Energetische Zukunfts-perspektiven 2050

Wichtigste Ergebnisse

Oktober 2021

ZUSAMMENFASSUNG

Energetische Zukunfts-perspektiven 2050

Wichtigste Ergebnisse

Oktober 2021

ZUSAMMENFASSUNG

„ENERGETISCHE ZUKUNFTSPERSPEKTIVEN 2050”:
GRÜNDE, ZEITRAUM, VORGEHEN

Im Rahmen seiner gesetzlichen Aufgaben (Bedarfsanalyse) und im Auftrag der französischen Regierung führt der französische Übertragungsnetzbetreiber RTE seit 2019 eine breit angelegte Studie zur Entwicklung des Stromsystems durch. Ihr Titel: „Energetische Zukunftsperspektiven 2050”.

Die Studie fällt in eine entscheidende Phase der öffentlichen Energie- und Klimadebatte, in der über die erforderlichen Strategien zum Ausstieg aus der Nutzung fossilen Energien und zum Erreichen der Klimaneutralität bis 2050 und damit auch der Ziele des Pariser Abkommens entschieden wird. Voraussetzungen dafür sind eine weitreichende Neuausrichtung der Wirtschaft sowie einschneidende Veränderungen in den Bereichen Verkehr, Industrie und Bau, die heute noch stark von Öl, Gas aus fossilen Quellen und teilweise sogar von der Kohle abhängen.

Aus wissenschaftlicher Sicht gibt es heute keine Zweifel mehr daran, dass dringender Handlungsbedarf besteht. So hat der im August 2021 veröffentlichte jüngste IPCC-Bericht einmal mehr verdeutlicht, wie wichtig es ist, die Treibhausgasemissionen sehr schnell zu reduzieren, um die möglichen katastrophalen Auswirkungen des Klimawandels zu begrenzen. Dem musste auch die letzte COP im November 2021 in Glasgow Rechnung tragen und neue quantifizierte Verpflichtungen für das kommende Jahrzehnt formulieren[1].

Der für den Ausstieg aus den fossilen Energieträgern notwendige Wandel muss innerhalb von nur drei Jahrzehnten erfolgen und bereits vor 2030 stark beschleunigt werden.

Angesichts des geringen Anteils Frankreichs an den weltweiten Emissionen (rund 1%) könnten die Bemühungen, die das Land zur Einhaltung seiner Klimaverpflichtungen auf sich nehmen muss, als sinnlos oder unbedeutend erscheinen. Die französischen Pro-Kopf-Emissionen liegen jedoch nach wie vor über dem weltweiten Durchschnitt insbesondere, wenn die importbedingte CO_2-Belastung (der „CO_2-Fußabdruck”) einbezogen wird. Zudem besteht die Chance, dass die zum Erreichen der Ziele eingesetzten technologischen und industriellen Lösungen sowohl Frankreich als auch Europa zu wesentlichen Wettbewerbsvorteilen im weltweiten Kontext verhelfen können.

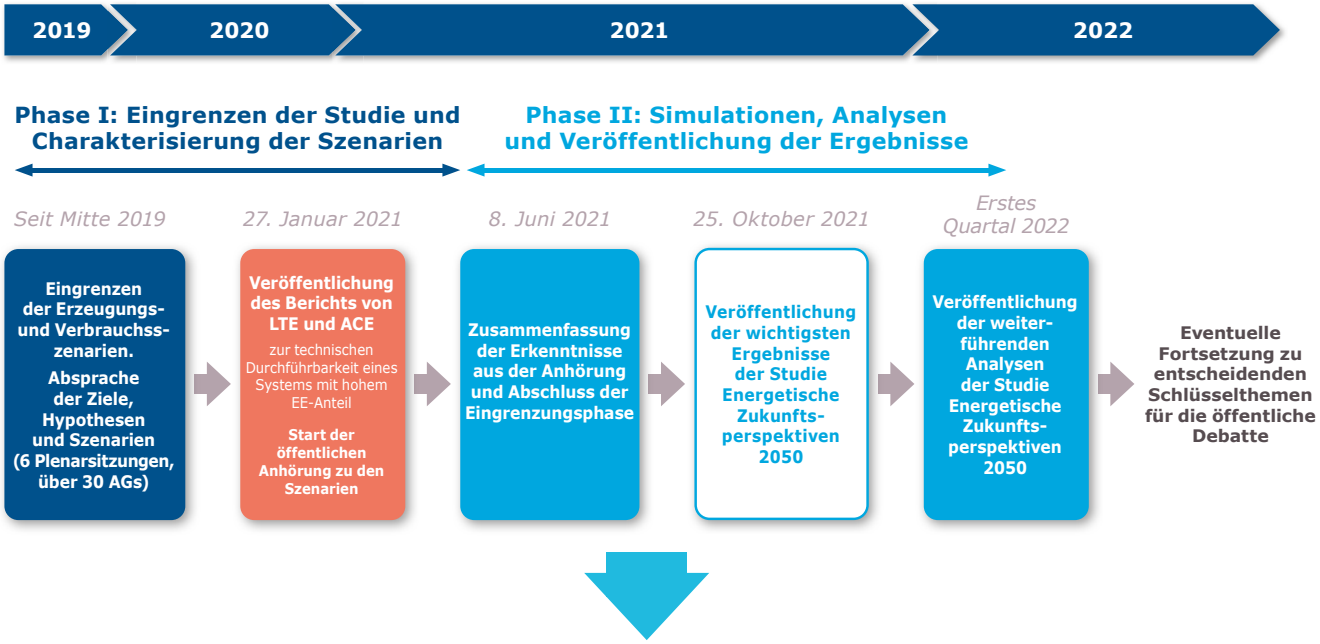
Die Energiekrise von Ende 2021 hat gezeigt, dass der Ausstieg aus den fossilen Energieträgern nicht nur in klimatischer Hinsicht zwingend erforderlich ist. Es hat sich auch gezeigt, wie hoch der Preis für die starke Abhängigkeit Europas vom Import fossiler Brennstoffe aus den Förderländern sein kann und dass die Verfügbarkeit von klimaneutralen Erzeugungskapazitäten im eigenen Land auch eine Frage der Unabhängigkeit darstellt.

Um diese zu erreichen, bieten sich verschiedene Möglichkeiten, die teilweise auf einer gemeinsamen Basis stehen, wie die Reduzierung des Energieverbrauchs, die Erhöhung des Stromanteils und den Rückgriff auf erneuerbare Energien. Werden jedoch das Tempo der Entwicklung des Verbrauchs und dessen Aufteilung nach Verwendungszwecken, die Entwicklung der Industrie, die Zukunft der Kernenergie, die Rolle des Wasserstoffs und ähnliche Faktoren betrachtet, so treten deutliche Unterschiede hervor. Die von RTE aufgestellten „Energetischen Zukunftsperspektiven 2050” gehen auf die verschiedenen Optionen ein, indem sie die Entwicklungen des Systems unter technischen Gesichtspunkten beschreiben, die damit verbundenen Kosten beziffern und die Umweltauswirkungen im weitesten Sinne sowie die Auswirkungen auf unsere Lebensgewohnheiten erläutern.

Die Studie besteht in erster Linie aus einer breit angelegten technischen Untersuchung, die anhand einer umfangreichen Simulations- und Berechnungsarbeit eine detaillierte Beschreibung der vielfältigen Stromsysteme ermöglicht, mit denen die Klimaneutralität bis 2050 erreicht werden kann.

1 . Anm. der Übersetzung: Die COP fand im November 2021 statt, also nach der Veröffentlichung der vorliegenden Studie.

Dabei wird ein ganz neuer Konzertierungsansatz verfolgt: Im Rahmen einer offenen und transparenten Methode, bei der alle betroffenen Parteien sich äußern und angehört werden können, werden die Szenarien ausgearbeitet und der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Sämtliche Parameter der Studie werden in Arbeitsgruppen und im Rahmen eines Konzertierungsplenums diskutiert, nachvollzogen und debattiert. Der Zeitplan der Studie wurde so angelegt, dass auf Anmerkungen eingegangen und der Ansatz durch Einbeziehung zahlreicher ursprünglich nicht eingeplanter Szenarien und Varianten erweitert werden kann. Experten von rund 100 verschiedenen Organisationen (Unternehmen aus dem Energiesektor, NGOs, Verbände und Vereine, Think



1 Technisch

- Vollständige Beschreibung des Systems (Erzeugung – Netz – Verbrauch) in Bezug auf die Energieträger und Leistung für 2030, 40, 50, 60
- Prognosen mit den Szenarien RCP 4.5 und 8.5 des IPCC und Resilienzanalyse mit Klima-Stresstests (Hitzewelle – Dürre – extreme Kälte – Windstille in Kontinentaleuropa)

2 Wirtschaftlich

- Vollständige Kosten für die Gesellschaft
- Sensitivitätsanalysen zu verschiedenen Parametern
- Sensitivitätsanalysen zu verschiedenen Parametern und insbesondere den Kapitalkosten
- Spezieller Abschnitt zur Fähigkeit jedes Szenarios, Rückverlagerungs- bzw. Industrialisierungsperspektiven einzubeziehen

3 Ökologisch

- CO_2-Fußabdruck über den gesamten Entwicklungspfad hinweg unter Einbeziehung des Lebenszyklus der Materialien
- „Materialbilanz" für jedes Szenario (in Verbindung mit Kritikalitätsaspekten)
- Flächenanspruch (Netze + Erzeugung)
- Umfang von Abfall- und Schadstoffen

4 Gesellschaftlich

- Problematisierung der Auswirkungen auf die Lebensgewohnheiten und Voraussetzungen für die Gültigkeit der Szenarien (Telearbeit vs. Mobilität, Stromverbrauch, angestrebtes vs. erforderliches Suffizienzniveau, Flexibilitätsniveau der Nutzungen)

In den Energetischen Zukunftsperspektiven 2050 wird keine Bewertung vorgenommen, inwiefern diese Dimensionen wünschenswert sind.

Tanks und Institute, Regulierungsstellen, Behörden usw.) nahmen an den insgesamt 40 Versammlungen teil. Ergänzt wurde das Konzertierungsinstrument durch einen wissenschaftlichen Rat, der den gesamten Prozess seit Frühjahr 2021 begleitet.

Phase I der Studie, in der die Ziele, Methoden und Arbeitshypothesen festgelegt wurden, wurde im ersten Quartal 2021 abgeschlossen. Sie war Gegenstand einer breit angelegten öffentlichen Anhörung und führte zu Antworten weit über den Kreis der üblichen „Experten und Stakeholder" hinaus: Fast 4 000 Organisationen und Privatpersonen beteiligten sich mit sehr detaillierten spezifischen Beiträgen, offenen Briefen, Unterschriftensammlungen und Social-Media-Kampagnen. Eine Kurzfassung dieser Phase wurde am 8. Juni 2021 in einem vorläufigen Bericht veröffentlicht.

Phase II der Untersuchung wird sich bis zum Erscheinen der vollständigen Studie Anfang 2022 erstrecken. Entsprechend der Verpflichtung von RTE wurden ihre wichtigsten Ergebnisse am 25. Oktober 2021 publiziert, um damit die in die öffentliche Debatte einfließen zu können.

ERKENNTNISSE DER ENERGETISCHEN ZUKUNFTSPERSPEKTIVEN 2050

Allgemeine Problemstellung: der Ausstieg aus den fossilen Energieträgern

VERBRAUCH

1 Das Erreichen der Klimaziele setzt voraus, den Verbrauch über die Energieeffizienz oder die energetische Suffizienz zu beeinflussen.

2 Der Energieverbrauch wird zurückgehen, aber der Stromverbrauch wird ansteigen, um die fossilen Energieträger zu ersetzen.

3 Die beschleunigte Reindustrialisierung durch Elektrifizierung der Prozesse erhöht den Stromverbrauch, mindert jedoch den CO_2-Fußabdruck Frankreichs.

EIN NEUER MIX

4 Ohne einen deutlichen Ausbau der erneuerbaren Energien kann die Klimaneutralität bis 2050 nicht erreicht werden.

5 Ein System ohne neue Kernreaktoren setzt einen schnelleren Ausbau der erneuerbaren Energien voraus als in europäischen Ländern mit der höchsten Ausbaudynamik.

WIRTSCHAFT

6 Der Bau neuer Kernreaktoren ist wirtschaftlich sinnvoll. Dies gilt umso mehr, wenn dadurch bis 2050 eine Kapazität von rund 40 GW erzielt wird (bestehende und neue Kernkraftanlagen).

7 Die Stromerzeugung durch erneuerbare Energien hat wettbewerbsfähige Lösungen entwickelt. Besonders deutlich zeiget sich dies bei großen Solarparks sowie Onshore- und Offshorewindparks.

