- Anlage 9 -

dena
Deutsche Energie-Agentur

Zwischenfazit

dena-Leitstudie Integrierte Energiewende

Impulse und Erkenntnisse aus dem Studienprozess

Integrierte Energiewende

Inhaltsverzeichnis

1.	**Vorwort**	**3**
2.	**Die dena-Leitstudie Integrierte Energiewende**	**4**
3.	**Zwischenfazit**	**7**
	Zielpfade frühzeitig ausrichten und Investitionen forcieren.	7
	Entschlossen das regulatorische Fundament für die Zukunft setzen.	8
	Die Energiewende technologieoffen gestalten und bestehende Infrastrukturen bestmöglich nutzen.	8
	Innovationen, Forschung und Entwicklung stärker anstoßen.	9
	Energieeffizienz in allen Verbrauchssektoren erhöhen.	9
	Energiewende in europäische und globale Entwicklungen einbinden.	9
	Teilhabe der Bürgerinnen und Bürger an der Energiewende sichern.	10
4.	**Handlungsbedarfe in den einzelnen Sektoren**	**11**
	Energieerzeugung und -verteilung	11
	Gebäude	13
	Industrie	14
	Mobilität	15
5.	**Übersicht der Szenarios**	**16**

1. Vorwort

Die Veränderungsdynamik der Energiewende ist immens und beschleunigt sich kontinuierlich. Es geht nicht mehr nur darum, erneuerbare Energien aus der Nische zu holen. Das Ziel ist, ein Energiesystem zu schaffen, in dem wir – über alle Sektoren hinweg – im Jahr 2050 kaum noch CO_2 ausstoßen. Die Weichen dafür müssen wir jetzt stellen. Der Klimaschutzplan 2050 hat einen Rahmen vorgegeben, doch die besten Wege zur Zielerreichung müssen erst noch gefunden werden.

Deshalb arbeiten wir seit Anfang 2017 mit mehr als 50 Stakeholdern aus Unternehmen und Verbänden an der Leitstudie Integrierte Energiewende. Über einen Beirat, in dem Vertreter aus Wissenschaft, Politik und Zivilgesellschaft mitwirken, sorgen wir für eine Verankerung unseres Projektes weit über die beteiligten Stakeholder hinaus. Gemeinsam wollen wir in einem branchenübergreifenden Dialog realistische Transformationspfade entwickeln und Handlungsempfehlungen formulieren. In einer ersten Phase haben wir in den Sektoren Energieerzeugung und -verteilung, Gebäude, Industrie und Mobilität gemeinsame Grundlagen erarbeitet und gegenseitige Pfadabhängigkeiten betrachtet. Das vorliegende Zwischenfazit ist ein erster Beitrag zur Debatte, rechtzeitig zu Beginn der neuen Legislaturperiode. In der zweiten Phase wollen wir uns selbst infrage stellen und intensiv verschiedene Sensitivitäten betrachten. Am Ende, Mitte 2018, wird eine konkrete Grundlage für realistische politische Entscheidungen stehen.

Den Begriff integrierte Energiewende haben wir bewusst gewählt. Denn es geht um mehr als nur um eine simple Kopplung von Sektoren. Die Herausforderung besteht darin, die wachsende Zahl an Komponenten aus allen Sektoren aufeinander abzustimmen und in einem intelligenten und nachhaltigen Energiesystem zu integrieren. Jeder Sektor hat eigene Anforderungen, Rahmenbedingungen, Infrastrukturen, Märkte und ein spezifisches Kundenverhalten. Eine effiziente und kostenoptimale Energiewende muss sich mit dem Zusammenspiel dieser unterschiedlichen Strukturen auseinandersetzen. Hinzu kommen die Wechselwirkungen mit den Energiemärkten anderer europäischer Länder und das Entstehen eines europäischen Energiebinnenmarkts. Deshalb sprechen wir von der integrierten Energiewende.

Die Leitstudie ist anders als andere Studien zur Energiewende. Wir belassen es nicht bei Szenarien, wie die Welt im Jahr 2050 auszusehen hat, sondern wir beschäftigen uns vor allem mit der Frage nach dem bestmöglichen Weg zur Zielerreichung. Dabei setzen wir gezielt auf die Erfahrungen derjenigen, die die Energiewende in der Praxis umsetzen. Wir wollen mehr Bottom-up denken, weniger Top-down. Wir machen das Mögliche sichtbar und belassen es nicht bei dem Wünschenswerten. Ein komplexes Unterfangen, aber der bisherige Verlauf unseres Dialogs zeigt, dass wir auf einem sehr spannenden und produktiven Weg sind. Alle Beteiligten haben großes Interesse daran, gemeinsam Lösungen zu finden. Alle streben nach klaren, langfristig angelegten Rahmenbedingungen, die kluge Anreize setzen und Freiräume für Innovationen schaffen.

Unser Projekt ist ein Angebot an die Politik. Es gilt, den Klimaschutzplan 2050 mit Leben zu füllen. Wir setzen auf die Bereitschaft, sich mit den realen Gegebenheiten und Herausforderungen auseinandersetzen und dabei die erforderlichen Akteure konstruktiv einzubinden. Unsere bisherigen Ergebnisse zeigen: Vieles ist möglich, auch wenn es anstrengend wird. Die Mühe lohnt sich also.

Herzlichst,

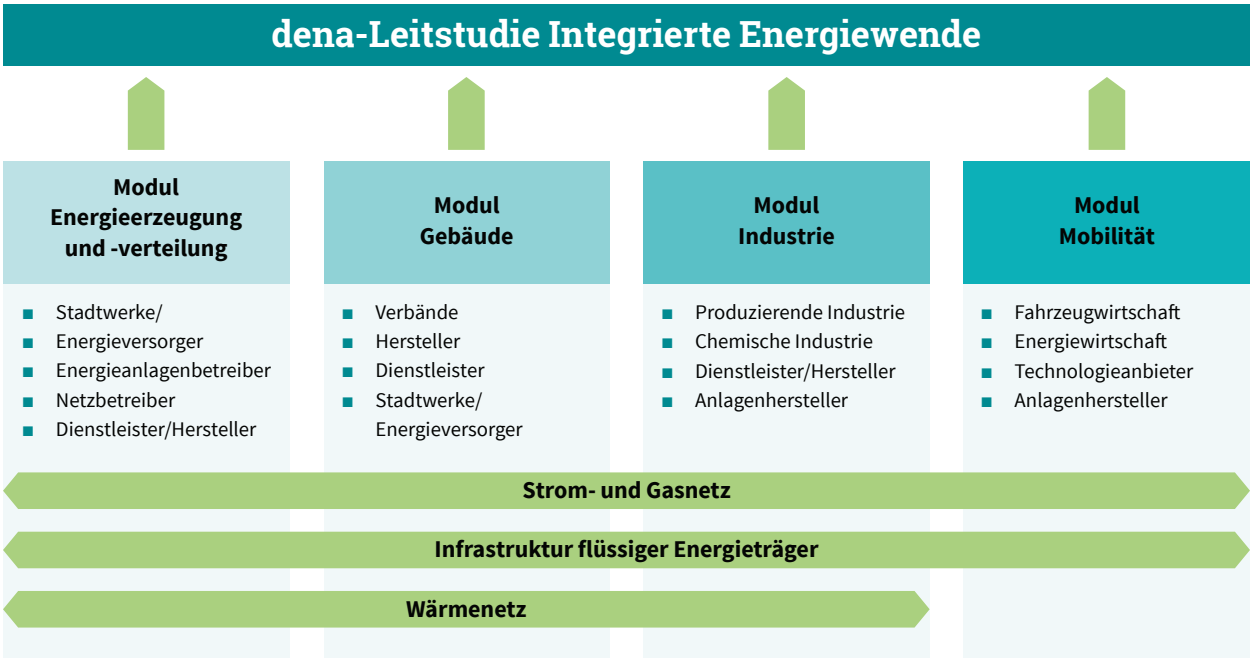
Ihr Andreas Kuhlmann

2. Die dena-Leitstudie Integrierte Energiewende

Die Zielsetzung der deutschen Energie- und Klimapolitik ist bekannt: 2050 sollen die Emissionen von Treibhausgasen gegenüber 1990 um 80 bis 95 Prozent sinken. Dies beruht auf den Beschlüssen der Pariser Klimakonferenz, nach denen die Erderwärmung auf deutlich unter 2 Grad, besser auf 1,5 Grad begrenzt werden soll. Die Deutsche Energie-Agentur (dena) hat deshalb im Februar 2017 mit über 50 Partnern aus verschiedenen Branchen die „dena-Leitstudie Integrierte Energiewende“ initiiert. Das Ziel der Leitstudie ist, Lösungen und Rahmenbedingungen für ein optimiertes, nachhaltiges Energiesystem bis 2050 zu identifizieren und realistische Gestaltungsmöglichkeiten in vier Sektoren mit zahlreichen Unterbranchen zu analysieren.

Die dena hat das Projekt initiiert und leitet es. Sie ist verantwortlich für die Konzeption und Umsetzung des Arbeitsprogramms sowie für die Kommunikation. Innerhalb des Projekts beraten die Studienpartner im Lenkungskreis über die grundsätzliche Ausrichtung der Studie und entscheiden zu modulübergreifenden Fragestellungen. In den Modulsteuerkreisen diskutieren die beteiligten Partner spezifische Transformationspfade und Parametrisierungen der Studienmodule. Ein Beirat renommierter Akteure aus Wissenschaft, Politik und Zivilgesellschaft steht der dena beratend zur Seite. Ergänzend werden öffentliche Dialogveranstaltungen durchgeführt, um Fragestellungen und Erkenntnisse über den Partnerkreis hinausgehend mit einem breiten Stakeholder-Kreis diskutieren zu können.

Die dena-Leitstudie Integrierte Energiewende ist in vier Studienmodule „Energieerzeugung und -verteilung“, „Gebäude“, „Industrie“ und „Mobilität“ aufgeteilt. Dabei werden die zur Deckung der Energiebedarfe notwendigen Infrastrukturen – Strom, Gas- und Wärmenetze sowie die Infrastrukturen für flüssige Energieträger – gemeinsam über die Modulgrenzen hinweg betrachtet.



