oder mehrere Hauptentwicklungsszenarien werden für gewöhnlich angereichert und mit mehreren Sensitivitätsanalysen verglichen. Das Tool ermöglicht auf diese Weise einen ganzheitlichen und belastbaren Blick auf die möglichen Entwicklungspfade eines Energieversorgungssystems.

Die wichtigsten Einflussfaktoren für ESDP sind

- Eine Technologielandkarte („Tech Map“): verfügbare Technologien und ihre technische und wirtschaftliche Beschreibung (z. B. Effizienz, Investitionskosten pro installierte Leistung, technische und finanzielle Laufzeit etc.), verschiedene Szenarien und szenarienabhängige Nebenbedingungen (z. B. feste Kapazitäten für einige Technologien)
- „Volumendaten“: Große Datensätze wie die Zeitabhängigkeitsstruktur einer bestimmten Zeitreihe von Bedarfen oder der Verfügbarkeit erneuerbarer

Energien (anhand von Wetterdaten, möglicherweise mit regionaler Auflösung).

Die Primärergebnisse sind Betriebspläne für die einzelnen Technologien, kostenoptimierte Kapazitäten für Technologien und Marktpreise für jede Energieform des Modells für jede Modellstunde unter der Annahme idealer Marktbedingungen. Von diesen Primärergebnissen können sekundäre Ergebnisse abgeleitet werden in Form von Gesamtsystemkosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen, technologiespezifischen CAPEX- und OPEX-Ausgaben sowie jährlichen Umsätzen pro kW oder Statistiken zur erforderlichen Flexibilität eines Technologiebetriebs.

### „DeCarb“-Modell der Division Power and Gas

Das „DeCarb“-Modell wurde bei Siemens PG erstellt, um den detaillierten Dekarbonisierungspfad durch Sektorkopplung für Deutschland zu analysieren. Für Energiebedarf, Energiemix und CO<sub>2</sub>-Emissionen gibt es jeweils eigene Modelle im Hinblick auf die unterschiedlichen Endnutzensektoren wie Industrie, Transport, Wärmeversorgung und Stromerzeugung. Die Modellierung richtet sich in erster Linie nach dem ‚Klimaschutzplan 2050‘, der die CO<sub>2</sub>-Emissionsminderungsziele für die einzelnen Sektoren festlegt. Für jeden Sektor werden saubere Energietechnologien im Hinblick darauf bewertet, inwieweit sie die früheren auf fossilen Brennstoffen basierenden Technologien ersetzen können. Technologien werden nach ihrem Effizienzgrad, den CO<sub>2</sub>-Emissionen, Kosten und ihrer Wirtschaftlichkeit bewertet. Dazu werden zahlreiche externe Untersuchungen zum aktuellen Stand und zur zukünftigen Entwicklung von Effizienz, CAPEX- und OPEX-Kosten herangezogen. Die grundlegenden Annahmen der Szenarienanalyse wie die wirtschaftliche Entwicklung und allgemeinen Bedarfsprognosen sind dem IHS-Rivalry-Szenarios entnommen.

Alle sauberen Energietechnologien zeichnen sich generell durch Elektrifizierung der Anwendungen aus, für die zuvor fossile Brennstoffe eingesetzt wurden. Wenn Energie längerfristig hauptsächlich aus erneuerbaren Energieträgern gewonnen wird, führt das zu einer deutlichen Emissionsminderung. Für Anwendungen, bei denen die direkte Elektrifizierung ungeeignet ist, zum Beispiel aufgrund einer begrenzten Reichweite oder unzureichender Energiedichte (z. B. Flugverkehr, Schiffsverkehr, Hochtemperatur-Wärme in der Industrie), kommen ‚grüne SynFuels‘ (synthetische Kraftstoffe wie Wasserstoff, Methan, Methanol) in Frage, die auf der Basis erneuerbarer Energien hergestellt werden. Einige Technologien (z.B. Elektromobilität und Wärmepumpen) bieten ebenfalls große Vorteile hinsichtlich der Gesamteffizienz und damit eines allgemein niedrigeren Energiebedarfs. Der Zeitplan für die Einführung der Technologien, der Beginn und Umfang werden vom prognostizierten Stand der Technologien und der für den betreffenden Zeitpunkt festgelegten Emissionsminderung bestimmt.

Neben der Modellierung einer ausreichenden Energieversorgung wird besonderes Augenmerk auf die Versorgungssicherheit gelegt. Bei einem Sektorkopplungsansatz wird Elektrizität zum Grundpfeiler



des gesamten Energiesystems. Auf der anderen Seite würde die Energieerzeugung hauptsächlich auf erneuerbaren Energieträgern basieren, die Schwankungen unterliegen. In dem Modell sind ‚grüne SynFuels‘ neben der Batteriespeicherung und der Nachfragesteuerung ein wichtiger Faktor für die Erhaltung der Versorgungssicherheit.

Die Hauptergebnisse der Modellierung sind der sektorbezogene Energiebedarf und die CO<sub>2</sub>-Emissionen, der Energiemix und die erforderlichen Kapazitäten aufgeschlüsselt nach Technologien. Die Hauptergebnisse werden anhand externer Studien verifiziert, die entweder die Sektorkopplung insgesamt oder ein einzelnes Sektormodell für Deutschland untersuchen. Besondere Berücksichtigung findet die Studie des Fraunhofer ISE ‚Was kostet die Energiewende?‘ als bislang umfangreichste Studie.