8 Die vom System zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit benötigten Steuerungsmittel sind je nach Szenario sehr unterschiedlich. In wirtschaftlicher Hinsicht kommt es darauf an, den Verbrauch stärker zu steuern, Interkonnektoren und Wasserkraftspeicher auszubauen und die Solarenergie mithilfe von Batterien zu unterstützen. Der Bedarf an neuen und auf klimaneutrale Gasvorräte (wie Wasserstoff) aufbauenden Wärmekraftwerken ist hoch, wenn die Kernenergie nur in geringem Maße neu belebt wird, jedoch massiv – und damit teuer – wenn 100 % erneuerbare Energien angestrebt werden.

9 Alle Szenarien erfordern eine schnelle Neudimensionierung der Stromnetze, um die Energiewende zu ermöglichen.

SYSTEM UND TECHNOLOGIEN

10 Die Bereitstellung eines leistungsstarken „klimaneutralen Wasserstoffs" erweist sich als äußerst vorteilhaft für die Dekarbonisierung bestimmter Sektoren, die sich schwer elektrifizieren lassen. In Szenarien mit einem sehr starken Ausbau der erneuerbaren Energien ist er zur Energiespeicherung unverzichtbar.

11 Bei den Szenarien mit einem sehr hohen Anteil an erneuerbaren Energien oder dem Szenario, das eine Verlängerung der Laufzeit der bestehenden Kernreaktoren über 60 Jahre hinaus vorsieht, stellt das Erreichen der Klimaneutralität bis 2050 äußerst hohe technische Ansprüche.

12 Bereits jetzt muss der Umbau des Stromsystems die wahrscheinlichen Folgen des Klimawandels berücksichtigen, etwa in Bezug auf Wasserressourcen, Hitzewellen oder Windverhältnisse.

FLÄCHEN UND UMWELT

13 Der Ausbau der erneuerbaren Energien wirft auch Fragen der Flächennutzung und Nutzungseinschränkung auf. Seine Intensivierung kann ohne übermäßig starke Denaturierung erfolgen, dabei muss jedoch im jeweiligen Gebiet für den Erhalt der Lebensräume gesorgt werden.

14 Der in Frankreich verbrauchte Strom bleibt selbst dann weitgehend klimaneutral, wenn die vollständige CO_2-Bilanz der Infrastrukturen über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg eingerechnet wird. Ersetzt der Strom die fossilen Energieträger, so leistet er einen hohen Beitrag zum Erreichen der Klimaneutralität.

15 In wirtschaftlicher Hinsicht kann die Energiewende zu Spannungen bei der Beschaffung von mineralischen Ressourcen führen, insbesondere bei bestimmten Metallen. Hier ist vorausschauendes Handeln gefragt.

ALLGEMEIN

16 Bis 2050: Ein klimaneutrales Stromsystem kann in Frankreich zu kontrollierbaren Kosten erreicht werden.

17 Bis 2030: Die Chance, das Ziel des neuen EU-Pakets „-55% netto" zu erreichen, erhöht sich, wenn der Ausbau der erneuerbaren Energien schnellstmöglich vorangetrieben und die Laufzeit der bestehenden Kernreaktoren mit dem Ziel verlängert wird, die klimaneutrale Stromerzeugung zu maximieren.

18 Unabhängig von der Wahl des einen oder anderen Szenarios: Es besteht dringender Handlungsbedarf.

ALLGEMEINE PROBLEMSTELLUNG: DER AUSSTIEG AUS DEN FOSSILEN ENERGIETRÄGERN

Das Erreichen der Klimaneutralität setzt eine Neuorientierung der Wirtschaft und der Lebensweise sowie eine Umstrukturierung des Systems voraus, damit in Frankreich der Strom die fossilen Energieträger als Hauptenergieträger ersetzen kann.

1 Wenn wir die französischen Klimaschutzverpflichtungen einhalten wollen, so müssen wir den Ausstieg aus der Energieerzeugung aus fossilen Quellen schaffen, die heute die Grundlage unserer Wirtschaft und unserer Lebensgewohnheiten bilden.

Rund 60 % der in Frankreich genutzten Energie stammt aus fossilen Quellen. Dabei handelt es sich vor allem um Erdölprodukte (ca. 40 %) sowie Erdgas (ca. 20 %) und Kohle (unter 1 %).

Diese Energie ist von Importen aus den Förderländern abhängig (Rohöl aus Saudi-Arabien, Kasachstan, Russland, Nigeria und Algerien, Gas aus Norwegen, Russland, den Niederlanden und Nigeria). Die aufeinanderfolgenden Energiekrisen haben gezeigt, wie stark Frankreich dadurch den Schwankungen der Weltmarktpreise für Energieprodukte ausgesetzt ist, die von einer komplexen geopolitischen Dynamik sowie vom Zustand der Weltwirtschaft abhängen.

Aber gerade dieses, auf fossilen Energieträgern basierende System, bildete das Fundament des enormen französischen Wirtschaftswachstums in den dreißig Jahren nach dem Zweiten Weltkrieg (die sogenannten Trente Glorieuses). Trotz der verschiedenen Ölkrisen verfügte Frankreich so über eine billige Energie, die noch reichlich vorhanden und leicht zu speichern war. Heute wird jährlich ein Endenergieverbrauch von über 930 TWh mit fossilen Brennstoffen gedeckt, 430 TWh mit Strom.

Im Gegensatz zu seinen meisten Nachbarländern ist Frankreich mit seinem Stromsystem nicht auf fossile Energieträger angewiesen, da dieses vor allem durch die 56 bestehenden Kernreaktoren geprägt ist. Die meisten von ihnen wurden innerhalb einer sehr kurzen Zeitspanne zwischen Ende der 1970er und Anfang der 1990er-Jahre gebaut und als Ergänzung zu einer bereits beträchtlichen Wasserkraftkapazität (60 TWh) in Betrieb genommen. Das französische Kernenergieprogramm entsprach dem Bedürfnis nach Energieautonomie, das damals infolge der Ölkrisen aufgekommen war. Heute verleiht es Frankreich unbestreitbar einen großen Vorteil im Kampf gegen den Klimawandel, da es große Mengen weitgehend klimaneutralen Strom erzeugt.

Wie in allen westlichen Demokratien ist die Entscheidung für die zivile Nutzung der Kernenergie auch in Frankreich Thema der gesellschaftlichen Debatte. In den vergangenen Jahren hat sich diese Diskussion um den Begriff des „Anteils" der Kernenergie am Strommix kristallisiert. Dies konnte einen Teil der Bevölkerung zu der Annahme verleiten, dass es dabei um den Anteil der Kernenergie am französischen Gesamtenergieverbrauch gehe. **Dabei liefert die Kernenergie zwar 70 % des in Frankreich erzeugten Stroms, aber weniger als 20 % der von den Franzosen *verbrauchten Endenergie.*** Somit darf die vorherrschende Rolle der Kernenergie bei der Stromerzeugung nicht darüber hinwegtäuschen, dass Frankreich zur Deckung seines Energiebedarfs auf fossile und importierte Energieträger angewiesen ist. Das Erreichen der Klimaneutralität setzt einen fast vollständigen Verzicht auf diese fossilen Energieträger voraus.

2 Die französische Zukunftsstrategie: eine auf Energieeffizienz, klimaneutralen Strom und verstärkte Biomassenutzung aufbauende klimaneutrale und souveräne Energieversorgung.

Die alle fünf Jahre neu bewertete französische Dekarbonisierungsstrategie *(Stratégie nationale bas-carbone,* SNBC) bildet die strategische Grundlage für das Erreichen der Klimaneutralität. Ihre letzte Fassung wurde 2020 verabschiedet und dient RTE als Orientierungsrahmen bei seinen „Energetischen Zukunftsperspektiven 2050". Diese untersuchen zahlreiche Varianten, denen die Vorgabe einer Klimaneutralität bis 2050 gemeinsam ist.

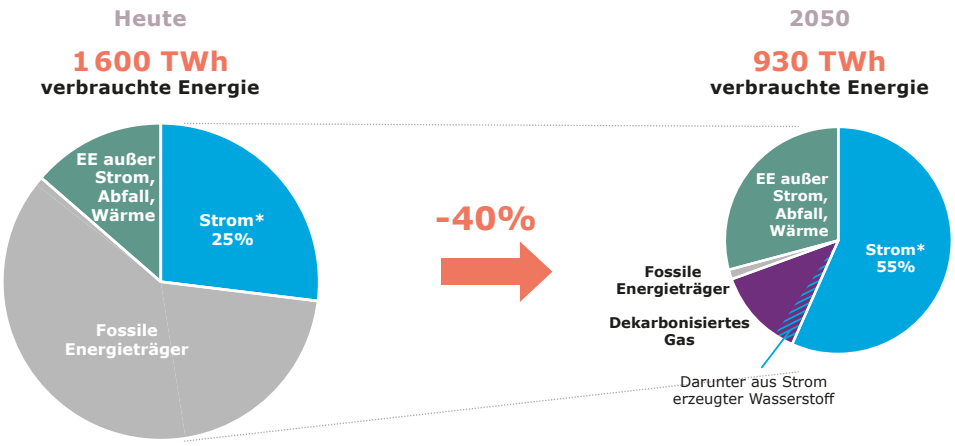
Die Studie ermöglicht es somit, die Umsetzung der Prinzipien der SNBC zu testen, ihre Auswirkungen zu messen und die Überarbeitung der französischen Energie- und Klimastrategie *(Stratégie française pour l'énergie et le climat)* vorzubereiten, die 2023 im Rahmen eines Programmgesetzes erfolgen soll.

Auf Nachfrageseite setzt die SNBC in erster Linie auf Energieeffizienz und sieht vor, den Endenergieverbrauch Frankreichs innerhalb von 30 Jahren um 40% zu senken – ein im Vergleich zu den Strategien seiner Nachbarländer sehr hochgreifendes Ziel. Damit würde Frankreich seinen Energieverbrauch auf das Niveau der späten 1960er-Jahre zurückfahren.

Auf Angebotsseite stützt sich die SNBC auf zwei Säulen: klimaneutralen Strom und in Frankreich erzeugte Biomasse. Im Gegensatz zur Planung europäischer Länder werden Massenimporte von „grünem Gas", nicht nachhaltiger Biomasse und klimaneutralen Brennstoffen somit ausgeschlossen. Frankreich hat sich also 2020 für ein klimaneutrales und souveränes System entschieden. Dies ist mit erheblichen Auswirkungen verbunden.

Die SNBC setzt einerseits eine sehr weitreichende Aktivierung von Biomasse voraus, also der Energie, der in der französischen Strategie das stärkste Wachstum vorausgesagt wird. Andererseits geht sie von einem steigenden Stromverbrauch aus, der allerdings generell geringer eingeschätzt wird als von Frankreichs Nachbarländern Deutschland, Großbritannien oder Italien. Diese Vergleichswerte müssen in den „Energetischen Zukunftsperspektive 2050" berücksichtigt werden, zumal in den jüngsten Szenarien zur Klimaneutralität übereinstimmend davon ausgegangen wird, dass eine stärkere Elektrifizierung erreicht werden muss als noch vor wenigen Jahren angenommen. Die „Energetischen Zukunftsperspektiven 2050" behalten die Vorgaben der SNBC bei und heben sie im Bereich Stromverbrauch leicht an.

Abbildung 2 Endenergieverbrauch in Frankreich und in der SNBC



* Endenergieverbrauch (ohne Verluste, ohne Verbrauch durch den Energiesektor und ohne Verbrauch zur Wasserstofferzeugung)
Verbrauch innerhalb Frankreichs im Referenzpfad von RTE = 645 TWh

3 Undenkbar in der französischen Debatte: die Stilllegung der Kernkraftwerke der zweiten Generation in den nächsten Jahrzehnten

In seiner Bemühung, bis 2050 einen Jahresstromverbrauch von 645 TWh decken zu können, hält Frankreich einen Trumpf in der Hand: Seine klimaneutrale Stromerzeugung liegt bereits heute bei rund 500 TWh. Die zu erklimmende „Stufe" ist daher viel niedriger als in anderen Ländern (Deutschland erzeugt derzeit rund 300 TWh klimaneutralen Strom, Großbritannien knapp 200 TWh und Italien knapp 100 TWh. Alle diese europäischen Länder gehen davon aus, dass ihr Stromverbrauch in 30 Jahren bei 600-800 TWh liegen wird).

Aber die Feststellung dieses Istzustands reicht nicht aus, um das Ausmaß der Herausforderung zu erfassen, vor der Frankreich steht: Das Durchschnittsalter seiner bestehenden Atomkraftwerke beträgt 36 Jahre und das Alter der Ende der 1970er und Anfang der 1980er-Jahre gebauten Reaktoren nähert sich den 40 Jahren, die bei ihrer Planung als Laufzeit veranschlagt wurden. Zwar wird die Laufzeit der Kernkraftwerke derzeit im Rahmen der von der französischen Atomaufsichtsbehörde (Autorité de sureté nucléaire) erlassenen und kontrollierten Vorschriften verlängert, doch wird allgemein davon ausgegangen, dass die Reaktoren – außer in Sonderfällen und unter besonderen Sicherheitsmaßnahmen – wahrscheinlich nicht länger als 60 Jahre betrieben werden können.