Wissenschaftlicher Hauptgutachter der dena-Leitstudie ist Dr. Harald Hecking/ewi Energy Research & Scenarios gGmbH ergänzt um die Fachgutachter Prof. Dr.-Ing. Christian Rehtanz/ef.Ruhr GmbH, Prof. Dr.-Ing. Bert Oschatz/ITG Dresden, Prof. Dr.-Ing. Andreas Holm/FIW München, Prof. Dr. Peter Radgen und Dr. Frank May. Für die Modellierung im Rahmen der Phase 1 der Studie wurden drei Szenarios definiert. Eine vergleichende Übersicht der Szenarios mit relevanten Zwischenergebnissen ist in Abschnitt 5 dargelegt.

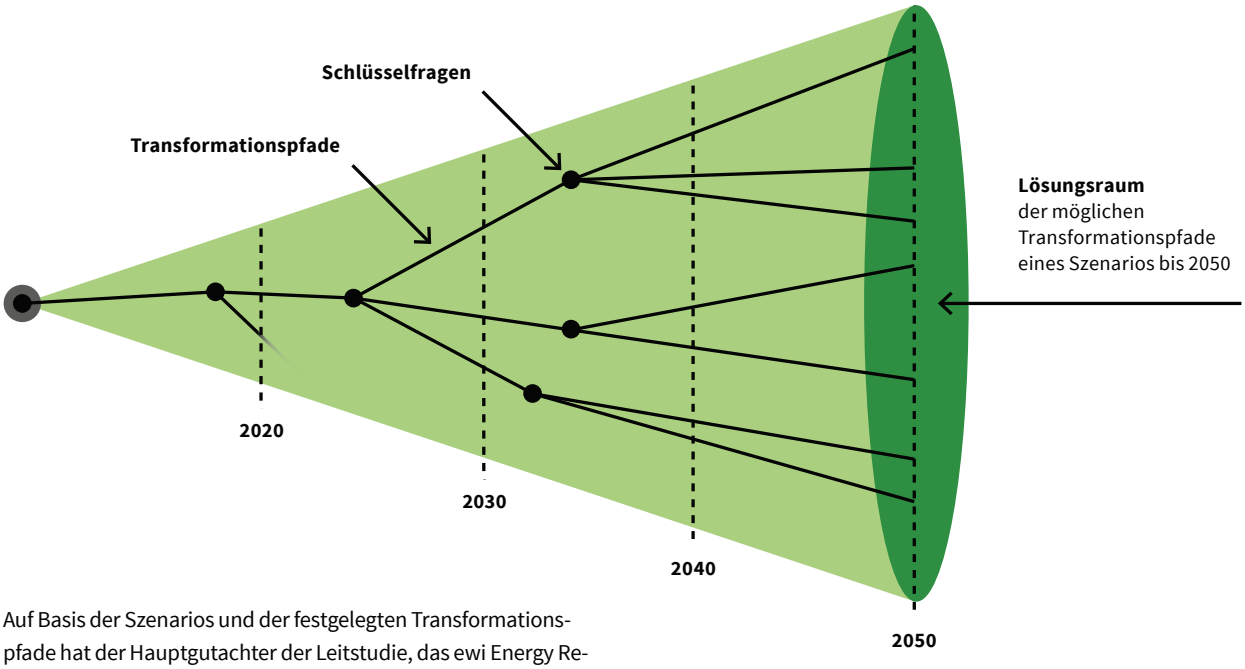
- Das **Referenzszenario (RF)** schreibt die aktuellen Entwicklungen (Ausbaukorridor EE bis 2030, bisherige Sanierungsraten etc.) im Energiesektor sowie in den Endenergieverbrauchssektoren bis 2050 fort und setzt moderate Annahmen für CO_2-Zertifikatspreise. In der Modellierung wird kein Ziel zur THG-Minderung vorgegeben. Das Szenario dient als Vergleichswert für die anderen beiden Szenarios.

- Das **Elektrifizierungsszenario (EL)** geht von der Steigerung der Energieeffizienz und einer breiten Elektrifizierung in allen Sektoren aus, was zu einer deutlichen Zunahme der Stromnachfrage führt. PtX-Produkte werden berücksichtigt, wenn sie zwingend erforderlich werden. Das Szenario wird mit Blick auf das Ziel einer Reduktion von 80 (EL80) und 95 Prozent (EL95) der Treibhausgase analysiert.

- Das **Technologiemix-Szenario (TM)** nimmt ebenfalls die Steigerung der Energieeffizienz an, lässt jedoch bewusst eine breitere Variation in den eingesetzten Technologien und Energieträgern zu. Das Szenario wird in der Modellierung hinsichtlich einer Reduktion von 80 (TM80) und 95 Prozent (TM95) der Treibhausgase analysiert.

Auf Basis dieser grundsätzlichen Ausrichtung der Szenarios wurden in engem Austausch mit den Experten der beteiligten Partner sowie mit den Gutachtern übergeordnete Studienannahmen (z. B. Bevölkerungswachstum, Zinssätze) und Rahmenparameter (z. B. Technologieentwicklung und -kosten, Energieträgerpreise) diskutiert und festgelegt sowie modulspezifische Transformationspfade für die Verbrauchssektoren Gebäude, Industrie und Mobilität entwickelt, über die Sektoren hinweg abgestimmt und für die weiteren Berechnungen exogen vorgegeben.

Ein Transformationspfad ist dabei die Beschreibung der möglichen Veränderungen eingesetzter Technologien, Materialen, Steuerungsprozesse etc. in einem Verbrauchssektor von 2017 bis 2050. Am Ende des Transformationspfades wird ein Szenario erreicht. Jeder Veränderungspunkt innerhalb eines Transformationspfads ist dabei von einer Schlüsselfrage geprägt, deren spezifische Beantwortung als Parameter in die Modellierung eingeht. Die Schlüsselfragen und die daraus abgeleiteten Parameter wurden ebenfalls innerhalb der Modulsteuerkreise diskutiert und festgelegt.



Auf Basis der Szenarios und der festgelegten Transformationspfade hat der Hauptgutachter der Leitstudie, das ewi Energy Research & Scenarios gGmbH, Optimierungen mit einem Gesamtsystemmodell durchgeführt, um erforderliche Energiemengen, Infrastrukturen zur Energieerzeugung und -verteilung sowie Kostenverteilungen zu berechnen. Sowohl das Referenzszenario als auch das Elektrifizierungs- und Technologiemix-Szenario sind gegenüber einem Erhalt des heutigen Energiesystems mit Mehrkosten verbunden. Die gesellschaftliche Verteilung dieser Kosten wurde nicht untersucht. Die in diesem Zwischenfazit dargelegten Erkenntnisse und die genannten Zahlen stammen aus Zwischenergebnissen und den geführten Dialogprozessen der ersten Phase der dena-Leitstudie Integrierte Energiewende. In Phase 1 wurde je Szenario ein Transformationspfad entwickelt und auf die Zielerreichung des 80-Prozent- bzw. des 95-Prozent-Ziels modelliert.

Für die Phase 2 werden aufbauend auf den bisherigen Erkenntnissen weitergehende Szenarios und Transformationspfade untersucht, um die bisherigen Erkenntnisse zu vertiefen, die Sensitivitäten der getroffenen Annahmen zu analysieren und weitergehende Fragestellungen zu beantworten. Auf dieser Basis soll ein weiter differenziertes Endergebnis entstehen. Die Finalisierung der Leitstudie wird im ersten Halbjahr 2018 erwartet.

Zum Kreis der Studien- und Modulpartner gehören:

Der Beirat besteht aus folgenden Personen:

- Für die **Wissenschaft**: Prof. Dr. Dirk-Uwe Sauer (Acatech ESYS, Vorsitzender des Beirats), Prof. Dr. Manfred Fischedick (Wuppertal Institut), Prof. Dr. Clemens Hoffmann (Fraunhofer IWES), Prof. Dr. Karsten Lemmer (DLR), Prof. Dr. Ortwin Renn (IASS Potsdam), Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner (TU München).

- Für die **Zivilgesellschaft**: Stefan Körzell (DGB), Holger Lösch (BDI), Klaus Müller (VZBV), Sabine Nallinger (Stiftung 2°), Michael Schäfer (WWF), Harriet Wirth (KfW) , Dr. Christoph Wolff (European Climate Foundation).

- Für die **Politik**: Dr. Axel Bree (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie), Dr. Karl Eugen Huthmacher (Bundesministerium für Bildung und Forschung), Dr. Karsten Sach (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit), Dr. Volker Oschmann (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie), Dr. Gerhard Schulz (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur), Norbert Conrad (Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr Niedersachsen), Helmfried Meinel (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg), MdB Ralph Lenkert (Fraktion Die Linke), MdB Dr. Joachim Pfeiffer (CDU/CSU Fraktion), MdB Dr. Julia Verlinden (Fraktion Bündnis 90/Die Grünen), MdB Bernd Westphal (SPD Fraktion).

3. Zwischenfazit

Deutschland kann seine energie- und klimapolitischen Ziele bis 2050 nur mit einer integrierten Energiewende und stärkeren Anstrengungen als heute erreichen. Die integrierte Energiewende steht für einen Systemansatz, der über die Sektorengrenzen hinweg auf ein optimiertes und nachhaltiges Energiesystem hinwirkt – in der Balance zwischen zentralen und dezentralen Lösungen und eingebettet in das internationale Umfeld. Dabei muss ein Weg gefunden werden, der Strukturbrüche und unnötige Kosten vermeidet, um die Wettbewerbsfähigkeit der Industrie zu erhalten und die Akzeptanz für die Energiewende in der Bevölkerung dauerhaft zu gewährleisten.

Eine integrierte Energiewende benötigt ein intensives Zusammenwirken und einen Dialog zwischen Branchen bisher noch weitgehend getrennter Sektoren. Und sie erfordert, dass die Kompetenzen und die Experteneinschätzungen aus den Branchen möglichst umfassend genutzt werden. Die dena-Leitstudie möchte hier einen Beitrag leisten, indem sie Akteure branchenübergreifend zusammenführt, um gemeinsam Bottom-up-Lösungen und Gestaltungsmöglichkeiten für die Erreichung der energie- und klimapolitischen Ziele bis 2050 zu erarbeiten.

Als Zwischenfazit stellt der Partnerkreis der dena-Leitstudie fest, dass für eine erfolgreiche, integrierte Energiewende vor allem die folgenden Aufgaben angegangen werden müssen:

Zielpfade frühzeitig ausrichten und Investitionen forcieren.