Daher erscheint es unerlässlich, eine industrielle Strategie auszuarbeiten, bei der die absehbare Stilllegung der historischen Kernkraftwerke einbezogen wird, die heute wesentlich zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen und zur Wettbewerbsfähigkeit des in Frankreich erzeugten Stroms beitragen. Aufgrund der außergewöhnlichen Geschwindigkeit, mit der Frankreich seinen Park in den 1980er-Jahren aufgebaut hat, wird die Stilllegung dieser Kraftwerke innerhalb einer sehr kurzen Zeitspanne erfolgen (Klippeneffekt).

In der Energiedebatte der französischen Medien erscheint diese Stilllegungsperspektive tendenziell als undenkbar, denn hier gehen viele Diskussionen davon aus, das derzeitige Gleichgewicht der verschiedenen Stromerzeugungskapazitäten könne langfristig erhalten werden. Diese strukturierende Voraussetzung muss von einer fundierten Prognose der Energiesituation berücksichtigt und in die französische Energie- und Klimastrategie einbezogen werden.

Vor diesem Hintergrund werden zwei wichtige Zeitperspektiven deutlich:

Kurz- bis mittelfristig (2030-2035) ist die Entscheidung, Kernreaktoren abzuschalten, durch politische Beweggründe bedingt. Innerhalb dieses Zeitraums bestehen nur zwei Möglichkeiten, das Potenzial der klimaneutralen Stromerzeugung zu erhöhen: Entweder, die Kernreaktoren werden weiter betrieben (die Fristen sind in jedem Fall zu kurz, um neue Reaktoren zu bauen), oder die erneuerbaren Energien werden ausgebaut. Die Abwägung zwischen beiden Lösungen erfolgte 2020 im Rahmen der französischen mehrjährigen Programmplanung für Energie *(Programmation pluriannuelle de l'énergie,* PPE) und soll bei deren nächster Revision 2023 neu angepasst werden. **Dabei müssen die neuen energetischen Voraussetzungen berücksichtigt werden, die sich in den vergangenen Jahren herausgebildet haben:** strengere Klimaziele für 2030 und eine fragilere Lage der Versorgungssicherheit mit einer angespannten Situation bei der Beschaffung fossiler Brennstoffe, steigenden Energiepreisen und einem geringerem Spielraum im europäischen Stromsystem.

Langfristig (2050-2060) stellt die Stilllegung der Kernreaktoren der zweiten Generation eine industrielle Herausforderung dar, denn die französischen Erzeugungskapazitäten müssen nicht nur den erwarteten Anstieg des Stromverbrauchs begleiten, sondern auch grundlegend erneuert werden, um jährlich eine Erzeugungskapazität von rund 380-400 TWh zu ersetzen.

Vor diesem perspektivischen Hintergrund müssen die energiepolitischen Entscheidungen erwogen werden, die Frankreich in den kommenden Jahren treffen muss, um die doppelte Herausforderung einerseits der erforderlichen Erhöhung der Erzeugungskapazität für klimaneutralen Strom und andererseits der geplanten Stilllegung des Großteils der Anlagen, mit denen dieser Bedarf heute gedeckt wird, zu bewältigen. Diese Entscheidungen sind von ihrer Tragweite her mit denen vergleichbar, die in den 1970er Jahren angesichts der Ölpreiskrise getroffen wurden.

4 Bestehende Optionen: ein Stromsystem aus „erneuerbarer Energie + Kernenergie" oder mittelfristig „100 % Erneuerbare"

Die Optionen, die angesichts dieser Herausforderung zur Verfügung stehen, sind nicht mehr dieselben wie nach der Ölpreiskrise. Da die fossilen Energieträger keine Option mehr darstellen, die Abscheidung und Speicherung von Kohlenstoff *(Captage et stockage du carbone,* CCS) aus Gründen der technologischen Reife, Akzeptanz und technischen Verfügbarkeit nicht angestrebt wird und Frankreich das Erreichen der Klimaneutralität nicht von massiven Importen grüner Brennstoffe abhängig machen will, geht es bei der Debatte über die klimaneutrale Stromerzeugung vor allem um das Verhältnis zwischen erneuerbaren Energien und neuen Kernreaktoren.

Auch die wirtschaftlichen Vergleichsbedingungen zwischen beiden Energien haben sich verändert. Hat sich die Wettbewerbsfähigkeit der historischen Kernkraftwerke bis heute als sehr stark erwiesen, so sind die Kosten der Reaktoren der dritten Generation gestiegen, während die erneuerbaren Energien kostengünstiger geworden sind. Der Vergleich der wesentlichen Eigenschaften von Wind- und Solarenergie darf sich jedoch nicht auf deren Gestehungskosten beschränken, da die fluktuierende Erzeugung durch Flexibilitätsmittel ausgeglichen werden muss, deren Systemintegration eine Netzverstärkung erfordert. Folglich müssen in der Diskussion die Gesamtkosten der verschiedenen Optionen („Systemkosten") und nicht die individuellen Kosten jeder Einzeltechnologie verglichen werden.

Auch die gesellschaftliche Debatte selbst hat sich verändert. So stößt die Kernenergie aufgrund ihres Unfallrisikos und ethischer Bedenken bei der Lagerung von radioaktiven Abfällen nach wie vor auf Ablehnung; aber auch die erneuerbaren Energien sind v. a. aufgrund gesellschaftlicher und ökologischer Bedenken nicht unumstritten. Kritisiert werden die Auswirkungen der Wasserkraft auf die Artenvielfalt, die CO_2-Bilanz der Photovoltaik, der Flächenbedarf der Windenergie und die Konsequenzen ihrer fluktuierenden Erzeugung („Was passiert in einer windstillen Nacht?"). Auch Fragen der Akzeptanz durch die Bevölkerung und der Steuerung spielen eine Rolle, wie das Interesse an Eigenerzeugung oder die Bürgerbeteiligung an Projekten, starke Meinungsverschiedenheiten beim Thema Suffizienz und Veränderung von Lebensgewohnheiten, die steigende Bedeutung der lokalen Gebietskörperschaften in der Energiepolitik … Kurz, das Frankreich von 2021 hat nicht mehr viel mit dem Frankreich der 1970er-Jahre gemeinsam.

Auch in technischer Hinsicht hat sich die Debatte inhaltlich stark weiterentwickelt. Auf Seiten der erneuerbaren Energien werden in vielen Ländern der Welt Systeme mit einem hohen Erneuerbare-Energien-Anteil erforscht. RTE veröffentlichte im Januar 2021 gemeinsam mit der Internationalen Energieagentur einen Bericht, der die technischen Voraussetzungen für das Erreichen eines Systems mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energien auflistet und den Weg für die mittelfristige Möglichkeit von Systemen mit 100 % erneuerbaren Energien ebnet. Diese Szenarien sind technisch äußerst anspruchsvoll und setzen unter anderem die perfekte Beherrschung der Integration von „Wasserstoff" voraus. Auch auf der Seite der Kernenergie hat sich die Zahl der Optionen erweitert: Neben den großen Reaktoren vom Typ EPR 2 treten zunehmend Projekte mit kleinen modularen Reaktoren (SMR) und neuen Technologien hervor. Die Konzertierung im Rahmen der „Energetischen Zukunftsperspektiven 2050" hat verdeutlicht, dass Frankreich zum gegenwärtigen Zeitpunkt auf keinen Fall in der Lage ist, Kernreaktoren mit derselben Geschwindigkeit wie in den 1980er-Jahren zu bauen.

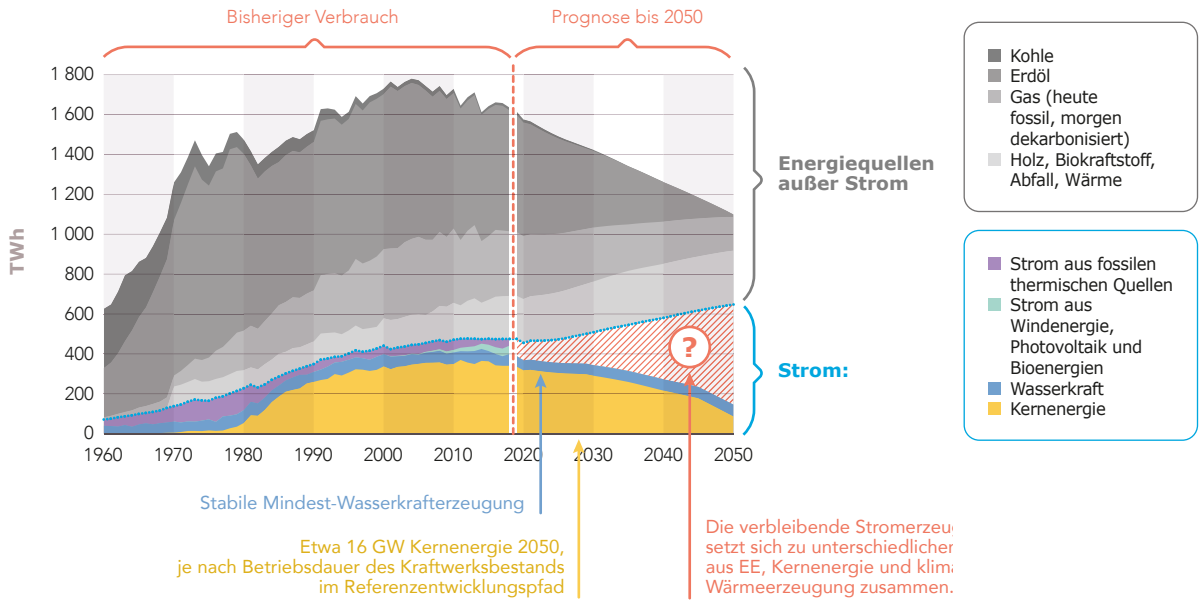
5 Das Stromsystem von morgen wird sich zwangsläufig von unserem heutigen unterscheiden.

In der Diskussion zu den anstehenden Entscheidungen hat sich RTE von Beginn an für eine klare Methode entschieden, in der zwei Kategorien von Szenarien unterschieden werden, in denen sich die Trends der heutigen französischen Gesellschaft widerspiegeln. Neuinvestitionen in den Energieerzeugungspark sind dabei entweder ausschließlich auf erneuerbare Energien („M"-Szenarien) ausgerichtet oder auf einen technologisch vielfältigeren Mix mit gleichzeitiger Nutzung von erneuerbaren Energien und neuen Kernreaktoren („N"-Szenarien).

Diese Gegenüberstellung verdeutlicht die Bedeutung der Entscheidung darüber, weiterhin auf einen Kernkraftwerkspark zu setzen oder nicht. Diese geht mit einer langfristigen Verpflichtung des Landes einher und ihr Ergebnis wird starke technische, wirtschaftliche und gesellschaftliche Auswirkungen haben. In der Konzertierung wurde diese Methode weitgehend bestätigt. Sie mündet in die Beschreibung zweier verschiedener Arten von Stromsystemen, die sich vom heutigen System unterscheiden und beide massive Investitionen voraussetzen. Aber **dies darf nicht den einzigen Schlüssel zum Verständnis der Szenarien darstellen, denn eine zu starke Konfrontation der Szenarien M und N würde deren starke Ähnlichkeiten bezüglich Technik** (hoher Anteil fluktuierender erneuerbarer Energien, großer Flexibilitätsbedarf) **und Wirtschaft** (Vorrang der Investitionen vor den Betriebskosten) **verschleiern.**

So ist es für alle Szenarien erforderlich, sich in ein von Grund auf anderes Stromsystem hineinzudenken. Denn unabhängig davon, ob dieses zu 100 % erneuerbar ist oder dauerhaft auf eine Kombination von erneuerbaren Energien und Kernreaktoren aufbaut, wird dieses System nicht den Funktionsprinzipien entsprechen, die wir seit 30 Jahren kennen und kann daher auch nicht annähernd mit unserem heutigen System verglichen werden.

Abbildung 3 Entwicklung des Gesamtstromverbrauchs und des Endenergieverbrauchs für andere Energieträger in Frankreich



Aufgabe der „Energetischen Zukunftsperspektiven 2050" ist es daher, diese möglichen Welten anhand einer gründlichen technischen Studie, einer wirtschaftlichen Berechnung, einer Umweltanalyse sowie unter Berücksichtigung ihrer gesellschaftlichen Aspekte zu beschreiben.

VERBRAUCHSENTWICKLUNGSPFADE

BIS 2050

Endenergieverbrauch nach Sektor: Industrie, Büro- und Dienstleistungsgebäude, Wasserstoff, Wohngebäude, Verkehr

SZENARIEN

Referenz

ANNAHMEN	UMFANG 2050	WICHTIGSTE ENTWICKLUNGEN
Schrittweise Elektrifizierung (Ersatz fossile Energieträger) und hochgreifende Energieeffizienzziele (Hypothese SNBC). Anhalten-des Wachstum von Wirtschaft (+1,3% ab 2030) und Bevölkerung (niedrige Geburtenrate des INSEE). Effizienz der öffentlichen Politik und Pläne (Konjunkturprogramm, Wasserstoff, Industrie). Die verarbeitende Industrie wächst und ihr Anteil am BIP ist nicht mehr rückläufig. Einbeziehung der Gebäudesanierung sowie des damit verbundenen Rebound-Effekts.	**645 TWh**	180 TWh 134 TWh 113 TWh 99 TWh 50 TWh

Suffizienz

ANNAHMEN	UMFANG 2050 (im Vergleich zur Referenz)	WICHTIGSTE ENTWICKLUNGEN (+ DIFFERENZ ZUR REFERENZ)
Die Lebensgewohnheiten entwickeln sich in Richtung einer höheren Nutzungs- und Verbrauchssuffizienz (weniger Individual-verkehr, mehr sanfte Mobilität und öffentliche Verkehrsmittel, geringerer Verbrauch von Industriegütern, Sharing Economy, Senkung der empfohlenen Heiztemperatur, erhöhter Rückgriff auf Telearbeit, digitale Suffizienz usw.), was zu einer allgemeinen Verringerung des Energie- und damit auch des Strombedarfs führt.	**555 TWh** (-90 TWh)	160 TWh (-20 TWh) 111 TWh (-23 TWh) 95 TWh (-18 TWh) 77 TWh (-22 TWh) 47 TWh (-3 TWh)

Weitreichende Reindustralierung

ANNAHMEN	UMFANG 2050 (im Vergleich zur Referenz)	WICHTIGSTE ENTWICKLUNGEN (+ DIFFERENZ ZUR REFERENZ)
Der Anteil der verarbeitenden Industrie am BIP unterliegt einem starken Wandel. Er kehrt nicht auf das Niveau der frühen 1990er Jahre zurück, erreicht bis 2050 aber 12-13%. Das Szenario modelliert Investitionen in Spitzentechnologien und strategische Sektoren und sieht vor, stark emittierende Produktionszweige aus dem Ausland nach Frankreich zurück zu verlagern, um den CO_2-Fußabdruck des französischen Verbrauchs zu verringern.	**752 TWh** (+107 TWh)	239 TWh (+59 TWh) 134 TWh (0 TWh) 115 TWh (+2 TWh) 99 TWh (0 TWh) 87 TWh (+37 TWh)

VARIANTEN

Elektrifizierung +

ANNAHMEN	UMFANG 2050 (im Vergleich zur Referenz)	WICHTIGSTE ENTWICKLUNGEN (+ DIFFERENZ ZUR REFERENZ)
Der Stromanteil am Endverbrauch wächst stärker als im SNBC. Bestimmte Nutzungen stellen früher bzw. stärker auf Strom um. Dies gilt insbesondere für den Verkehrssektor, in dem die Einführung von Elektrofahrzeugen und die Elektrifizierung bestimmter Lkw-Kategorien wesentlich rascher voranschreitet. Auch der Umstieg auf Elektroheizungen erfolgt schneller und auf proaktivere Art.	**700 TWh** (+55 TWh)	192 TWh (+12 TWh) 139 TWh (+5 TWh) 120 TWh (+7 TWh) 125 TWh (+27 TWh) 50 TWh (0 TWh)

Schwächere Elektrifizierung

ANNAHMEN	UMFANG 2050 (im Vergleich zur Referenz)	WICHTIGSTE ENTWICKLUNGEN (+ DIFFERENZ ZUR REFERENZ)
Der Anteil des Stroms am Endverbrauch steigt schwächer und langsamer als im SNBC. Beispielsweise in der Industrie kann Strom nicht wettbewerbsfähig sein, weshalb der Wandel hier langsamer vorangeht. Dasselbe gilt für die Umstellung auf Elektrofahrzeuge (Pkws und Lkws) und elektrische Heizgeräte in Wohnungen sowie im Büro- und Dienstleistungssektor.	**578 TWh** (-67 TWh)	150 TWh (-30 TWh) 126 TWh (-8 TWh) 107 TWh (-6 TWh) 81 TWh (-18 TWh) 50 TWh (0 TWh)

Schwächere Energieeffizienz

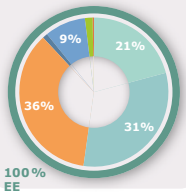
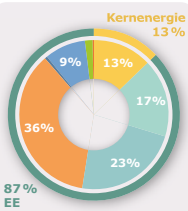
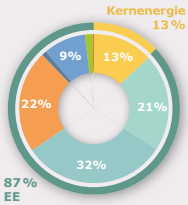
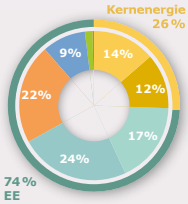
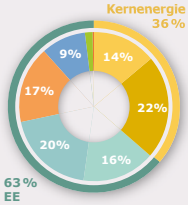
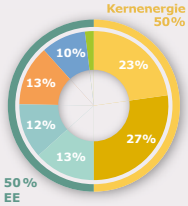
ANNAHMEN	UMFANG 2050 (im Vergleich zur Referenz)	WICHTIGSTE ENTWICKLUNGEN (+ DIFFERENZ ZUR REFERENZ)
Die allgemein angenommene Verbesserung der Energieeffizienz von Elektrogeräten tritt nicht ein oder löst einen Überkonsum aus, der den im Referenzentwicklungspfad vorgesehene Verbrauch übertrifft. Im Gebäudesektor werden die Sanierungsziele und die Umstellung auf Wärmepumpen nicht erreicht, und die Energie-effizienzpotenziale werden bis 2050 nur zu maximal 50% aus-geschöpft (gegenüber 70% im Referenzentwicklungspfad).	**714 TWh** (+69 TWh)	191 TWh (+11 TWh) 156 TWh (+22 TWh) 135 TWh (+22 TWh) 105 TWh (+6 TWh) 50 TWh (0 TWh)

Wasserstoff +

ANNAHMEN	UMFANG 2050 (im Vergleich zur Referenz)	WICHTIGSTE ENTWICKLUNGEN (+ DIFFERENZ ZUR REFERENZ)
Der Ausbau der Erzeugung von dekarbonisiertem Wasserstoff beschleunigt sich stark, was zu einer deutlich höheren Endnach-frage nach Wasserstoff führt als im Referenzentwicklungspfad. In manchen Sektoren, die schwer elektrifiziert werden können (Stahl-industrie usw.), wird anstelle der Elektrifizierung auf Wasserstoff und Biomasse zurückgegriffen (Schwerlastverkehr, Prozesswärme).	**754 TWh** (+109 TWh)	164 TWh (-16 TWh) 134 TWh (0 TWh) 113 TWh (0 TWh) 93 TWh (-6 TWh) 171 TWh (+121 TWh)

ERZEUGUNGSMIX-SZENARIEN
BIS 2050

Branche : Flexibilität der Nachfrage · Vehicle-to-grid · Neue dekarbonisierte Thermik · Batterien

	NARRATIV	ERZEUGUNGS-MIX 2050	2050 INSTALLIERTE KAPAZITÄT (IN GW)					FLEXIBILI-TÄTS-MIX 2050
			Solar-energie	Onshore-Windenergie	Offshore-Windenergie	Historische Kernenergie	Neue Kernenergie	
M0 100% EE bis 2050	Ausstieg aus der Kernkraft bis 2050: Die Stilllegung der bestehenden Kernreaktoren wird beschleunigt und das Ausbautempo von Photovoltaik, Windenergie und Meeresenergien optimal gesteigert.		~208 GW (d.h. x21)	~74 GW (d.h. x4)	~62 GW	/	/	15 GW 1,7 GW (1,1 MVE) 29 GW 26 GW
M1 Dezentraler Bestand	Sehr starker Ausbau der erneuerbaren Energien, die dezentral über das ganze Land verteilt sind, wobei die Photovoltaikbranche eine führende Rolle einnimmt. Diese Ausbreitung setzt eine starke Mobilisierung der beteiligten lokalen Akteure und Gebietskörperschaften voraus.		~214 GW (d.h. x22)	~59 GW (d.h. x3,5)	~45 GW	16 GW	/	17 GW 1,7 GW (1,1 MVE) 20 GW 21 GW
M23 Größtenteils EE	Sehr starker Ausbau sämtlicher Erneuerbaren-Branchen insbesondere infolge der Errichtung großer Onshore- und Offshore-Windparks. Streben nach wirtschaftlicher Optimierung und Ausrichtung auf Technologien und Gebiete mit höchsten Erträgen und Größenvorteilen.		~125 GW (d.h. x12)	~72 GW (d.h. x4)	~60 GW	16 GW	/	15 GW 1,7 GW (1,1 MVE) 20 GW 13 GW
N1 EE + neue Kernenergie 1	Ab 2035 und alle 5 Jahre Start eines Programms zum Bau neuer Reaktoren, die paarweise an bestehenden Standorten angesiedelt werden. Ausbau der erneuerbaren Energien in hohem Tempo, um die Stilllegung von Reaktoren der zweiten Generation auszugleichen.		~118 GW (d.h. x11)	~58 GW (d.h. x3,3)	~45 GW	16 GW	13 GW (d.h. 8 EPR)	15 GW 1,7 GW (1,1 MVE) 11 GW 9 GW
N2 EE + neue Kernenergie 2	Start eines schnelleren Programms für den Bau neuer Reaktoren (ein Paar alle drei Jahre) ab 2035 mit schrittweiser Lastzunahme. Der Ausbau der erneuerbaren Energien wird fortgesetzt, aber langsamer als in den Szenarien N1 und M.		~90 GW (d.h. x8,5)	~52 GW (d.h. x2,9)	~36 GW	16 GW	23 GW (d.h. 14 EPR)	15 GW 1,7 GW (1,1 MVE) 5 GW 2 GW
N03 50% EE + Kernenergie 3	Der Erzeugungsmix beruht bis 2050 zu gleichen Teilen auf erneuerbaren Energien und Kernenergie. Dies setzt voraus, die bestehenden Kernkraft-werke so lange wie möglich zu betreiben und neue Kernkraftwerke (EPR 2 + SMR) proaktiv und diversifiziert zu entwickeln.		~70 GW (d.h. x7)	~43 GW (d.h. x2,5)	~22 GW	24 GW	~27 GW (d.h. ~14 EPR + mehrere SMR)	13 GW 1,7 GW (1,1 MVE) 1 GW

Gemeinsame Annahmen	Wasserkraft	Wasserkraft + Meeresenergien	Bioenergie	Importe	PSW
	~22 GW	0 bis 3 GW	~2 GW	39 GW	8 GW

*Die Energiemengen und -anteile beziehen sich auf das Referenzverbrauchsszenario.

DIE 18 ERKENNTNISSE DER STUDIE

1 Das Erreichen der Klimaziele setzt voraus, den Verbrauch über die Energieeffizienz oder die energetische Suffizienz zu beeinflussen.

1 Die Energieeffizienzstrategie *(stratégie bas-carbone)* ist bereits die wesentliche Stütze der französischen CO_2-Reduzierungsstrategie.

Wie alle europäischen Länder will auch Frankreich die Klimaneutralität durch Reduzierung seines Endenergieverbrauchs erreichen. So sieht die SNBC vor, den Energieverbrauch bis 2050 um 40% zu senken – ein im Vergleich zu den anderen europäischen Ländern sehr hochgreifendes Ziel. Um dieses trotz des zu erwartenden Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstums zu erreichen, plant die Strategie mit einer deutlich verbesserten Energieeffizienz.

Diese beruht zunächst auf einem rückläufigen Verbrauch von Geräten infolge des technologischen Fortschritts (natürlicher technischer Fortschritt bei Haushaltsgütern wie Beleuchtung, Elektrogeräten oder Computern) und setzt zudem eine proaktive öffentliche Politik voraus (Gebäudesanierung). Allein von diesen beiden Effekten ist ein Verbrauchsrückgang um 200 TWh zu erwarten. Die Strategie kann zudem auf die Elektrifizierung bestimmter Anwendungen und die damit verbundene mechanische Verbesserung der Energieeffizienz aufbauen (der Wirkungsgrad von Elektroautos beträgt 90%, der von Verbrennungsmotoren 25-35%).

2 Die energetische Suffizienz könnte den Energieverbrauch weiter reduzieren, stellt jedoch an sich schon ein gesellschaftliches Transformationsprojekt da.

Das Thema Suffizienz hat sich auch über den Aspekt der Energieeffizienz hinaus in der öffentlichen Debatte etabliert.