- Eine Fortschreibung aktueller Entwicklungen auf Basis der bestehenden Rahmenbedingungen und bereits getroffener politischer Entscheidungen sowie der Fortschreibung von Technologieentwicklung und -einsatz im Referenzszenario (RF) ergibt eine THG-Minderung von 61 Prozent im Jahr 2050. Auch dieses Szenario erfordert bereits anhaltende Anstrengungen aller Akteure.

- In den Szenarios Elektrifizierung (EL) und Technologiemix (TM) wurde der Zielkorridor von 80 bis 95 Prozent THG-Minderung jeweils erreicht. Allerdings wurde das 95-Prozent-Ziel mit den gegenwärtig der Studie zugrunde liegenden Annahmen nicht erfüllt: Bei Einsatz der heute verfügbaren Technologien werden selbst bei sehr weitreichenden, allerdings kaum realistischen, Anstrengungen zu nahezu vollständiger Klimaneutralität in den Sektoren Verkehr, Energie und Gebäude durch verbleibende Emissionen des Industriesektors sowie der Land- und Abfallwirtschaft nur eine Minderung von 91 (EL95) bzw. 90 Prozent (TM95) erreicht.

- Dies zeigt, dass ein Transformationspfad hin zu einem 95-Prozent-Ziel nicht nur die „Verlängerung“ des Pfades zum 80-Prozent-Ziel sein kann, sondern z. T. ganz andere Herangehensweisen und Technologien benötigt. Die rechtzeitige Festlegung der weiteren grundlegenden Strategie ist daher von großer Bedeutung, um die Klimaziele zu erreichen, für eine zielführende Gestaltung der Rahmenbedingungen und für die notwendige Planbarkeit in Unternehmen sowie bei Bürgerinnen und Bürgern.

- Die Energiewende benötigt eine sektorübergreifende integrierte Optimierung mit Blick auf die Erreichung der Gesamtziele statt einseitiger sektoraler Fokussierung. Sektoren sollen nicht aus ihrer Verantwortung entlassen werden, zu starre „Korsette“ verhindern jedoch eine dynamische Anpassung unter Nutzung marktwirtschaftlicher Koordinierungsmechanismen. Dadurch können Fehlentwicklungen angereizt werden, die volkswirtschaftlich nicht sinnvoll sind.

- Die erfolgreiche Umsetzung der Energiewende benötigt die aktive Mitwirkung aller Akteure. Strategische Klarheit und Planbarkeit ist notwendig, damit langfristige Investitionen der unterschiedlichen wirtschaftlichen Akteure beispielsweise in erneuerbare Energien, Infrastrukturen und zur Steigerung der Energieeffizienz vorgenommen werden. U. a. wird ein über den aktuellen Korridor deutlich hinausgehender Ausbau erneuerbarer Energien-Anlagen von mindestens 8 GW/a benötigt, um allein schon das 80-Prozent-Ziel zu erreichen. Es muss geklärt werden, wie dies mit der notwendigen Synchronisierung mit dem Netzausbau vereinbart werden kann.

Entschlossen das regulatorische Fundament für die Zukunft setzen.

- Die Energiewende ist ein Gesellschaftsprojekt von enormer Tragweite, aber auch beispielloser Komplexität. Dies zeigt sich insbesondere auch bei der Gestaltung der Rahmenbedingungen, die von Einzelmaßnahmen und einem kontinuierlichen Nachbessern bezogen auf Teilaspekte geprägt sind.

- Wegen der hohen Komplexität und Umsetzungskosten ist die integrierte Energiewende auf eine marktwirtschaftlich orientierte Ordnungspolitik anstelle einer staatlichen Planung mit Technologiegeboten und -verboten angewiesen.

- Damit die Marktakteure verlässliche Rahmenbedingungen haben und optimierte Lösungen über Sektorengrenzen hinweg entwickeln können, wird ein solides regulatorisches Fundament mit einer langfristig planbaren Anreizwirkung auf Energieeffizienz und effiziente CO_2-Vermeidung sowie eine konsistente Überarbeitung der Abgaben- und Umlagen benötigt.

- Gleichzeitig ist dies die Voraussetzung für eine effiziente Politikgestaltung, um auf dieser Basis mit gezielten Maßnahmen und Instrumenten dort anzusetzen, wo der Markt versagt, Verteilungswirkungen sowie soziale Schieflagen berücksichtigt oder Prozesse beschleunigt werden müssen (z. B. Versorgungssicherheit, regionale Wertschöpfung, Investitionsanreize in Energieeffizienz).

- Die Entwicklung eines soliden regulatorischen Fundaments wird vielfältige Interessen berühren und auch in den europäischen Rahmen eingebettet sein, nichtsdestotrotz gilt es, seitens der Politik diese systementscheidende Reform mit Weitsicht und Mut anzugehen.

Die Energiewende technologieoffen gestalten und bestehende Infrastrukturen bestmöglich nutzen.

- Der optimale Transformationspfad des Energiesystems für die nächsten 30 Jahre zur Erreichung der 2050-Ziele kann nicht vorherbestimmt werden, da zu viele Unsicherheitsfaktoren bezüglich der noch möglichen Herausforderungen und Chancen auf dem Weg bestehen.

- Die bisherigen Ergebnisse der dena-Leitstudie Integrierte Energiewende zeigen aber sehr wohl, dass Szenarios, die einen breiteren Technologiemix annehmen, bis 2050 deutlich geringere Kosten verursachen könnten als Szenarios, die einseitig auf einen hohen Grad an Elektrifizierung ausgelegt sind.

- Die Rahmenbedingungen sollten daher so gestaltet werden, dass verschiedene Technologien und Energieträger in den Wettbewerb zur effizientesten Erreichung der energie- und klimapolitischen Ziele treten können. Der Systemwettbewerb ist die Basis für technologische Innovationen bis zum Erreichen der energiepolitischen Ziele und darüber hinaus. Anreize sind dabei Verboten vorzuziehen. Dadurch bildet sich auch ein flexibler Lösungskorridor, in dem sich technologischer Fortschritt und Innovation besser entfalten können. Gleichzeitig besteht eine höhere Robustheit, um auf neu entstehende Herausforderungen (z. B. fehlende Akzeptanz, Innovation, Kostenentwicklung) und globale Entwicklungen reagieren zu können.

- Grundsätzliche Entscheidungen über Infrastrukturen können auch zukünftig nicht dem Markt überlassen, sondern müssen durch die Politik getroffen werden. Dies betrifft die rechtzeitige Entscheidungen für oder wider neue Infrastrukturen (z. B. Oberleitungen für LKW) aber insbesondere auch die bestmögliche Nutzung und Weiterentwicklung bestehender Infrastrukturen, um die Vorteile des breiteren Technologiemix nutzen zu können:

  - Eine wichtige Grundlage für das zukünftige Energiesystem bilden neben der Stromversorgung das Gasnetz sowie die Infrastrukturen zur Bereitstellung flüssiger Energieträger, für die in den Szenarios sukzessive der Anteil erneuerbarer Gase und Kraftstoffe erhöht wird. Insbesondere Anwendungsbereiche, die durch Strom nicht oder nur ineffizient versorgt werden können (z. B. Bereitstellung von gesicherter Leistung, Langzeitspeicher, Schiffs-, Flug- und Schwerlastverkehr, industrielle Prozesse), können so klimafreundlich werden.

  - Der Bedarf an aus erneuerbaren Energieträgern gewonnenen synthetischen Brennstoffen wird sukzessive zunehmen, sowohl im Inland als auch auf dem Weltmarkt. Für Deutschland besteht ab 2030 selbst bei EL80 ein signifikanter Bedarf an synthetischen Brennstoffen, der bis 2050 selbst in diesem Szenario auf etwa 8 Prozent des Gesamtenergiebedarfs ansteigt. In allen anderen Szenarios liegt der Bedarf erheblich darüber. Deutschland sollte daher die Markteinführung der entsprechenden Technologien unterstützen, um die rechtzeitige Verfügbarkeit abzusichern und die Entwicklung globaler Märkte anzustoßen.

  - Aber auch der Weiterentwicklung der IKT-Infrastruktur und der Rahmenbedingungen für die Digitalisierung im Energiebereich (u. a. Einsatz von Smart Metering) kommt eine wichtige Rolle zu, damit die Chancen der Digitalisierung für die erfolgreiche Realisierung der Energiewende umfänglich genutzt werden können.

Innovationen, Forschung und Entwicklung stärker anstoßen.

- Alle untersuchten Szenarios erfordern erhebliche Anstrengungen in Forschung und Entwicklung. Die untersuchten Szenarios der Leitstudie erreichen im Jahr 2050 eine THG-Minderung von höchstens 91 Prozent. Mit heute bekannten Technologien und deren erwarteter Weiterentwicklung sind also deutliche Schritte in Richtung eines klimafreundlichen integrierten Energie- und Wirtschaftssystems möglich. Sie reichen jedoch nicht aus, um das obere Ende des Zielkorridors zu erreichen.

- Zur weiteren Verbesserung der Wirtschaftlichkeit und Sozialverträglichkeit sowie der Erschließung weitergehender Potenziale für Energieeffizienz, Energiespeicher, erneuerbare Energien und Systemlösungen gilt es die bestehende Förderung von Forschung und Innovation fortzusetzen bzw. zu intensivieren, um die Verfügbarkeit besonders entscheidender Energiewende-Technologien zu fördern (z. B. im Bereich der Energiespeicherung) und Chancen durch die Digitalisierung zu nutzen.

- Für bestimmte Anwendungen sowie für einzelne emissionsstarke Industrieprozesse bestehen heute und in der kurz- bis mittelfristigen Perspektive noch keine marktreifen technischen Alternativen zur deutlichen Emissionsminderung. Unter Berücksichtigung der langen Innovationszyklen von bis zu 30 Jahren von der Grundlagenforschung bis zur Markteinführung, müssen wir daher bereits heute die notwendigen Investitionen anreizen, um die rechtzeitige Verfügbarkeit der Innovationen zu ermöglichen.

Energieeffizienz in allen Verbrauchssektoren erhöhen.