Ein in Bezug auf die Energie „suffizientes" Frankreich könnte seinen Verbrauch im Vergleich zum Referenzentwicklungspfad senken. So beziffern die „Energetischen Zukunftsperspektiven 2050" den möglichen Gewinn auf rund 90 TWh Strom, was einer Senkung um 15% entspricht (zusätzlich zur Energieeffizienz).

Dies zu erreichen, erfordert, über die vordergründigen Aussagen zu Sinn und Zweck einer Verbrauchsreduzierung hinauszugehen, denn die energetische Suffizienz setzt tiefgreifende Veränderungen der Lebensgewohnheiten und der gesellschaftlichen Organisation voraus. Genau aus diesem Grund hat die Konzertierung auch zu keiner Übereinstimmung und keinem eindeutigen Ergebnis geführt, denn während für manche Gruppen die energetische Suffizienz die wichtigste Antwort auf die Umweltkrise darstellt, lehnen andere das Prinzip an sich im Namen der individuellen Freiheiten und der Aufrechterhaltung einer subjektiven Form von „Komfort" ab.

Die Hebel zur Förderung der Suffizienz wurden für jeden einzelnen Bereich (Wohnen, Arbeit und Gewerbe, Verkehr und Industrietätigkeiten) identifiziert und quantifiziert, um eine sachkundige Diskussion zu ermöglichen. Sie folgen den Arbeiten des französischen Bürgerkonvents zum Klimaschutz *(Convention citoyenne pour le climat)* und entwerfen einen spezifischen „Gesellschaftspakt". Dieser soll von der RTE-Studie nicht qualifiziert, gefördert oder behindert, sondern im Hinblick auf das Ziel der Klimaneutralität dokumentiert werden.

Keiner dieser Hebel ist eine Selbstverständlichkeit und alle stellen insofern einen symbolischen Wendepunkt dar, als sie sich nicht mehr darauf beschränken, an die Entschlossenheit jedes Einzelnen zu appellieren, sondern ein Szenario entwerfen, das eine kollektive Dynamik auf Ebene der gesellschaftlichen Organisation voraussetzt.

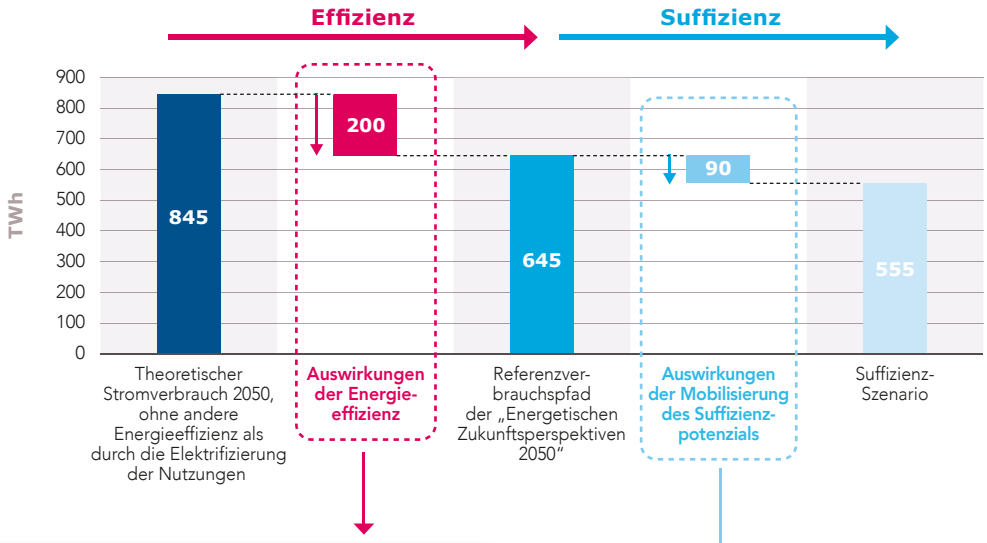
3 Der Schlüssel zur genauen Dimensionierung von Investitionen und zu deren langfristigen Tragfähigkeit liegt weiterhin in der Verbrauchskontrolle.

Die wichtige Rolle des Energiemanagements einerseits zur Gewährleistung der Stromversorgungssicherheit während der Übergangsphase des Systems und andererseits, um die vom Energiesystem ausgehende Klima- und Umweltbelastung zu verringern, wurde bereits in zahlreichen RTE-Berichten hervorgehoben.

Dies gilt auch für sämtliche Strommix-Konfigurationen der „Energetischen Zukunftsperspektiven 2050" und obwohl die französische Stromerzeugung bereits weitgehend klimaneutral ist.

Denn eine Reduzierung des Verbrauchs verringert das notwendige Tempo der Reinvestitionen in das Stromsystem, lindert den Druck auf die Ressourcen und erhöht die Resilienz des Systems gegenüber jeglicher Art von Schocks. **Angesichts der Tatsache, dass das Energiesystem vor einem neuen Investitionszyklus steht und der Stromverbrauch ansteigen wird, um die fossilen Energieträger zu ersetzen, ist ein hochgradiges Demand Side Management absolut notwendig und stellt ein unverzichtbares Instrument zur Umrahmung der Energiewende dar.** Dies gilt umso stärker, je höher die Reindustrialisierung angesetzt wird.

Ergebnisse n° 1 Erwartete Auswirkungen der Energieeffizienz und potenzielle Auswirkungen der Suffizienz auf das Verbrauchsniveau (im Vergleich zum Referenzpfad)



1. **Reduzierung des Einheitsverbrauchs von Geräten:** Haushaltsgeräte, Beleuchtung, Informatik.
2. **Umsetzung proaktiver öffentlicher Maßnahmen:** thermische Gebäudesanierung (verdoppeltes Sanierungstempo), Standards für neue Gebäude (RE 2020), französische Verordnung für den Büro- und Dienstleistungssektor *(Décret tertiaire)*, vorrangige Nutzung von Wärmepumpen.

3. **Mechanische Stärkung der Energieeffizienz bei der Elektrifizierung:** Elektrofahrzeuge und Wärmepumpen bieten eine weitaus höhere Energieeffizienz als Verbrennungsfahrzeuge oder mit fossilen Brennstoffen betriebene Heizkessel.

Privathaushalte: -23 TWh
Anstieg gemeinschaftlicher Wohnformen, freiwillige Begrenzung des Verbrauchs zu Heizzwecken (-1° C) und des Warmwasserverbrauchs.

Arbeitsort und Gewerbe: -18 TWh
Vermehrte Telearbeit und dadurch Beschränkung der Büroflächen, weniger KIT.

Reisen: -22 TWh
Rückgang des Individualverkehrs zugunsten von Fahrgemeinschaften, Verringerung der durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit und der Fahrzeuggröße.

Industrietätigkeiten: - 20 TWh
Rückläufiger Bedarf der Lebensmittelindustrie wenn Umstellung auf weniger verarbeitete Lebensmittel, weniger Güterproduktion durch Verlängerung der Lebensdauer von Geräten.

2 Der Energieverbrauch wird zurückgehen, aber der Stromverbrauch wird ansteigen, um die fossilen Energieträger zu ersetzen.

Strom ist heute im Leben der Bürger allgegenwärtig, im französischen Energiemix aber nicht vorherrschend.

Im Verkehrssektor kommt Strom nur geringfügig zum Einsatz (2%, gegenüber 91% fossile Energieträger), bei der Heizung von Gebäuden spielt er eine untergeordnete Rolle (16%, gegenüber 56% fossile Energieträger, wobei 4 Millionen Haushalte mit Öl heizen). In der Industrie ist das Verhältnis ausgewogener (36%, gegenüber 51% fossile Energieträger[2]), da hier nach wie vor Öl, Gas und Kohle, aber auch aus Gas gewonnener „grauer Wasserstoff" zum Einsatz kommen.

Zum Erreichen der Klimaneutralität gilt es also, den Verbrauch zu senken und den verbleibenden Bedarf mit klimaneutralen Energien wie Strom oder Biomasse (Energieholz, Biomethan, Biokraftstoffe...) zu decken.

1 Der Stromverbrauch dürfte selbst im Falle einer stark erhöhten Energieeffizienz ansteigen.

In den vergangenen Jahren wurden die Entwicklungsprognosen für den Stromverbrauch weltweit und insbesondere in Europa aufgrund der ehrgeizigeren Klimaziele (-55% bis 2030, Klimaneutralität bis 2050) nach oben korrigiert.

Angesichts der aktuellen Orientierungen Frankreichs (SNBC, französischer Plan für den Ausbau der Wasserstoffnutzung *(Plan hydrogène)*, sektorspezifische politische Maßnahmen) ist von einem moderaten Anstieg des Stromverbrauchs um 35% in 30 Jahren auszugehen. Dies entspräche einem durchschnittlichen Jahreswachstum von 1%. Der Stromverbrauch würde demnach bis 2050 auf 645 TWh steigen (Referenzentwicklungspfad).

Im Vergleich zu den Prognosen, die RTE vor fünf Jahren abgegeben hat – diese enthielten noch einen großen Anteil an fossilen Energieträgern, da damals noch nicht auf Klimaneutralität abgezielt wurde – sind diese Pfade nach oben gerichtet. Diese Entwicklung ist Teil eines allgemeinen Trends, den Strombedarf anzuheben, um den Klimapfaden folgen zu können.

Im Vergleich zu vielen europäischen Szenarien zum Erreichen der Klimaneutralität ist die im Referenzentwicklungspfad angenommene Anstiegsperspektive moderat. Denn die SNBC beruht auf dem Prinzip einer deutlichen Verstärkung der Energieeffizienz (durch den mechanischen Effekt infolge der Erhöhung des Stromanteils, die Fortsetzung des tendenziellen Tempos bei der Verbesserung der Effizienz von Elektrogeräten und eine starke Beschleunigung der thermischen Gebäudesanierung).

2 Der Stromverbrauch wird steigen, da dieser die fossilen Energieträger ersetzen muss.

Die neuen Verwendungszwecke von Strom dienen vorwiegend dazu, die Nutzung fossiler Energieträger zu vermeiden. Dieser Verlagerungseffekt ist dort besonders groß, wo Strom heute noch wenig zum Einsatz kommt: im Verkehr (100 TWh im Jahr 2050, derzeit 15 TWh), in der Industrie (180 TWh, derzeit 115 TWh) und bei der Wasserstofferzeugung (50 TWh, derzeit 0). Im Wohn- und Büro- bzw. Dienstleistungssektor wird der Effekt nur teilweise durch die thermische Sanierung und die Energieeffizienz infolge der mechanischen Erneuerung von elektrischen Geräten (Beleuchtung Haushaltsgeräte usw.) ausgeglichen.

Alle klimaneutralen Szenarien führen somit zu einer beträchtlichen Elektrifizierung von Fahrzeugen (2050: 94% der Pkws und 21% der Lkws) und Industrieprozessen. Trotzdem entsteht keine „reine elektrifizierte Gesellschaft", denn neben Strom wird auch mit Gas (Biomethan, Wasserstoff, verschiedenen Arten von Synthesegas), Flüssigkraftstoffen (Bio- oder synthetische Kraftstoffe) sowie Holz und Biomasse (zur Wärmegewinnung) geplant.