- Die Energiewende lässt sich nur mit einer deutlichen Steigerung der Energieeffizienz erreichen. Die untersuchten Szenarios zeigen, dass selbst bei ambitionierten Annahmen zur Steigerung der Energieeffizienz bis 2050 ein weitreichender Ausbau der erneuerbaren Energien von 350 bis 400 GW und ein über die bisherigen Planungen deutlich hinausgehender Netzausbau notwendig wären.

- Trotz der Verfügbarkeit vielfältiger technischer Lösungen und wirtschaftlicher Energieeffizienzpotenziale in allen Sektoren, bleiben die tatsächlichen Effizienzsteigerungen bisher deutlich hinter den Zielwerten zurück. Gründe hierfür sind u. a. die hohen erforderlichen Investitionen verbunden mit langen Amortisationszeiten, lange Nutzungsdauern vorhandener Geräte und Anlagen Rebound-Effekte sowie Informationsdefizite und Akzeptanzprobleme.

- Durch den Systemansatz einer integrierten Energiewende lassen sich weitere Effizienzpotenziale erschließen. Zudem wird die Digitalisierung dazu beitragen, auch kleinteilige Effizienzmaßnahmen wirtschaftlich in der Breite umzusetzen und damit die Voraussetzung für weitergehende Effizienzsteigerungen über Wertschöpfungsstufen hinweg liefern.

- Dabei müssen die Konzepte und Strategien für Energieeffizienz vor dem Hintergrund der integrierten Energiewende weiterentwickelt werden, um die erforderliche Abwägung hinsichtlich der Reduzierung der bezogenen Energiemenge, der Bereitstellung von Flexibilität und den Anforderungen für die sicher abzudeckende Leistung abzubilden. Denn Bereitstellung von Flexibilität kann die Energieeffizienz von Stromanwendungen senken, wenn z. B. Aggregate dafür mit höherer Leistung ausgelegt und abseits des optimalen Betriebspunkts betrieben werden müssen.

- Das beschriebene regulatorische Fundament muss die Voraussetzungen für die Steigerung der Energieeffizienz liefern. Es werden aber darüber hinaus auch politische Instrumente erforderlich sein, um Investitionshemmnisse und Informationsdefizite zu reduzieren. Diese müssen so gestaltet werden, dass aus einzelwirtschaftlicher Perspektive ausreichende Freiheitsgrade bestehen bleiben, um im Sinne einer integrierten Energiewende die Reduzierung von Emissionen und Optimierungen über Systemgrenzen und Wertschöpfungsketten hinweg zu ermöglichen.

Energiewende in europäische und globale Entwicklungen einbinden.

- Auch bei einer erfolgreichen Umsetzung der Energiewende wird Deutschland weiterhin auf Energieimporte angewiesen sein. Die Szenarios zeigen einen intensiven Stromaustausch mit den europäischen Nachbarstaaten (über 100 TWh/a Importe zumindest in einem Zwischenzeitraum) und einen hohen Importbedarf an synthetischen Brenn- und Kraftstoffen, die auf Basis erneuerbarer Energien hergestellt werden. Gleichzeitig wird der Import fossiler Energieträger (Kohle, Öl, Erdgas) zur energetischen Nutzung nahezu komplett zurückgehen. Eine erfolgreiche Gestaltung der Energiewende in Deutschland muss daher eng mit der Klima- und Energiepolitik der europäischen Mitgliedstaaten abgeglichen werden, um realistisch beurteilen zu können, in welchem Umfang Import- und Ausgleichsmöglichkeiten für Strom zur Verfügung stehen. Dieser internationale Abgleich ist insbesondere mit Blick auf die globale Entwicklung von Angebot und Nachfrage für erneuerbare Brenn- und Kraftstoffe wichtig. Dabei können die theoretisch weltweit verfügbaren Potenziale für synthetische Energieträger langfristig auch eine weitergehende Diversifizierung des Energiebezugs ermöglichen.

- Die Verfügbarkeit und Preisentwicklung von energiewenderelevanten Technologien wie neuer Umwandlungstechnologien, Energiespeichern oder alternativen Antriebstechnologien, aber auch der damit verbundenen THG-neutralen Endenergieträger, werden maßgeblich durch die weltweite Marktentwicklung bestimmt. Daher sollte die Umsetzung der integrierten Energiewende eingebettet in die globale Energiewende erfolgen – auch damit die deutsche Industrie in Bezug auf Zukunftstechnologien für die Energiewende profitieren kann.

- Zudem muss Deutschland auch in Zukunft als Wirtschaftsstandort für die (energieintensive) Industrie attraktiv bleiben. Bei allen Maßnahmen ist deshalb sicherzustellen, dass für energieintensive Unternehmen weiterhin die notwendigen Entlastungsregelungen beim EU-Emissionshandel und bei staatlich induzierten Energiekostenbestandteilen bestehen, um Nachteile im globalen Wettbewerb zu kompensieren. Dazu sollten beispielsweise internationale Vereinbarungen für bestimmte Branchen angestrebt werden, um die deutschen Unternehmen und Bürger zu entlasten.

Teilhabe der Bürgerinnen und Bürger an der Energiewende sichern.

- Die Erreichung der energie- und klimapolitischen Ziele bis 2050 hängt maßgeblich von der aktiven Einbindung der Bürgerinnen und Bürger ab. Sie dürfen sich nicht nur als Empfänger politischer Entscheidungen fühlen, sondern als aktive Teilhaber an der Umsetzung der Energiewende. Bei der Gestaltung der zukünftigen regulatorischen Rahmenbedingungen gilt es deshalb, die Akzeptanz der Bevölkerung, die sozialen Auswirkungen sowie die Möglichkeiten der Teilhabe angemessen zu berücksichtigen. Dazu gehört auch, dass die Energiewende die weitestmögliche Sicherung bestehender Arbeitsplätze im Blick hat und neue schafft, sowie die industrielle Basis in Deutschland erhält.

- Eine Vielzahl energiewenderelevanter Maßnahmen wird durch Bürgerinnen und Bürger umgesetzt, die somit eine der wichtigsten Investorengruppen der Energiewende sind. Dies zeigt sich insbesondere beim Ausbau der erneuerbaren Energien, der Sanierung von Gebäuden oder der Nutzung von nachhaltigen Mobilitätsoptionen. Damit die Einzelakteure weiterhin entsprechend ihren individuellen Anforderungen in Effizienz- und Energiewendetechnologien investieren können, ist der Erhalt von technologischer Wahlfreiheit notwendig.

- Es besteht derzeit in Deutschland ein breiter gesellschaftlicher Konsens über die Notwendigkeit des globalen Klimaschutzes und die Ziele der Energiewende. Trotzdem ist es seitens der Politik weiterhin unumgänglich, auf die Bedeutung einer erfolgreichen Energiewende für heutige und zukünftige Generationen hinzuweisen und den großen Einfluss auf das Leben der Menschen darzustellen. Dabei ist wichtig, mit Ausdauer und Geschlossenheit insbesondere den langfristigen individuellen und gesamtgesellschaftlichen Nutzen darzustellen und die damit verbundenen Chancen aufzuzeigen. Dadurch können der erforderliche Paradigmenwechsel unterstützt und die Menschen bei den bevorstehenden Transformationen mitgenommen werden.

4. Handlungsbedarfe in den einzelnen Sektoren

Energieerzeugung und -verteilung

In den oben genannten übergeordneten Handlungsfeldern wurde bereits die Bedeutung der bestehenden oder zu entwickelnden Infrastrukturen für einen technologieoffenen Ansatz und die szenarioübergreifende Relevanz synthetischer Brenn- und Kraftstoffe im integrierten Energiesystem 2050 für den Sektor Energie sowie für die Endenergieverbrauchssektoren dargestellt. Darüber hinaus ergeben sich folgende spezifische Handlungsbedarfe:

Ausbau erneuerbarer Energien beschleunigen.

- Die Erreichung der Klimaziele erfordert in allen im Rahmen der Leitstudie entwickelten Szenarios, insbesondere aber in den Elektrifizierungsszenarios, eine Vervielfachung der installierten Kapazitäten erneuerbarer Energien, allen voran PV und Onshore-Wind. Besonders die verfügbaren Flächen für Windkraftanlagen an Land werden fast vollständig genutzt werden müssen – eine Entlastung der Onshore-Windflächen durch einen signifikanten Ausbau der Offshore-Windenergie ist jedoch möglich.

- Um die notwendigen EE-Kapazitäten zu erreichen, muss das in den Jahren 2010 bis 2015 erzielte hohe Zubau-Niveau von durchschnittlich 8 GW/a netto bis zum Jahr 2050 nahezu konstant gehalten werden. Dies würde wiederum eine entsprechende Beschleunigung beim Netzausbau erfordern. Bei der Weiterentwicklung der regulatorischen Rahmenbedingungen (z. B. EEG) müssen daher Förder- und CO_2-Vermeidungsmechanismen aufeinander abgestimmt werden.

- Insbesondere bei Onshore-Wind wird die Akzeptanz der Bevölkerung eine zunehmend wichtige Frage werden, auf die die Politik Antworten finden muss. Die Zwischenergebnisse der Leitstudie prognostizieren Ausbaupfade, bei denen auch Flächen genutzt werden, die mit einer restriktiven „10 h“-Abstandsregel nicht zu erschließen sind.

Netzausbau als No-Regret-Maßnahme vorantreiben und intelligente Lösungen für einen optimierten Netzbetrieb forcieren.

- Die Erreichung der Klimaziele erfordert bis 2050 deutliche Mehrinvestitionen in die Stromnetze auf Übertragungs- und Verteilnetzebene im Vergleich zum Referenzszenario. Die vorliegenden Zwischenergebnisse prognostizieren kumulierte Netzausbaukosten im mittleren zweistelligen Milliardenbereich für das Übertragungsnetz und im unteren dreistelligen Milliardenbereich für das Verteilnetz. Hier entstehen v. a. durch die steigende Nutzung von Elektromobilität und Wärmepumpen Ausbaubedarfe, die teilweise eine Verdopplung der heutigen Leitungskapazitäten erfordern. Dies gilt insbesondere für Netzabschnitte, die bisher nicht durch den von Wind und PV getriebenen Netzausbau betroffen waren. Die aktuellen Ergebnisse zeigen, dass die bisher für den Zeithorizont 2030 bzw. 2035 identifizierten Ausbaumaßnahmen nur einen Zwischenschritt darstellen und bis zum Jahr 2050 ein erheblicher zusätzlicher Netzausbau notwendig ist. Damit droht sich das Akzeptanzproblem für den Netzausbau auf Höchst- und Hochspannungsebene weiter zu verschärfen, was die Erreichung der Energiewendeziele grundlegend gefährden könnte.

- Die bestehenden Ausbau-, Umbau- und Verstärkungsmaßnahmen müssen beschleunigt werden. Hierzu gehört das kontinuierliche Werben bei der Bevölkerung für die Notwendigkeit des Netzausbaus, wie auch die Beschleunigung von Genehmigungsverfahren. Insbesondere Umbau- und Verstärkungsmaßnahmen, die keinen Neubau erfordern, sollten schneller und nach bundeseinheitlichen Vorgaben genehmigt werden können. Auch sollten intelligente Lösungen zur besseren Netzauslastung und netzdienlichen Nutzung

von Flexibilitäten weiter vorangetrieben werden. Auf Ebene der Übertragungsnetze ist zu prüfen, wie durch einen höheren Automatisierungsgrad bei der Systemführung zusätzliche Potenziale in der Netzauslastung erschlossen werden können.

- Im Verteilnetz muss ebenfalls der Automatisierungsgrad bei der Netzführung erhöht werden, um Flexibilitätspotenziale zu erschließen und netzdienlich zu nutzen. Hierfür müssen die Verteilnetze (insbesondere die unteren Spannungsebenen) modernisiert werden. Insbesondere neue, flexible Verbraucher (Elektrofahrzeuge, Wärmepumpen) können intelligent und netzdienlich genutzt werden. Der sich durch die Digitalisierung ergebende Informationsgewinn hilft, örtliche Einspeisungen und flexible Verbraucher dynamisch zu optimieren. Voraussetzung ist ein geeigneter regulatorischer Rahmen. Eine Dynamisierung fester Kostenbestandteile (z. B. Netzentgelte) ist ebenso zu diskutieren, wie die Beseitigung der Benachteiligung von Lösungen mit hohen betrieblichen Kosten (OPEX) im Vergleich zu Lösungen mit hohen Investitionskosten (CAPEX) im Rahmen der Anreizregulierung.

Wirtschaftliche Rahmenbedingungen für die Verbreitung von PtX schaffen.

- In allen untersuchten Szenarios ist das Erreichen der Klimaschutzziele nur mit dem Einsatz synthetischer Brenn- und Kraftstoffe möglich. Deutschland muss daher international dafür werben, dass globale Märkte für Power to Gas (Synthetisches Erdgas und Wasserstoff) und Power-to-Liquid (Synthetische Kraftstoffe) entstehen.

- Eine frühzeitige Marktverbreitung von PtX-Technologien in Deutschland kann aus industriepolitischer Sicht vorteilhaft sein. Damit sich in diesem Bereich Innovationen entfalten und Märkte entwickeln können, müssen regulatorische Hürden abgebaut und wirtschaftlich günstige Rahmenbedingungen geschaffen werden. Dafür kann u. a. das Ermöglichen eines optimierten Multi-Use-Betriebs von PtX-Anlagen innerhalb Deutschlands mit Blick auf die verschiedenen Anwendungsfelder und die Nutzung der Flexibilitätspotenziale am Strommarkt, auch zur Entlastung von Netzengpässen, wichtige Voraussetzungen bieten. Multi-Use bezeichnet den zeitweise netzdienlichen Einsatz von primär marktorientiert (Strom-/Regelleistungsmarkt) betriebenen Kapazitäten.

Refinanzierungsschwierigkeiten bestehender Infrastrukturen durch einen ausgewogenen Technologiemix vermeiden.

- Auch in Szenarios mit starker Elektrifizierung werden weiterhin Gas- und Mineralölinfrastrukturen benötigt. Dabei würden in den EL-Szenarios einzelne Kundengruppen überproportional belastet, da weitgehend gleichbleibende Kosten für den Erhalt und Betrieb dieser für das Gesamtsystem notwendigen Infrastrukturen von einer zunehmend geringeren Anzahl von Gas- und Öl-Kunden getragen werden müssen. Gleichzeitig ist der Investitionsbedarf in die Strominfrastruktur bei Szenarios mit starker Elektrifizierung höher als bei einem ausgewogenen Technologiemix.

- Ein ausgewogener Technologiemix ermöglicht es, die vorhandenen und benötigten Infrastrukturen besser auszulasten und trägt somit zu einer volkswirtschaftlich optimierten Gesamtlösung bei.

Deckung des wachsenden Bedarfs an gesicherter Leistung finanziell und infrastrukturell sicherstellen.

- Der Bedarf an gesicherter Leistung wächst: Während der Leistungsbedarf in den TM-Szenarios um rund ein Drittel wächst, zeigen die EL-Szenarios nahezu eine Verdopplung der gesicherten Leistungskapazität.

- Unter der Annahme, dass Carbon Capture and Storage (CCS) aufgrund begrenzter CO_2-Speicherkapazitäten auch zukünftig keine universell in der Energieversorgung einsetzbare Option ist und unter der Annahme, dass Stromspeicher weiterhin verhältnismäßig teure Energiespeicher bleiben werden, werden sich Gaskraftwerke zur kostengünstigsten und damit dominierenden Technologie zur Bereitstellung der gesicherten Leistung entwickeln. Die gesicherte Leistung wird damit auch 2050 noch zu großen Teilen durch konventionelle Kraftwerke erbracht, die allerdings in den 95-Prozent-Szenarios größtenteils mit synthetischen, treibhausgasneutral erzeugten Brennstoffen betrieben werden. Durch die Speicherkapazität der deutschen Gasnetze und -speicher von über 200 TWh kann die gesicherte Leistung auch über lange Zeiträume autark bereitgestellt werden.

- Bis 2050 werden sich die Betriebsstunden der Kraftwerke mit gesicherter Leistung jedoch kontinuierlich reduzieren. Es stellt sich daher die Frage, inwieweit der wirtschaftliche Betrieb über den Strommarkt (Energy-only-Markt) zukünftig gewährleistet werden kann, beziehungsweise ob mittelfristig alternative Finanzierungskonzepte zur bestehenden Netz- und Kapazitätsreserve entwickelt werden müssen.

Konsistente Rahmenbedingungen für das Auslaufen der Kohleverstromung.

- Die Untersuchungen der dena-Leitstudie zeigen, dass mit den Vorgaben zum Erreichen der nationalen Klimaschutzziele durch die Preissignale des Strommarkts die Kohlestromerzeugung in Deutschland sukzessive ausläuft. Im Jahr 2050 werden Kohlekraftwerke sowohl in den EL- als auch den TM-Szenarios nicht mehr im Markt sein, im TM95 sogar schon 2040 nicht mehr.

- In den Szenarios existieren 2050 noch einzelne Kohlekraftwerke als Kapazitätsreserve, da es kostengünstiger ist, zur Vorhaltung von gesicherter Leistung vorhandene Kraftwerke zu nutzen, als neue Kraftwerke mit nur sehr geringen Einsatzzeiten zu bauen. Auf den CO_2-Ausstoß hat die Vorhaltung dieser Kraftwerke kaum Auswirkung, da die Kraftwerke wegen der dann sehr hohen CO_2-Preise nur in einzelnen Stunden eingesetzt werden.

- Ziel sollte es sein, einen geeigneten übergeordneten Rahmen zur Emissionsminderung zu schaffen, der die verschiedenen Sektoren umfasst und an den Europäischen Emissionshandel (ETS) anknüpft. Mit Blick auf die mit dem Auslaufen der Kohleverstromung verbundenen Strukturveränderungen in verschiedenen Regionen und den erforderlichen Investitionen der Energiewirtschaft in neue Gaskraftwerke gilt es, parallel einen zeitlichen Orientierungsrahmen durch die Politik zu benennen, um für alle Beteiligten Planungssicherheit zu gewähren und den Prozess besser begleiten zu können.

Gebäude

Technologieoffenheit erhalten, um eine kosteneffiziente Energiewende im Gebäudebereich zu ermöglichen.

- Die Energieträger im Gebäudebereich werden durch den Zubau erneuerbarer Kapazitäten eine sehr weitgehende Dekarbonisierung erfahren. Dies gilt insbesondere für die Versorgung mit Gas, Heizöl, Biomasse und Strom in den Szenarios EL95 und TM95. Ziel ist ein nahezu klimaneutraler Gebäudebestand in Deutschland bis 2050.

- Ein technologieoffener Ansatz erscheint unter den Annahmen der Studie volkswirtschaftlich günstiger als ein Elektrifizierungsszenario. Die volkswirtschaftlichen Netto-Mehrkosten sagen hierbei noch nichts über die tatsächliche Leistungsfähigkeit und die Wirtschaftlichkeit im Hinblick auf Gebäudeeigentümer und Mieter aus. Verteilungsfragen sowie die Wirtschaftlichkeit aus Sicht einzelner Akteure (insbesondere Gebäudeeigentümer und Mieter) wurden in der Leitstudie nicht beleuchtet.

- Eine differenzierte Betrachtung der Wärmeversorgung in Bezug auf Grund- und Spitzenlast ist sinnvoll. Technologieoffene Hybridsysteme und dezentrale Erzeugungs- und Speichersysteme werden eine zunehmend größere Rolle spielen, um unterschiedliche zunehmend erneuerbare Energieträger ins Wärmesystem zu integrieren. Dabei sind vor allem Fragen der Versorgungssicherheit und der Einfluss von besonderen Klima-/Wetterperioden (beispielsweise kalte, dunkle Flaute) zu berücksichtigen. Technologien für die erfolgreiche Umsetzung der Wärmewende sind heute bereits vorhanden und werden Teil eines zukunftsfähigen Anlagenparks sein. Außerdem gilt es, auf zukünftige Innovationen und Technologiefortschritte zu setzen.

Zentrale Bedeutung und Heterogenität des Gebäudesektors anerkennen und Investitionen anreizen.

- Zusätzliche Investitionen in Gebäudehülle und Technik sind in technologieoffenen Konzepten geringer als in rein elektrischen. So fallen die Investitionsmehrkosten gegenüber dem Referenzszenario in den TM-Szenarios deutlich niedriger aus als die der jeweiligen EL-Szenarios. Eine faire Verteilung dieser zusätzlichen Kosten spielt eine zentrale Rolle für die Akzeptanz der Energiewende im Gebäudesektor.