2. Außererhalb der Verwendung als Rohstoff

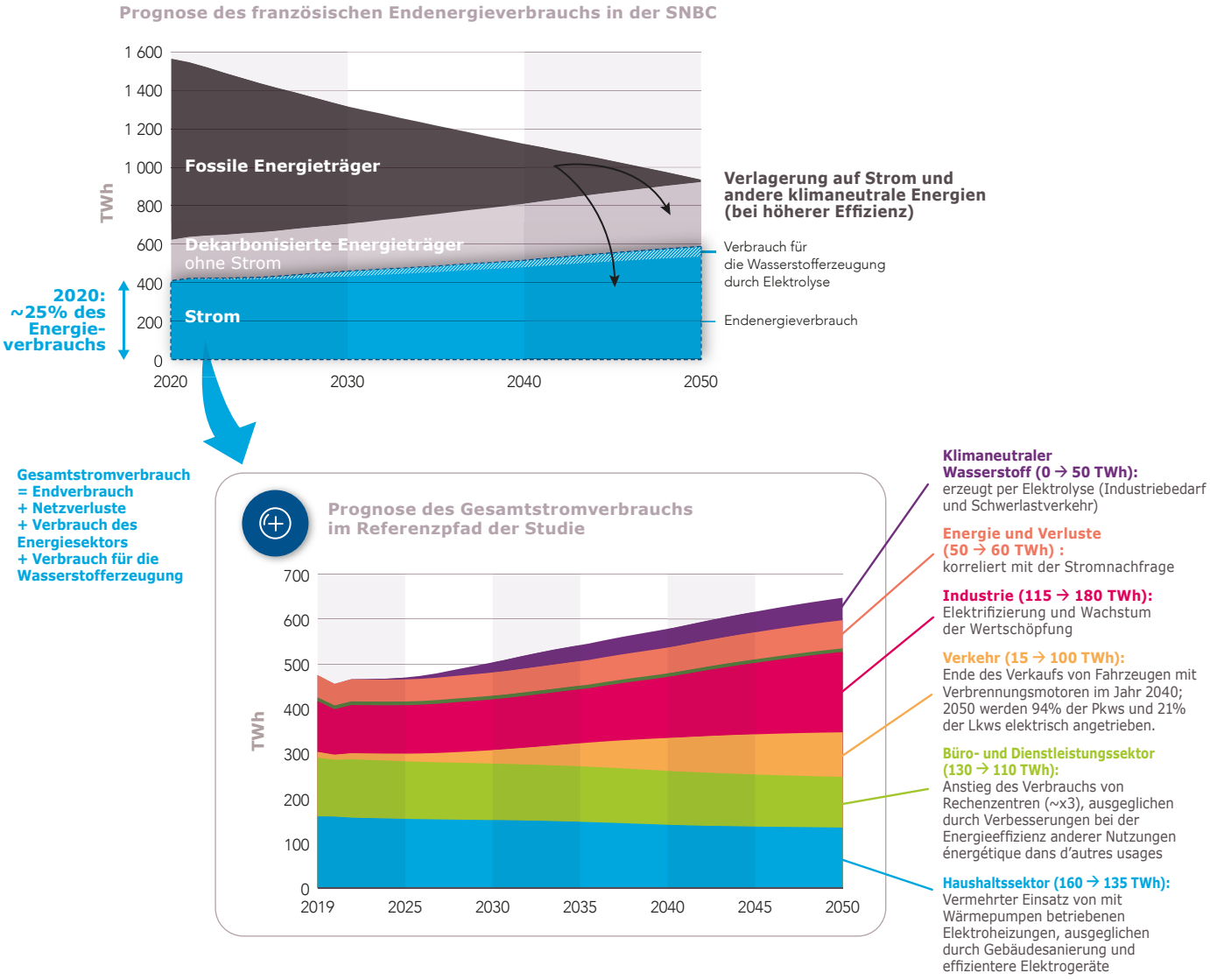
3 Alle Szenarien, Varianten und Sensibilitätstests weisen in die gleiche Richtung.

Die „Energetischen Zukunftsperspektiven 2050" sind nicht auf einen Referenzentwicklungspfad beschränkt, sondern untersuchen eine Vielzahl verschiedener Konfigurationen.

Alle Varianten und Szenarien schließen auf einen steigenden Verbrauch von 15 % (Suffizienz) bis 60 % (Reindustrialisierung oder Wasserstoff +). Diese Werte bleiben selbst dann unverändert, wenn die verschiedenen Varianten miteinander kombiniert werden. **Das französische Stromsystem muss sich also auf die Bewältigung eines Anstiegs der Stromnachfrage einstellen, mit dem zu rechnen ist, sobald der für die Klimaneutralität notwendige Wandel eingeleitet wird – selbst dann, wenn die Energieeffizienz und Suffizienz stark angehoben werden können.**

Mittelfristig setzen die neuen EU-Ziele (-55% netto bis 2030 gegenüber -40% in der SNBC) einen schnelleren Handlungsbedarf voraus als das Referenzszenario. Der betreffende Pfad („Beschleunigung 2030") erfordert somit eine verstärkte Elektrifizierung der Gebräuche.

Ergebnisse n°2 Entwicklung des Energie- und Stromverbrauchs im Hinblick auf die Klimaneutralität



3 Die beschleunigte Reindustrialisierung durch Elektrifizierung der Prozesse erhöht den Stromverbrauch, mindert jedoch den französischen CO_2-Fußabdruck.

1 Das Szenario eines industriellen Wiederaufbaus auf Basis klimaneutraler Energie ist in klimapolitischer Hinsicht äußerst interessant.

Frankreich ist es in den letzten 30 Jahren gelungen, die landesweit erzeugten Treibhausgasemissionen zu senken. Im selben Zeitraum wurde sein CO_2-Fußabdruck (Emissionen, die im Land selbst bzw. in anderen Ländern durch importierte Produkte entstehen) nur geringfügig kleiner: Der Grund für diese paradoxe Situation liegt in der Deindustrialisierung des Landes sowie in der zunehmenden Nutzung importierter Fertigerzeugnisse bei gleichzeitigem Anstieg des französischen Verbrauchs.

Unter klimapolitischen Gesichtspunkten ist diese Situation kontraproduktiv, denn Frankreich selbst verfügt über klimaneutralen Strom und gehört diesbezüglich zu den weltweit führenden Ländern. Die Aussicht auf eine industrielle Neuansiedlung mit gezielten Investitionen in Spitzenindustrien und in Tätigkeiten, mit denen der CO_2-Fußabdruck des Landes verkleinert werden kann, bietet eine Lösung für dieses Problem: Sie wird im Szenario „tiefgreifende Reindustrialisierung" der „Energetischen Zukunftsperspektiven 2050" untersucht.

Zu diesem Szenario gehört ein auf klimaneutrale Lösungen ausgerichteter Umbau der französischen Produktionskapazitäten ab dem nächsten Investitionszyklus. Dabei wird jedoch vorausgesetzt, dass das französische Stromsystem in preislicher und emissionstechnischer Hinsicht dem Wettbewerb mit außerhalb Frankreichs angebotenen kohlenstoffhaltigen Alternativen standhalten kann. Insofern stellt es eine beträchtliche Herausforderung dar. Langfristig könnten so ein Anteil der verarbeitenden Industrie am BIP etwa in Höhe der frühen 2000er-Jahre sowie eine äußerst positive Handelsbilanz erreicht werden.

2 Infolge der Reindustrialisierung der Wirtschaft steigt der Stromverbrauch stärker an als im Referenzentwicklungspfad.

Aufgrund der deutlich negativen Handelsbilanz Frankreichs sind die energetischen und ökologischen Auswirkungen des französischen Verbrauchs heute in den Energie- und Klimabilanzen des Landes teilweise unsichtbar. Im Falle der Neuansiedlung von Industrien würden sie deutlicher hervortreten. So geht RTE davon aus, dass in einem Szenario mit Reindustrialisierung ein Stromverbrauch von 750 TWh den Referenzentwicklungspfad um rund 100 TWh überträfe.

Um eine derart hohe Anstrengung zu schaffen, **muss das Stromsystem in der Lage sein, einen stärkeren Anstieg des Strombedarfs zu begleiten** (+60% gegenüber +35% in der Referenzsituation). Dazu könnte in den kommenden zehn Jahren die heute weitgehend exportorientierte Stromhandelsbilanz beitragen und so die Zeit überbrücken, bis die neuen Investitionen in die klimaneutrale Stromerzeugung greifen.

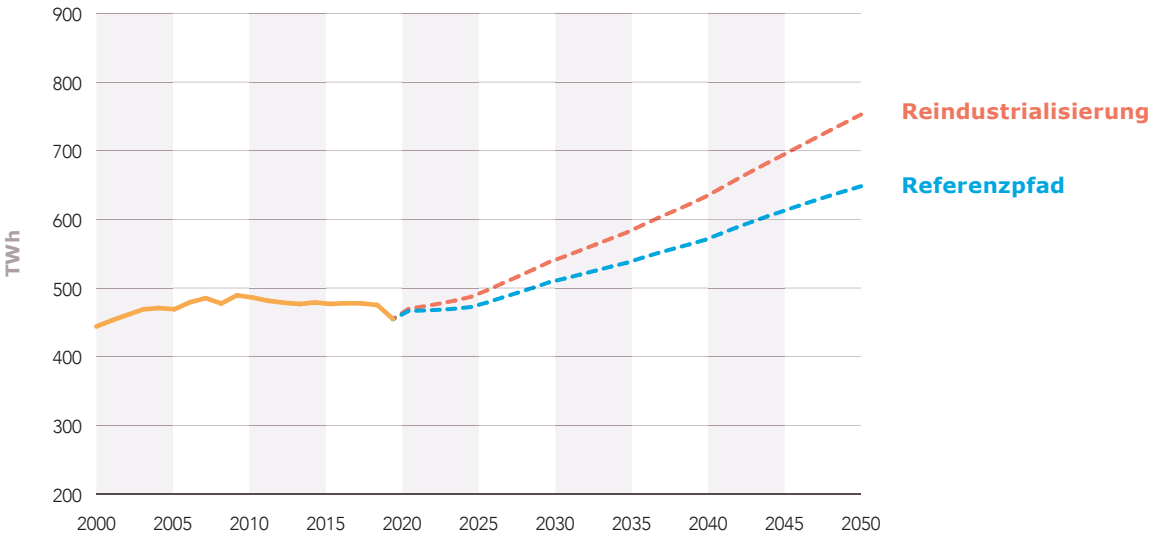
3 Die Reindustrialisierung der Wirtschaft verhilft Frankreich zu einem deutlich kleineren CO_2-Fußabdruck.

Die Reindustrialisierung ermöglicht eine erhebliche Verbesserung der französischen CO_2-Bilanz, die angesichts der defizitären Handelsbilanz des Landes heute eine der größten Herausforderungen im Kampf gegen den Klimawandel darstellt. **Durch eine weitreichende Reindustrialisierung können in dreißig Jahren etwa 900 Millionen Tonnen CO_2 eingespart werden, wobei sich dieser Vorteil über die gesamte Entwicklung hinweg vergrößert:** ~10 $MtCO_2$äq/Jahr zwischen 2020 und 2030, ~30 $MtCO_2$äq/Jahr zwischen 2030 und 2040, ~40 $MtCO_2$äq/Jahr zwischen 2040 und 2050.

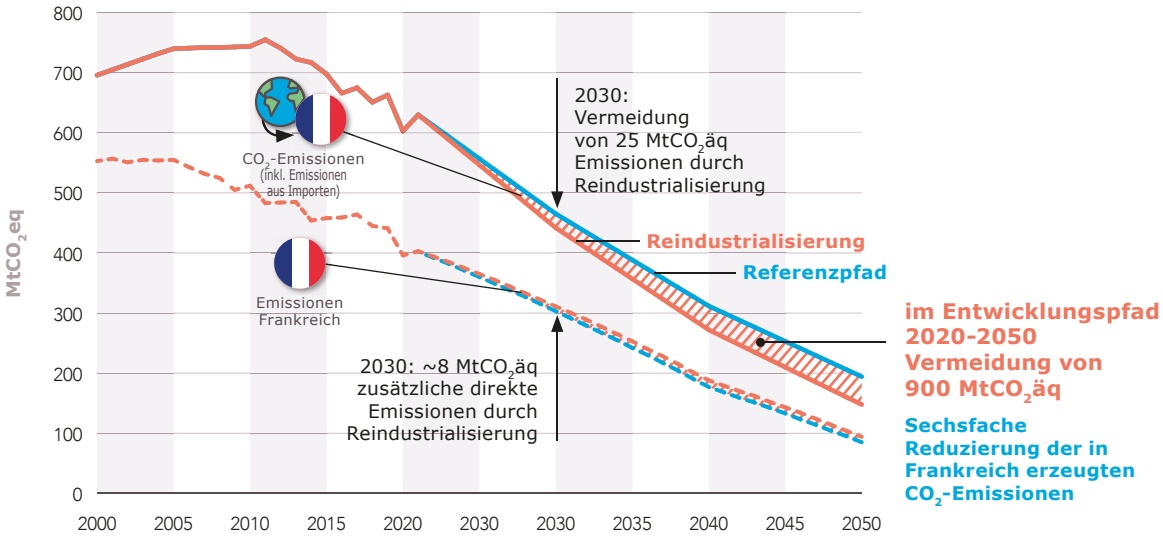
Dabei profitiert Frankreich von seinem aktuellen klimaneutraleren Mix und von seinen Klimazielen, die ehrgeiziger sind als die der meisten Länder, aus denen Frankreich Industriegüter importiert.

Ergebnisse n°3 Auswirkungen einer tiefgreifenden Reindustrialisierung auf den Stromverbrauch in Frankreich und die CO_2-Bilanz

Prognose Stromverbrauch in Frankreich mit oder ohne tiefgreifende Reindustrialisierung



Auswirkungen des Szenarios tiefgreifende Reindustrialisierung auf die französischen Emissionen und den CO2-Fußabdruck Frankreichs



im Entwicklungspfad 2020-2050 Vermeidung von 900 $MtCO_2$äq

Sechsfache Reduzierung der in Frankreich erzeugten CO_2-Emissionen

4 Ohne einen deutlichen Ausbau der erneuerbaren Energien kann die Klimaneutralität bis 2050 nicht erreicht werden.

Um bis 2050 klimaneutral zu werden, muss Frankreich mehr Strom als heute erzeugen und gleichzeitig den Großteil seiner bestehenden Anlagen ersetzen (Kernkraftwerke, aber auch erneuerbare Energien der ersten Generation). Der Großteil der Erzeugungskapazitäten, die Frankreich im Jahr 2050 mit Strom versorgen werden, existieren also heute noch nicht.