- Im Zusammenspiel des Gebäudesektors mit dem integrierten Energiesystem bietet die digitalisierte Steuerung neue Möglichkeiten, in größerem Umfang zur effizienten Nutzung technologieoffener Wärmeversorgungssysteme beizutragen. Weitere Flexibilisierungsoptionen entstehen durch die Langzeitspeicherfähigkeit von (treibhausgasfreien) Gas- und Wärmeversorgungsnetzen sowie flüssiger Energieträger. Um den Gesamtmarkt der Energiewende im Gebäudebereich zu stärken, bedarf es einer deutlichen Steigerung und Erweiterung der vorhandenen Fördermaßnahmen. Eine wichtige Rolle können dabei steuerliche Anreize spielen. Generell gilt es, bestehende Instrumente zu verbessern und diese um neue Instrumente zu ergänzen.

- Der Gebäudesektor ist in hohem Maße heterogen und kleinteilig hinsichtlich der Eigentümer und Nutzerstruktur, der Gebäudetypen und des energetischen Zustands, der beteiligten Akteure sowie der eingesetzten Technologien und Energieträger. Energetische Maßnahmen bedürfen daher einer differenzierten Betrachtung. Nur so kann die gleichermaßen energetisch und wirtschaftlich bestmögliche Lösung für die Objekte bzw. Quartiere sichergestellt werden. Zu berücksichtigen ist zudem die heterogene Eigentumsstruktur. Darüber hinaus ist die Quartiersebene zentraler Ansatzpunkt für die Energiepolitik im Gebäudesektor.

Heizwärmebedarf des Gebäudesektors senken.

- Die effektive Senkung des Heizwärmebedarfs gelingt nur mit einer deutlichen Verbesserung der Gebäudehülle und der höheren Effizienz in der Anlagentechnik, verbunden mit dem Einsatz erneuerbarer Energien, vor allem im Bereich der Bestandsgebäude. In den Szenarios wurden die jährlichen Sanierungsraten mit 1,4 (TM) bzw. rund 2 Prozent (EL) angesetzt. Dies entspricht bereits einer deutlichen Erhöhung der Sanierungsrate gegenüber dem heutigen Stand von rund 1 Prozent pro Jahr.

- Wichtig für die Reduzierung von Treibhausgasemissionen im Gebäudesektor und im Gesamtsystem ist ein integrierter Ansatz aus Gebäudehülle und Technik unter Einbeziehung erneuerbarer Energien, auch gebäudeintegrierter Energieerzeugung.

- Flankiert werden müssen diese Maßnahmen durch Information, Kommunikation und unterstützende Marktinstrumente, um für ausreichende Transparenz und Akzeptanz zu sorgen. Grundlage ist die Lösung des bestehenden Dilemmas hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Sozialverträglichkeit. Realistische Ziele berücksichtigen auch die langen Investitionszyklen bei Gebäuden von 20 bis 30 Jahren und die notwendigerweise deutlich darunter liegenden Amortisationszeiten.

Industrie

Innovationszyklen unterschiedlicher Branchen berücksichtigen.

- Mit derzeit verfügbaren Technologien und deren erwarteter Weiterentwicklung lässt sich das 80-Prozent-Ziel erreichen. Durch verbleibende Emissionen von ca. 80 Mio. t CO_2 wird in der Studienphase 1 das 95-Prozent-Ziel jedoch nicht erreicht. Gründe hierfür sind beispielsweise Emissionen bei einzelnen emissionsstarken Anwendungen und Prozessen etwa in der Eisen- und Stahlerzeugung, für die derzeit keine wirtschaftliche emissionsarme technologische Alternative bekannt ist. Es werden aktuell alternative Herstellungsverfahren erforscht. Ein Verfahren zur Herstellung von Stahl unter Einsatz von Wasserstoff könnte hier den Einsatz der Kohle ersetzen.

- Insbesondere bei Industrieprozessen dauern Innovationszyklen teilweise bis zu 30 Jahre (15 Jahre Entwicklung und 15 Jahre zur Marktverbreitung). Große industrielle Anlagen verfügen häufig über eine Lebensdauer von mehreren Jahrzehnten. Hier muss der Gesetzgeber für ausreichende Transparenz sorgen, um richtige Schwerpunkte setzen zu können und keine unrealistischen Ziele zu formulieren.

- Die Investitions- und Risikobereitschaft zur Entwicklung neuer Technologien muss verstärkt werden. Stabile Rahmenbedingungen können die Bereitschaft der Industrie, in neue Verfahren zu investieren ebenso erhöhen wie langfristig kalkulierbare, die Klimawirkung berücksichtigende Energiepreise.

Dynamik industrieller Energieeffizienz kontinuierlich fördern.

- Ohne steigende Energieeffizienz würde der Energieverbrauch im Industriesektor durch das erwartete Produktionswachstum von durchschnittlich 0,6 Prozent pro Jahr bis 2050 um 26 Prozent ansteigen. Trotz des prognostizierten Produktionswachstums wird der Endenergieverbrauch der Industrie nach Einschätzung der Branchenexperten aus dem Partnerkreis durch erwartete Energieeffizienzverbesserungen von jährlich 0,8 Prozent jedoch um durchschnittlich 0,2 Prozent pro Jahr sinken. Es bedarf einer gesteigerten Dynamik, um diese erwarteten Effizienzpotentiale zu heben und so das 80-Prozent-Ziel zu erreichen. Die Energieeffizienz entwickelt sich dabei in den einzelnen Branchen sehr unterschiedlich. Hinzu kommt, dass durch Prozessumstellungen von fossil auf elektrisch keine großen Effizienzsteigerungen mehr zu erwarten sind, da die meisten mechanischen Prozesse bereits strombasiert betrieben werden.

- Durch strengere Umweltauflagen kann der Energiebedarf einzelner Unternehmen auch ohne Produktionserhöhung zukünftig ansteigen. So können beispielsweise notwendige Filteranlagen den Energieverbrauch erhöhen. Auch müssen teilweise komplexe Einsatzmaterialien wie Batterien unter hohem Energieaufwand zur Wiederverwertung verarbeitet werden. Sinnvolle Anreize zur Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen sind daher unbedingt notwendig.

- Ziel muss es sein es, die Wettbewerbsfähigkeit zu stärken, den Ressourceneinsatz zu senken und die daraus entstehenden Umweltbelastungen zu verringern. Die effiziente Nutzung von technischwirtschaftlichen und natürlichen Ressourcen ist eine Schlüsselkompetenz für das Gelingen der integrierten Energiewende.

Kohlenstoffkreisläufe mit CCU zur Erzeugung C-basierter Rohstoffe entwickeln.

- In allen TM-Szenarios besteht ein signifikanter Bedarf an synthetischen Brennstoffen für den Industriesektor in Höhe von ca. 50 (TM80) bis 230 TWh (TM95). Der Einsatz kohlenstoffhaltiger synthetischer Brenn- und Kraftstoffe ist nur dann nahezu klimaneutral, wenn der benötigte Kohlenstoff zuvor der Atmosphäre entzogen wurde oder aus erneuerbaren (biogenen) Quellen stammt. Gleiches gilt für den Einsatz kohlenstoffbasierter Rohstoffe zur stofflichen Nutzung – da

auch hier mittel- bis langfristig eine Freisetzung beispielsweise durch Verrottung anzunehmen ist, sind diese Chemikalien und Materialien nur bei der Verwendung von „Kohlenstoff aus der Luft“ oder Biomasse nahezu klimaneutral.

- In der Industrie entstehen bei bestimmten chemischen Reaktionen direkte prozessbedingte CO_2-Emissionen, beispielsweise bei der Erzeugung von Eisen und Nichteisenmetallen, Zementklinker, Kalk, Glas, Calciumkarbid, Ammoniak und Soda. Die Nutzung und Weiterverwendung von CO_2-Emissionen aus diesen industriellen Prozessen dürfte deutlich kosteneffizienter sein, als CO_2 aus der Atmosphäre zu entziehen.

- Damit die entstehenden Kohlenstoffe nicht in die Atmosphäre entweichen, sondern weiter stofflich oder zur Erzeugung synthetischer Energieträger genutzt werden können, muss Carbon Capture and Utilization (CCU) weiterentwickelt und marktfähig gemacht werden. Das Entwickeln wirtschaftlicher Kohlenstoffkreisläufe mit CCU kann einen wichtigen Beitrag zur Erreichung der Klimaziele leisten.

Mobilität

Effizienz im Verkehr durch ambitionierte und konsistente Regulierung steigern.

- Energieeffizienz und Verkehrsnachfrage sind die wesentlichen Stellschrauben zur Reduzierung des Endenergiebedarfs und der Abhängigkeit von einzelnen Energieträgern. Der Endenergiebedarf geht in den untersuchten EL- und TM-Szenarios um mindestens 100 TWh im Vergleich zum Referenzszenario zurück.

- Bei weiter steigender Verkehrsnachfrage, insbesondere im Güterverkehr, ist eine deutliche Effizienzsteigerung des Verkehrs notwendig, um zukünftig potenzielle Nutzungskonkurrenzen von erneuerbaren Energien zu reduzieren und den Anteil der regionalen Energiebereitstellung zu erhöhen.

- Doch auch bei einer deutlichen Effizienzsteigerung der Antriebe, werden in Zukunft erhebliche Mengen flüssiger und gasförmiger Energieträger benötigt, um den Gesamtenergiebedarf des Mobilitätssektors zu decken.

Bedarf an erneuerbaren Energieträgern für lange Reichweiten und schwere Lasten auch durch Importe sicherstellen.

- Eine rein strombasierte Energieversorgung aller Verkehrsträger scheint den an der Leitstudie beteiligten Experten sehr unwahrscheinlich.

- Verkehrsmittel für lange Reichweiten und schwere Lasten müssen auch zukünftig Energieträger hoher Energiedichte einsetzen, allerdings müssen diese aus erneuerbaren Quellen stammen. Selbst bei EL80 wird für den inländischen Verkehr ein Bedarf von 94 TWh PtX in 2050 ermittelt (ohne den internationalen Flug- und Schiffsverkehr).