1 Die dauerhafte Erhaltung eines großen Kernreaktorparks ermöglicht eine massive Dekarbonisierung, reicht aber für die Klimaneutralität bei Weitem nicht aus.

Dank seiner Kernkraftwerke verzeichnet Frankreich erheblich niedrigere Treibhausgasemissionen als seine Nachbarn. In industrieller Hinsicht wird die Entwicklung dieses Parks langfristig jedoch durch zwei Faktoren eingeschränkt:

(1) Unabhängig von der politischen Tendenz kann die Laufzeit der Reaktoren der zweiten Generation nicht unbegrenzt verlängert werden. Die bestehenden Kraftwerke, von denen die meisten in den 1980er-Jahren gebaut wurden, müssen bis 2060 abgeschaltet werden, wobei für die 2040er-Jahre ein besonders stark ausgeprägter „Klippeneffekt" zu erwarten ist.

(2) Die neuen Reaktoren (der dritten Generation), deren Bau heute beschlossen würde, könnten bestenfalls ab 2035 Strom erzeugen, wobei alle vier Jahre ein Reaktorpaar in Betrieb genommen werden müsste. Die Möglichkeiten, die heute bestehen, um diese Inbetriebnahmen zu beschleunigen, können erst ab 2045 zu spürbaren Auswirkungen führen.

Diese Einschränkungen wurden mit den Akteuren der Kernkraftbranche geteilt, die bei der öffentlichen Konsultation zu Wort kamen. **Das derzeit weitreichendste industrielle Angebot der Branche besteht darin, bis 2050 einen Kernreaktorpark mit einer Gesamtkapazität von 50 GW zu errichten (im Szenario N03), wobei dieses Szenario eine aktive Wiederbelebung der Kernenergie voraussetzt[2].**

Diese Aussicht stellt eine enorme industrielle Herausforderung dar und ist keineswegs als eine Abkehr von der aktuellen Situation zu verstehen. Sollen bis 2050 Kernkraftwerke mit einer Kapazität von 50 GW zur Verfügung stehen, setzt dies voraus, die Lebensdauer der meisten bestehenden Reaktoren auf bis zu 60 Jahre zu verlängern, einige von ihnen sogar über diesen Zeitraum hinaus und unter Einhaltung der von der ASN auferlegten Sicherheitsvorschriften zu betreiben, in den Jahren 2035 bis 2050 14 neue Reaktoren vom Typ EPR 2 in Betrieb zu nehmen – einen Großteil davon zwischen 2040 und 2050 – und zusätzlich eine erhebliche Kapazität kleiner Kernreaktoren (SMR) zu schaffen.

Diese Prognose wird sich wahrscheinlich parallel zur zukünftigen Entwicklung ändern: Ohne neue Investitionen in die Branche wird ihre langfristig abzusehende Kapazität weiter sinken, während eine schnelle Entscheidung für eine Wiederbelebung zu einem späteren Zeitpunkt zu einer Verbesserung ihrer Perspektiven führen könnte.

Ein Kernreaktorpark von 50 GW könnte 2050 ein Volumen von rund 325 TWh liefern – etwa 50% der französischen Erzeugung im Referenzverbrauchspfad. Dies entspräche einem je nach Verbrauchsszenario fluktuierenden relativen Anteil von 60% im „Szenario Suffizienz" bzw. 44% im Szenario „weitreichende Reindustrialisierung".

2 Ein deutlicher Ausbau der erneuerbaren Energien in Frankreich ist auf jeden Fall unverzichtbar, um die Klimaneutralität zu erreichen.

Selbst ein Kernreaktorpark mit verlängerten Reaktoren und zahlreichen neuen Reaktoren reicht nicht aus, um in 30 Jahren einen Verbrauch von 645 TWh zu bedienen, geschweige denn einen Verbrauch von 750 TWh. **Die Studie kommt hier zu dem eindeutigen Schluss, dass der starke**

2. Zum Vergleich: Der aktuelle Reaktorpark, ergänzt um den EPR-Reaktor in Flamanville, wird eine installierte Leistung von 63 GW haben

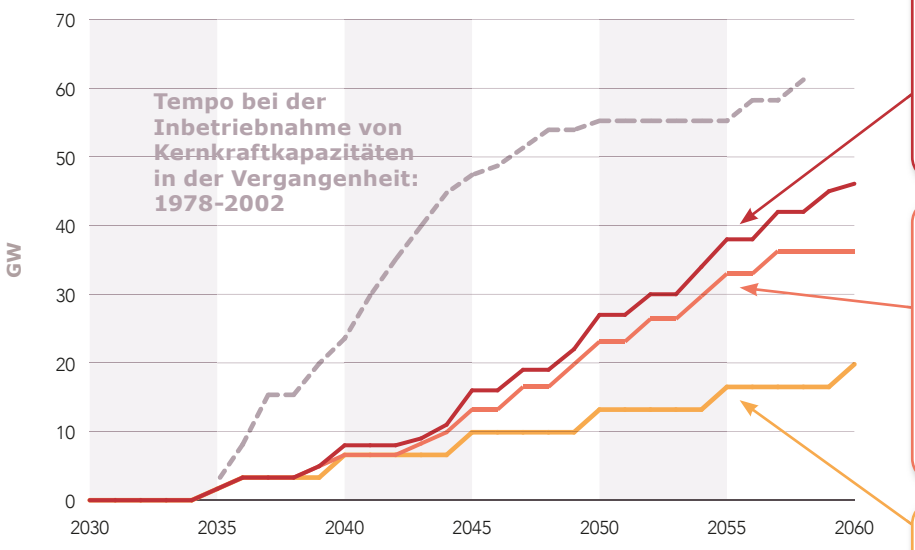
Ausbau der erneuerbaren Stromversorgung in Frankreich eine absolute Voraussetzung für die Einhaltung der Klimaverpflichtungen ist.

Demnach müssen die erneuerbaren Energien überall dort ausgebaut werden, wo dies möglich ist: Solarenergie, Onshore- und Offshore-Windenergie und nicht zuletzt die Wasserkraft, deren Wachstumspotenzial dort genutzt werden muss, wo dies unter Einhaltung der Umweltstandards noch möglich ist.

Sämtliche europäische Szenarien planen mit einem starken Ausbau der Photovoltaik und die möglichen Perspektiven für Frankreich bilden hier keine Ausnahme: Der Bestand muss innerhalb von 30 Jahren auf mindestens 70 GW (bzw. auf über 200 GW beim höchsten Entwicklungspfad) ausgebaut werden. Diese Zahlen stellen im Vergleich zu den Prognosen der Nachbarländer keine Ausnahme dar; angesichts der geringen Größe des bestehenden Kraftwerkparks (10 GW, gegenüber 13 in Großbritannien, 14 in Spanien, 21 in Italien und 54 in Deutschland) setzten sie allerdings ein sehr hohes relatives Wachstum voraus.

Die Einhaltung der Klimaziele geht zudem zwangsläufig mit dem Ausbau der Windenergie einher, einer heute ausgereiften Technologie mit niedrigen Gestehungskosten, die Strom in großen Mengen erzeugen kann. Trotz der Möglichkeit, je nach wirtschaftlichen Gegebenheiten und Akzeptanzproblemen zwischen Onshore- und Offshore-Windenergie zu „dosieren", erscheinen ein Mindestbestand von etwa 40 Gigawatt Onshore-Windenergie sowie der Bau von Offshore-Windkraftanlagen in der Größenordnung von 25 GW unbedingt erforderlich. Das Erreichen dieser Werte birgt keine wirtschaftliche oder technische Herausforderung (mit Ausnahme der schwimmenden Offshore-Windenergieanlagen), sondern ist vielmehr eine Frage der Akzeptanz, wobei diese mit der Situation in anderen europäischen Ländern verglichen werden muss: So hat Deutschland innerhalb von 15 Jahren bereits eine Onshore-Windenergiekapazität von 50 GW aufgebaut, Dänemark verfügt über 4,5 GW (bei einer Fläche von weniger als 8 % Kontinentalfrankreichs) und Großbritannien, das in 20 Jahren einen 10 GW großen Bestand an Offshore-Windenergieanlagen errichtet hat, wird bis 2030 eine Kapazität von 20 GW erreichen.

Ergebnisse n°4 In der Studie vorgesehene Entwicklungspfade der neuen Kernkraftwerke



N03: Hoch angesetzter Pfad beim Bau neuer Kernreaktoren (EPR2 und SMR)

- Notwendigkeit der Inbetriebnahme von 14 EPR und mehreren SMR zwischen 2035 und 2050, um bis 2050 (Referenzverbrauch) einen Anteil der Kernenergie am Energiemix von 50% zu erreichen.

N2: Hoch angesetzter Pfad für den Bau neuer EPR2-Reaktoren

- NNotwendigkeit der Inbetriebnahme von **14 EPR zwischen 2035 und 2050,** um bis 2050 (Referenzverbrauch) einen Anteil der Kernenergie am Energiemix von 36% zu erreichen.

N1: Niedrig angesetzter Pfad für den Bau neuer EPR2-Kraftwerke

- Notwendigkeit der Inbetriebnahme von **8 EPR zwischen 2035 und 2050,** um bis 2050 (Referenzverbrauch) einen Anteil der Kernenergie am Energiemix von 26 % zu erreichen.

5 Ein System ohne neue Kernreaktoren setzt einen schnelleren Ausbau der erneuerbaren Energien voraus als in europäischen Ländern mit der höchsten Ausbaudynamik

1 Die Szenarien „100 % erneuerbare Energien" erfordern eine hohe Akzeptanz der erneuerbaren Energien und ein stark beschleunigtes Ausbautempo.

Die Mindestgeschwindigkeit, mit der die erneuerbaren Energien ausgebaut werden müssen, um die Klimaneutralität erreichen zu können, liegt weit über der französischen Praxis der vergangenen zehn Jahre. Bei den Zielen der Szenarien mit Atomausstieg ist sie sogar noch höher. Das wirft die Frage auf, ob der Aufbau der erforderlichen Wind- und Solarenergiekapazitäten überhaupt möglich ist – sowohl im Hinblick auf die Akzeptanz durch die Anwohner als auch, bei bestimmten Branchen, auf die industrielle Entwicklung.

Die Problematik der Akzeptanz gestaltet sich je nach betrachteter Branche unterschiedlich. So wird Frankreich 2050 auf jeden Fall weniger dicht mit Onshore-Windenergieanlagen (der neuen Generation) besiedelt sein als Deutschland heute. Dennoch stehen die Auswirkungen dieses Sektors auf die Landschaftsgestaltung derzeit im Mittelpunkt heftiger Debatten und für zahlreiche Projekte wurden Widerspruchsverfahren eingeleitet. Die Offshore-Windenergie, deren Ausbau gerade erst beginnt, wirft Fragen der Vereinbarkeit mit anderen Nutzungen wie der Fischerei auf. Und der Ausbau großer Photovoltaikparks führt zu Diskussionen über eventuelle zukünftige Nutzungskonflikte mit der Landwirtschaft oder der Nutzung von Naturräumen. **Generell können die Szenarien mit Atomausstieg nicht ohne einen politischen und gesellschaftlichen „Kontext" bestehen, der die Akzeptanz dieser Anlagen begünstigt.**

In industrieller Hinsicht setzen alle Szenarien ohne neue Kernreaktoren eine starke Beschleunigung beim Ausbau der erneuerbaren Energien und insbesondere der Solar- und Offshore-Windenergie voraus. **Das Szenario M0, das einen Ausstieg aus der Kernenergie im Jahr 2050 vorsieht, stellt eine beträchtliche industrielle Herausforderung dar: Das Ausbautempo der erneuerbaren Energien übertrifft hier die Gesamtkapazitäten, die in den vergangenen Jahren in Deutschland bei den erneuerbaren Energien an Land und in Großbritannien bei der Offshore-Windenergie aufgebaut wurden.** Selbst im Szenario „Suffizienz" bleibt das für das M0-Szenario erforderliche Ausbautempo sehr hoch.

Das Gleiche gilt für die Szenarien M1 (für Solarenergie) und M23 (für Offshore-Windenergie). **Selbst ein Szenario mit Wiederbelebung der Kernenergie und einem Programm von mindestens sechs Reaktoren setzt ein äußerst hohes Tempo beim Ausbau der erneuerbaren Energien voraus.**

Dagegen gehen die Szenarien N2 und N03, die auf dem dauerhaften Erhalt eines großen Kernreaktorparks beruhen, mit einem Inbetriebnahmetempo einher, das nahe an den historischen französischen Durchschnittswerten (für Onshore-Windenergie) oder an den in der PPE vorgesehenen Entwicklungspfaden für die nächsten Jahre liegt, die mit einer Beschleunigung (bei Solar- und Offshore-Windenergie) planen. Allerdings entsprechen diese ehrgeizigen französischen Ziele nicht der heutigen Realität, denn selbst die Szenarien N2 und N03 setzen eine aktivere Förderung des Ausbaus der erneuerbaren Energien voraus.