- Deutschland wird seinen Energiebedarf in der Mobilität nicht allein mit heimischen Energieträgern decken können, sondern weiterhin Energieimporte aus dem Ausland benötigen. Dies gilt insbesondere für den Bedarf an flüssigen und gasförmigen Energieträgern in den Bereichen Schifffahrt und Luftverkehr sowie im nicht vollständig über Strom zu versorgenden Straßenverkehr.

- Es gilt, bereits heute die technische und wirtschaftliche Entwicklung von strombasierten und gasförmigen Kraftstoffen (E-Fuels) anzustoßen und politische Rahmenbedingungen für regionale, aber auch neue Importmärkte zu schaffen. Dies bietet darüber hinaus auch Chancen für die deutsche Industrie und leistet einen wichtigen Beitrag für eine globale Umsetzung der THG-Reduzierung.

Den Marktanteil klimafreundlicher Antriebssysteme und Kraftstoffe deutlich erhöhen.

- Um die THG-Ziele zu erreichen, muss der Marktanteil von klimafreundlichen Antriebssystemen und Kraftstoffen signifikant gesteigert werden. Eine wichtige Rolle wird die zunehmende Elektrifizierung der Antriebe spielen. Jedoch nicht die alleinige. Erdgas und Biomethan können heute bereits für alle Verkehrsträger einen Beitrag zur Senkung von Emissionen leisten und Basis für eine weitere Treibhausgasreduzierung durch flüssige und gasförmige E-Fuels sein.

- Dies bedarf einer kosteneffizienten Nutzung der bestehenden Gas-, Strom- und Mineralölinfrastruktur sowie zusätzlicher Investitionen in Wasserstoff-, Lade-, Speicher- und Netzinfrastrukturen.

- Eine deutliche Erhöhung des Anteils elektrifizierter Fahrzeuge wird ohne entsprechende Rahmenbedingungen zu zusätzlichen Lastspitzen führen. Verbindliche Standards, die ein flächendeckendes, systemdienliches Laden der Fahrzeuge ermöglichen, sind die Voraussetzung, um die Belastung des Stromnetzes so gering wie möglich zu halten.

5. Übersicht der Szenarios

In der Modellierung der Phase 1 der dena-Leitstudie Integrierte Energiewende wurden die oben skizzierten Szenarios verwendet. Dabei schreibt das **Referenzszenario (RF)** die aktuellen Entwicklungen im Energiesektor basierend auf den bereits getroffenen politischen Entscheidungen fort. Das Referenzszenario hat keine verbindlichen Klimaschutzziele vorgegeben. Das **Elektrifizierungsszenario (EL)** ist geprägt von einer forcierten Elektrifizierung der Endenergieverbrauchssektoren, beispielsweise durch Verwendung von Wärmepumpen und Power-to-Heat-Anlagen im Gebäudesektor, strombasierte Industrieanlagen oder Elektrofahrzeuge. Das **Technologiemix-Szenario (TM)** ist charakterisiert durch eine integrierte und technologieoffene Dekarbonisierung der verschiedenen Endenergieverbrauchssektoren. Hierbei zeichnen sich insbesondere die Verbrauchssektoren durch einen Mix verschiedener Endenergieträger aus. Die vorhandene Infrastruktur wird bei allen Szenarios zum bestmöglichen Gesamtergebnis im Sinne effizienter Treibhausgasminderung, Wirtschaftlichkeit und Versorgungssicherheit genutzt. Ein Neubau von Anlagen und Infrastrukturen erfolgt nur in einem ökonomisch sinnvollen Maß.

In den beiden Szenarios EL und TM wurden sowohl die notwendigen Anforderungen für eine Zielerreichung von 80 Prozent (EL80 bzw. TM80) als auch von 95 Prozent Treibhausgasreduktion bis 2050 (EL95 bzw. TM95) untersucht.

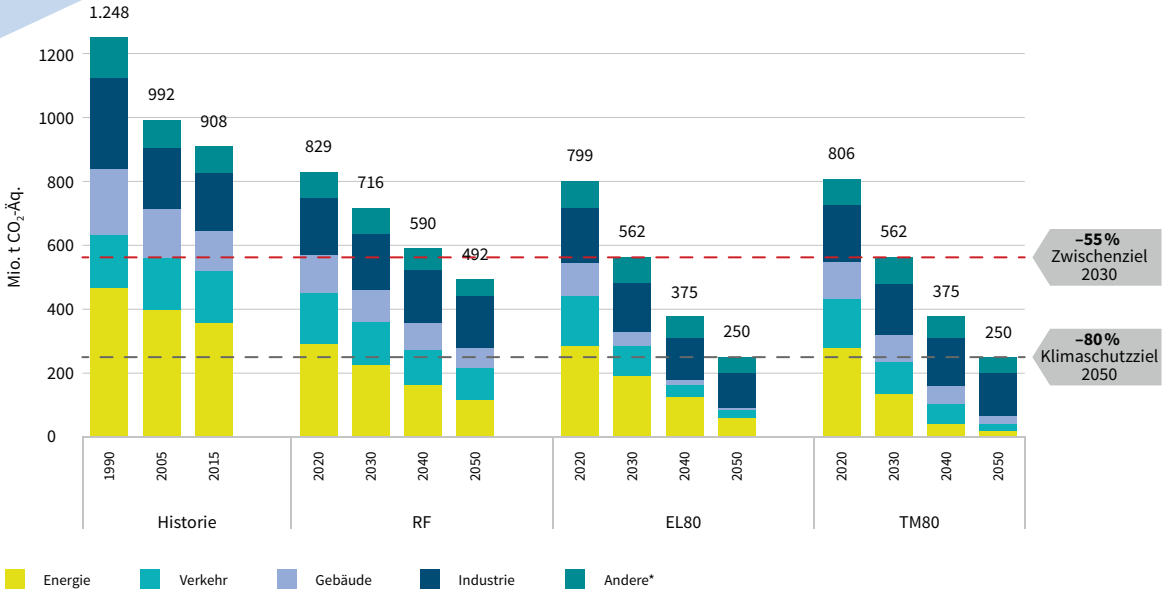
In der Auswertung der Zwischenergebnisse der Leitstudie in Phase 1 ist in Bezug auf die THG-Minderung im Jahr 2030 festzustellen, dass die sektoralen Minderungsbeiträge nicht mit den im Klimaschutzplan festgelegten sektoralen Zwischenzielen übereinstimmen. So zeigen die Modellierungsergebnisse in der Auswertung der sektorspezifischen THG-Minderungen im Zwischenjahr 2030 sowohl positive als auch negative Abweichungen im Vergleich zu den sektoralen 2030er-Zielen des Klimaschutzplans.

Szenarios zur Erreichung der 80-Prozent-Ziele bis 2050.

In den Szenarios EL80 und TM80 wird das vorgegebene THG-Minderungsziel von 80 Prozent in 2050 erreicht. Das bei einem 80-Prozent-Ziel verbleibende „CO_2-Budget“ von 20 Prozent wird dabei insbesondere durch Emissionen aus der Industrie sowie aus den in dieser Studie nicht modellierten Bereichen der Landwirtschaft und der Abfallwirtschaft ausgeschöpft. In den Sektoren Energie, Gebäude und Verkehr werden nur geringfügige THG-Mengen emittiert.

Im Einzelnen erreicht die Industrie einen Rückgang der THG-Emissionen gegenüber 2015 in Höhe von rund 40 Prozent bei EL80 bzw. 27 Prozent bei TM80 (insbesondere durch die verstärkte Elektrifizierung sowie die Nutzung von Gas statt Kohle und Öl). Der Verkehrssektor erzielt eine CO_2-Reduktion von 85 Prozent bzw. 87 Prozent gegenüber 2015 (durch effizientere Antriebe, verstärkte Elektrifizierung sowohl im Personen- als auch Lastverkehr sowie neue Technologien wie beispielsweise Wasserstoffahrzeuge). Der Gebäudesektor erreicht eine nahezu vollständige Vermeidung von CO_2-Emissionen (durch verbesserte Energieeffizienz bei Gebäudehülle und Anlagen sowie durch die Elektrifizierung und Nutzung von Umgebungswärme). Im Bereich der Energieerzeugung und -verteilung sinken die THG-Emissionen durch den verstärkten Ausbau der erneuerbaren Energien und den Umstieg von Kohle auf Gas.

THG-Emissionen im Szenariovergleich (Minderungsziel 80 Prozent bis 2050)



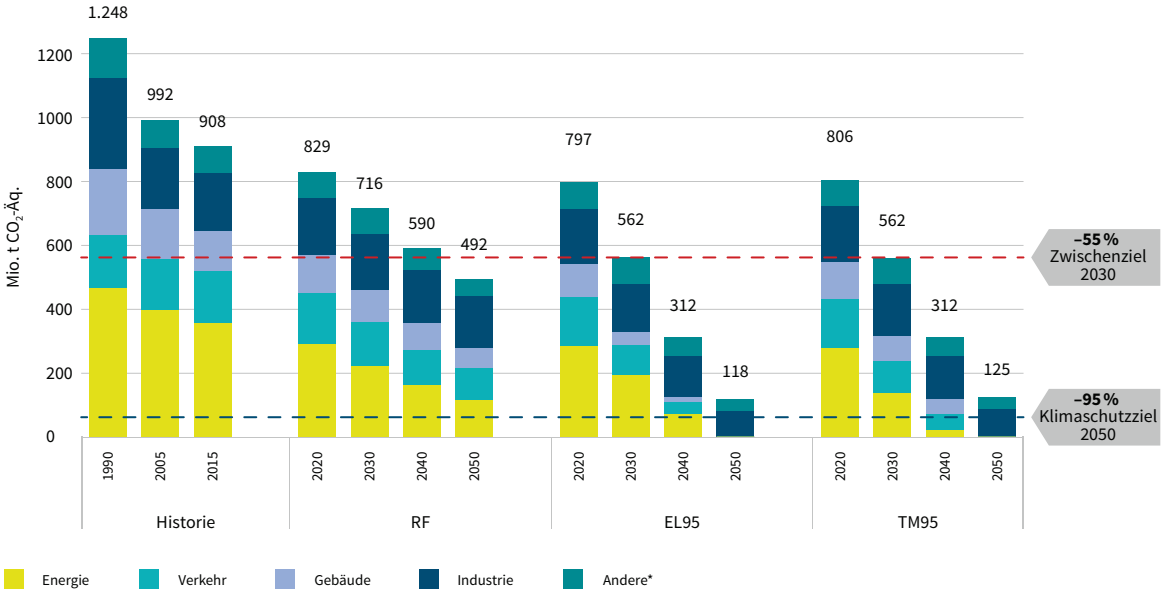
*Land- und Abfallwirtschaft; nicht in der Studie betrachtet.

Szenarios zur Erreichung der 95-Prozent-Ziele bis 2050.

In den Szenarios EL95 und TM95 wird der obere Rand des Zielkorridors mit den in der Studienphase 1 verwendeten exogen vorgegebenen Transformationspfaden noch nicht erreicht. Mit den in dieser Phase verwendeten Pfaden erzielt EL95 bis 2050 eine Treibhausgasreduktion von 91 Prozent, TM95 erreicht eine Minderung um 90 Prozent gegenüber 1990.

Das im Jahr 2050 für Deutschland verbleibende CO_2-Budget von etwa 62 Mio. t CO_2-Äquivalente (5 Prozent gegenüber 1990 inklusive Landwirtschaft) wird dabei schon allein durch die verbleibenden Emissionen im Industriesektor von 81 (EL95) bzw. 88 (TM95) Mio. t. CO_2-Äq. überschritten. Der Großteil (85 Prozent) dieser verbleibenden CO_2-Emissionen entfallen auf die Sektoren Eisen und Stahl, Chemie, Steine und Erden sowie Glas und Keramik. Während in der Stahlindustrie die Verbrennung von Kohle und Kohlekoks eine wesentliche Quelle von THG-Emissionen ist, sind in den anderen Branchen insbesondere Prozessemissionen bedeutsam. Allein die Emissionen der Industrieprozessen übersteigen mit 46 Mio. t CO_2-Äq. bereits das in 2050 für die Sektoren Energie, Gebäude, Industrie und Verkehr verbleibende CO_2-Budget von 25 Mio.t CO_2-Äq (ohne Landwirtschaft). Die Sektoren Energie, Gebäude und Verkehr müssen daher in den 95-Prozent-Szenarios nahezu klimaneutral werden, um möglichst nahe an das Gesamtziel von 95 Prozent THG-Reduktion heranzukommen.

THG-Emissionen im Szenariovergleich (Minderungsziel 95 Prozent bis 2050)

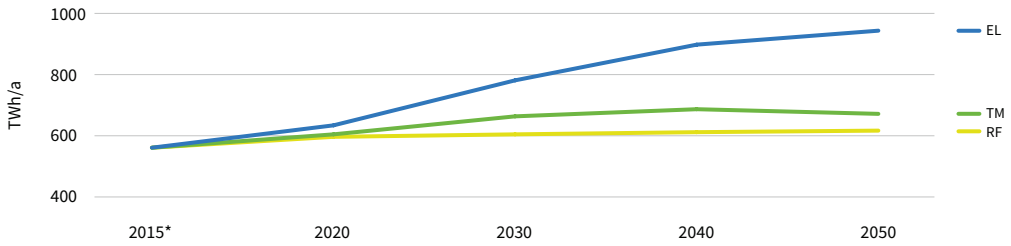


*Land- und Abfallwirtschaft; nicht in der Studie betrachtet.

Energiebereitstellung.

In allen modellierten Szenarios zeigen die Zwischenergebnisse der Modellierung nach Phase 1 eine Erhöhung der Stromnachfrage. Während der Anstieg des Strombedarfs bis 2050 gegenüber RF (605 TWh) bei den TM-Szenarios vergleichsweise moderat ist (um 52 auf 657 TWh bei TM80 bzw. um 68 auf 673 TWh bei TM95), ist die Steigerung der Stromnachfrage bei den EL-Szenarios erheblich (um 318 auf 923 TWh bei EL80 bzw. um 313 auf 918 TWh bei EL95). Dieser starke Anstieg ist insbesondere dadurch geprägt, dass in den EL-Szenarios auch Industrieprozesse elektrifiziert werden, bei denen die Gesamteffizienz des Prozesses durch die Stromnutzung deutlich sinkt (beispielsweise in der Ammoniakherstellung).

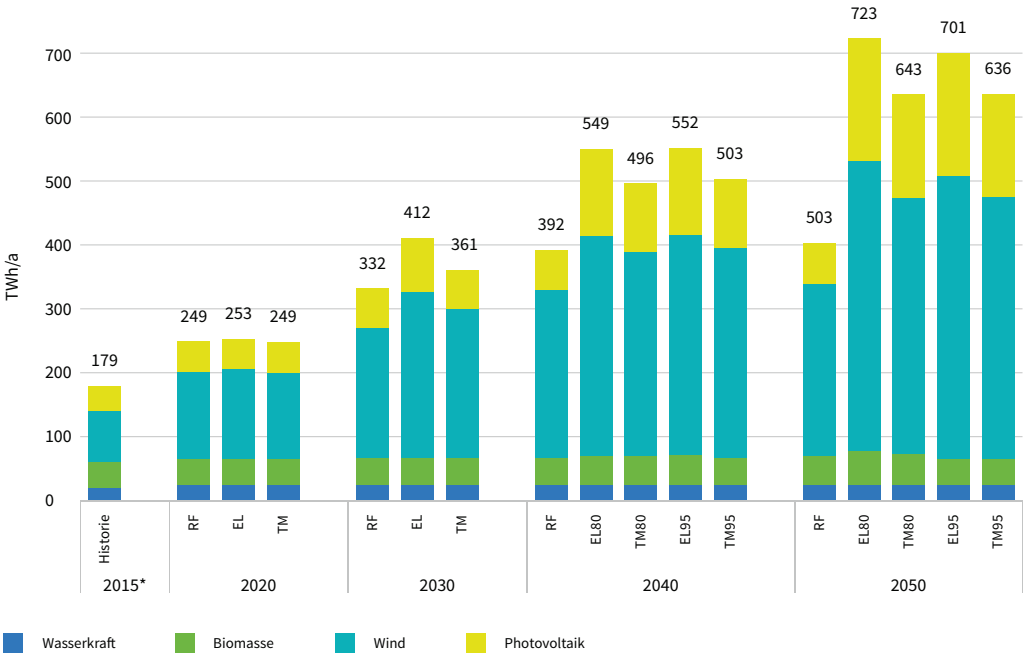
Entwicklung der Stromnachfrage im Szenariovergleich



Die Modellierung zeigt deutlich, dass in allen Szenarios ein erheblicher Ausbau der erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung erforderlich ist. Bis 2050 muss sich die EE-Stromerzeugung mindestens verdoppeln, in den Szenarios mit THG-Minderungsziel verdoppelt sich die EE-Erzeugung sogar bereits bis 2030. Bis 2050 kommt es in diesen Bereichen zu einer Verdrei- bis Vervierfachung. Um diese ambitionierten EE-Ziele zu erreichen, muss das in den Jahren 2010 bis 2015 erzielte hohe EE-Zubauniveau bis 2050 nahezu konstant gehalten werden.

Durch den zur Erreichung der Klimaschutzziele notwendigen starken Zubau erneuerbarer Energien wird das EEG-Ziel von mindestens 80 Prozent Anteil der EE-Erzeugung an der Stromnachfrage bis 2050 in allen Szenarios mit THG-Minderungsziel erreicht, das Referenzszenario verfehlt dieses Ziel mit nur 66 Prozent im Jahr 2050 hingegen deutlich.

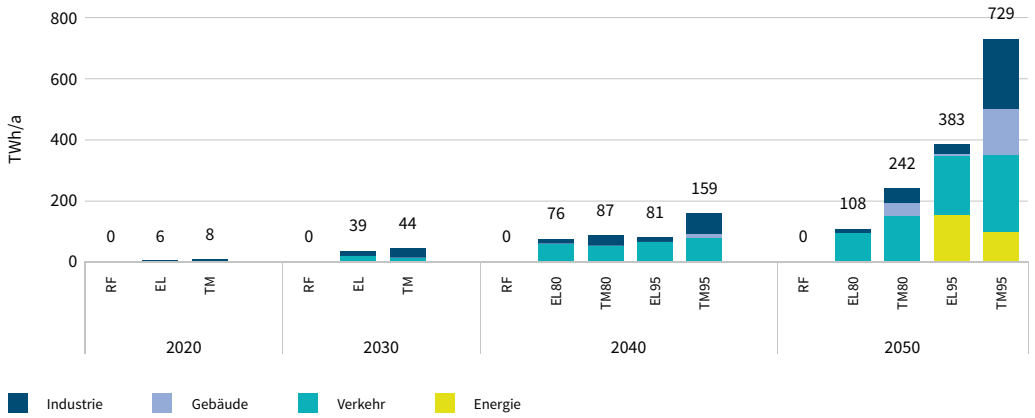
EE-Erzeugung im Szenariovergleich



Abhängig von den gesetzten Klimaschutzzielen (80 bzw. 95 Prozent) werden in den im Rahmen der dena-Leitstudie modellierten Szenarios sowohl bei EL als auch bei TM ab 2040 synthetische Brennstoffe zur Erreichung der Ziele eingesetzt. In den EL-Szenarios werden insbesondere im Verkehrs- und Energiesektor synthetische Brennstoffe verwendet, da die Anwendungstechnologien in Gebäuden und in der Industrie elektrifiziert wurden.

Hingegen werden in den TM-Szenarios auch in den Sektoren Gebäude und Industrie synthetische Brennstoffe eingesetzt. In den stark auf Klimaschutz ausgerichteten Szenarios EL95 und TM95 kommt es 2050 auch zur Rückverstromung von synthetischem Gas zur Sicherstellung der notwendigen gesicherten Leistung.

Synthetische Brenn- und Kraftstoffe nach Sektoren



Impressum

Herausgeber:
Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena)
Chausseestraße 128 a
10115 Berlin
Tel.: +49 (0)30 66 777-0
Fax: +49 (0)30 66 777-699
www.dena.de

Bildnachweis:
Titelbilder: shutterstock,
getty images / Thinkstock,
Getty Images, iStockphoto/dan_prat,
dena

Konzeption & Gestaltung:
Heimrich & Hannot GmbH

Stand: 10/2017 (1.0.1)

www.dena.de

dena
Deutsche Energie-Agentur