2 Zahlreiche Strategien zum Erreichen der Klimaneutralität weltweit kommen ohne ein „100 % erneuerbares" Stromsystem aus.

Zwar verfolgen verschiedene europäische Länder Strategien, die auf Elektrifizierung und ein zu 100 % erneuerbares System setzen, aber viele Staaten planen zudem eine Ergänzung der lokalen Erneuerbare-Energien-Erzeugung. Die deutsche Strategie beruht kurzfristig weitgehend auf Gasimporten und längerfristig auf Importen von „grünem Wasserstoff"; mehrere Nordsee-Anrainerstaaten erwägen die weitere Nutzung fossiler Energieträger in Verbindung mit Systemen zur Kohlenstoffabscheidung und -verwendung und Großbritannien, die USA und China starten neue Kernkraftprogramme als Ergänzung der erneuerbaren Energien.

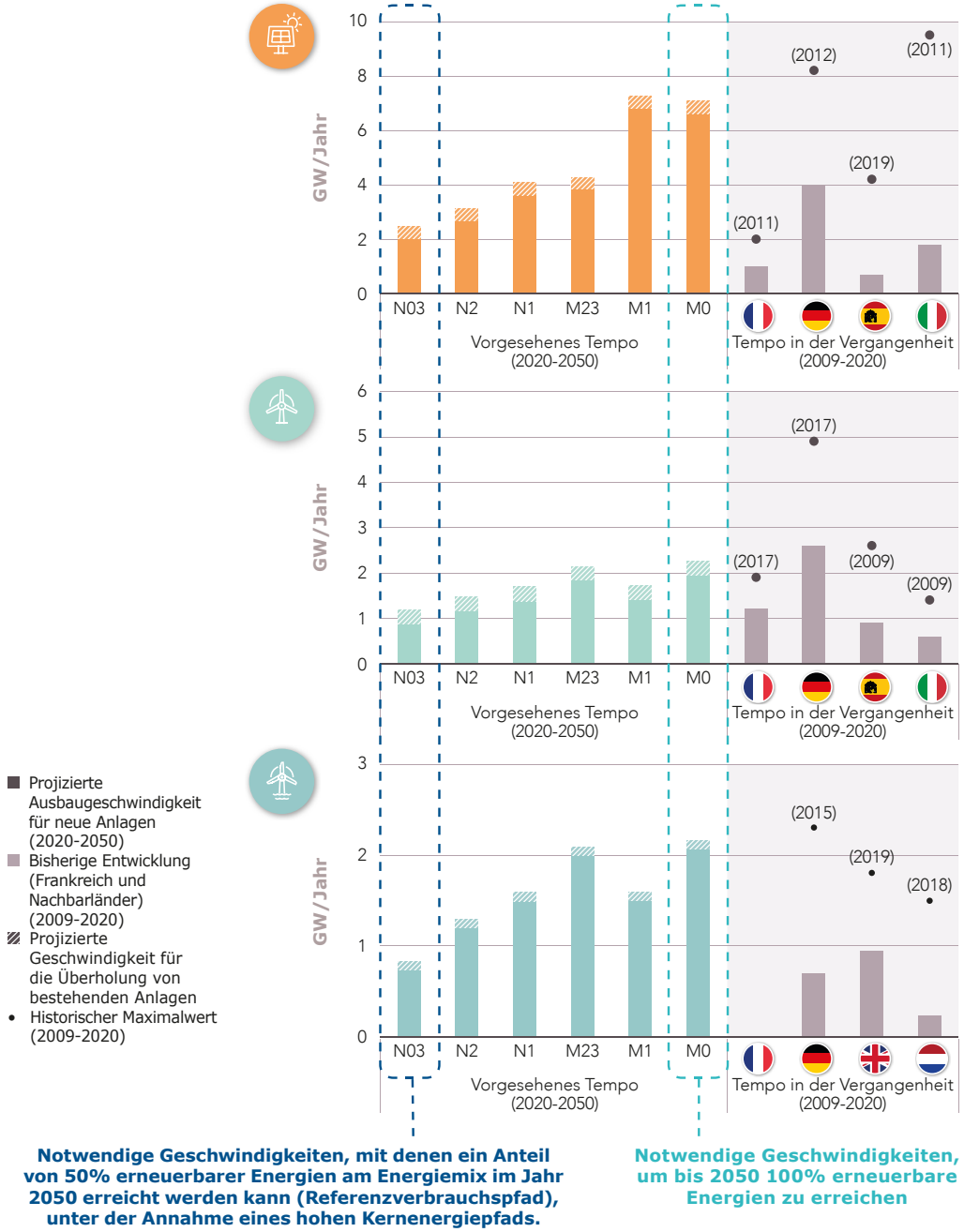
Die Szenarien der Internationalen Energieagentur und der Europäischen Kommission verhalten sich komplementär. Insbesondere das jüngste „Nettonull"-Szenario der IEA setzt auf Kernkraft

oder Kohlenstoffabscheidung und -verwendung, wenn auch in geringfügigem Maße.

Im Falle Frankreichs zeigen die technischen Analysen, dass ein Verzicht auf die Kernenergie das Erreichen der CO_2-Neutralität sehr stark beeinträchtigt. **Diese Beeinträchtigung könnte nur durch eine deutliche Beschleunigung des Ausbaus von Wind- und Solarenergie und die Betätigung sämtlicher im RTE-Szenario genannter Suffizienzhebel aufgehoben werden. Dabei müsste zudem auf bestimmte Punkte der SNBC – wie das Streben nach weitgehender Energieunabhängigkeit – verzichtet werden, es würden also klimaneutrale Energieprodukte importiert, vorausgesetzt, diese können in anderen Ländern produziert werden.**

Ergebnisse n°5

Für den Ausbau der erneuerbaren Energien erforderliches Tempo nach Szenarien (im Referenzverbrauchspfad) im Vergleich zur Vergangenheit und zu den Nachbarländern (in GW/Jahr)



Notwendige Geschwindigkeiten, mit denen ein Anteil von 50% erneuerbarer Energien am Energiemix im Jahr 2050 erreicht werden kann (Referenzverbrauchspfad), unter der Annahme eines hohen Kernenergiepfads.

Notwendige Geschwindigkeiten, um bis 2050 100% erneuerbare Energien zu erreichen

6 Der Bau neuer Kernreaktoren ist wirtschaftlich sinnvoll. Dies gilt umso mehr, wenn dadurch bis 2050 eine Kapazität von rund 40 GW erzielt wird (bestehende und neue Kernkraftanlagen).

1 Es besteht wirtschaftlicher Raum für den Bau neuer Reaktoren

Die Studie kommt zu dem relativ zuversichtlichen Schluss, dass die Szenarien mit einem Kernreaktorpark von mindestens 40 GW (N2 und N03) langfristig zu niedrigeren Kosten für die Gesellschaft führen können als ein auf große Parks aufbauendes Szenario mit 100% erneuerbaren Energien.

Dies trifft auch dann zu, wenn die durchschnittlichen „Brutto"-Gestehungskosten der neuen Kernkraftwerke höher sind als die Kosten großer Erzeugungsparks für erneuerbare Energien. Denn die Integration zahlreicher Windenergieanlagen und Solarmodule geht aufgrund von deren Fluktuation mit einem sehr hohen Flexibilitätsbedarf einher (Speicherung, Nachfragesteuerung und neue Reservekraftwerke) und erfordert eine Verstärkung der Netze (Anschluss, Übertragung und Verteilung). Werden diese Kosten eingerechnet, so führt dies zu einer höheren Wettbewerbsfähigkeit der Szenarien mit neuen Kernreaktoren.

Dieser Effekt ist umso deutlicher, je größer der Kernreaktorpark angelegt wird (in N2 fast 40 GW), um die Kosten für einen französischen *„Power-to-Gas-to-power"*-Kreislauf oder für massive Netzverstärkungen zu vermeiden.

Wenn die Kosten für die neuen Kernreaktoren nicht sinken, sondern vergleichbar mit dem EPR Flamanville bleiben, so fällt dieser Vorteil erheblich schwächer aus, bleibt aber dennoch bestehen.

Die M-Szenarien („100% erneuerbare Energien") erscheinen im Vergleich zu den N-Szenarien umso teurer, je schneller der Atomausstieg erfolgt (2050 im Szenario M0) oder je weniger auf große Wind- oder Solarparks (M1-Szenario mit vermehrt kleinen Solaranlagen) gesetzt wird.

2 Ihre Wirtschaftlichkeit hängt vom Zugriff auf Finanzierungsmöglichkeiten ab, die nicht wesentlich von den übrigen klimaneutralen Technologien abweichen.

Die neuen Kernreaktoren zeichnen sich durch eine starke Kapitalintensität sowie durch lange Bauzeiten und Lebensdauern aus. Daher ist ihre Wettbewerbsfähigkeit stark von ihren Finanzierungskosten – den durch die Kapitalrendite bedingten Kosten – abhängig.

Ungünstige Finanzierungsbedingungen, beispielsweise aufgrund einer fehlenden öffentlichen Förderung oder eines erschwerten Zugriffs auf EU-Fördermittel, würden die Gesamtkosten der Kernenergieerzeugung erhöhen, was sich wiederum auf die Gesamtkosten des Stromsystems auswirken würde. Liegt dieser Unterschied bei drei Prozent der Kapitalkosten, so entsprechen die Kosten eines Szenarios mit neuen Reaktoren dem Szenario „100% erneuerbare Energien", das auf große Parks aufbaut und die beste wirtschaftliche Bilanz bietet (M23).

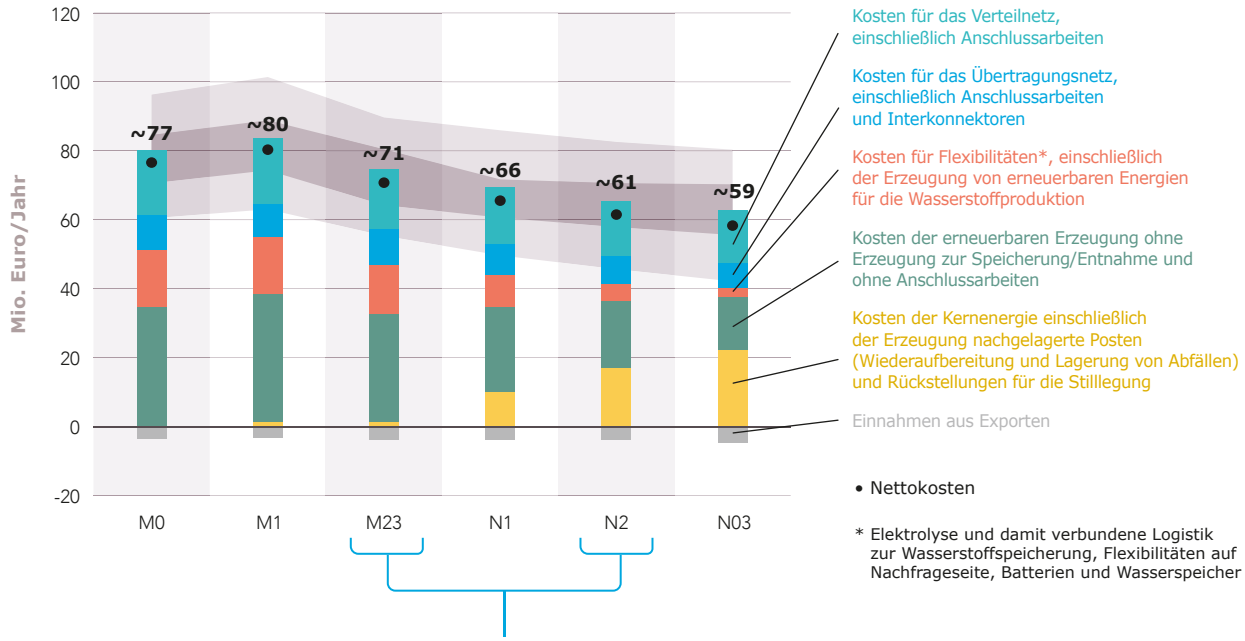
3 Bei der überwiegenden Mehrheit der Varianten kann ein wirtschaftlicher Vorteil festgestellt werden.

Im Referenzfall für die Entwicklung der Technologiekosten beläuft sich der Kostenunterschied zwischen den Szenarien M23 und N2 auf rund 10 Milliarden Euro pro Jahr, wobei für diese Zeitspanne die Kosten sowohl der Kernenergie als auch der erneuerbaren Energien oder Speichermittel schwer zu bestimmen sind. Daher ist es mit Blick auf die Methodik notwendig, eine große Anzahl von Varianten und Stresstests zu analysieren, um die aussichtsreichsten Optionen zu identifizieren.

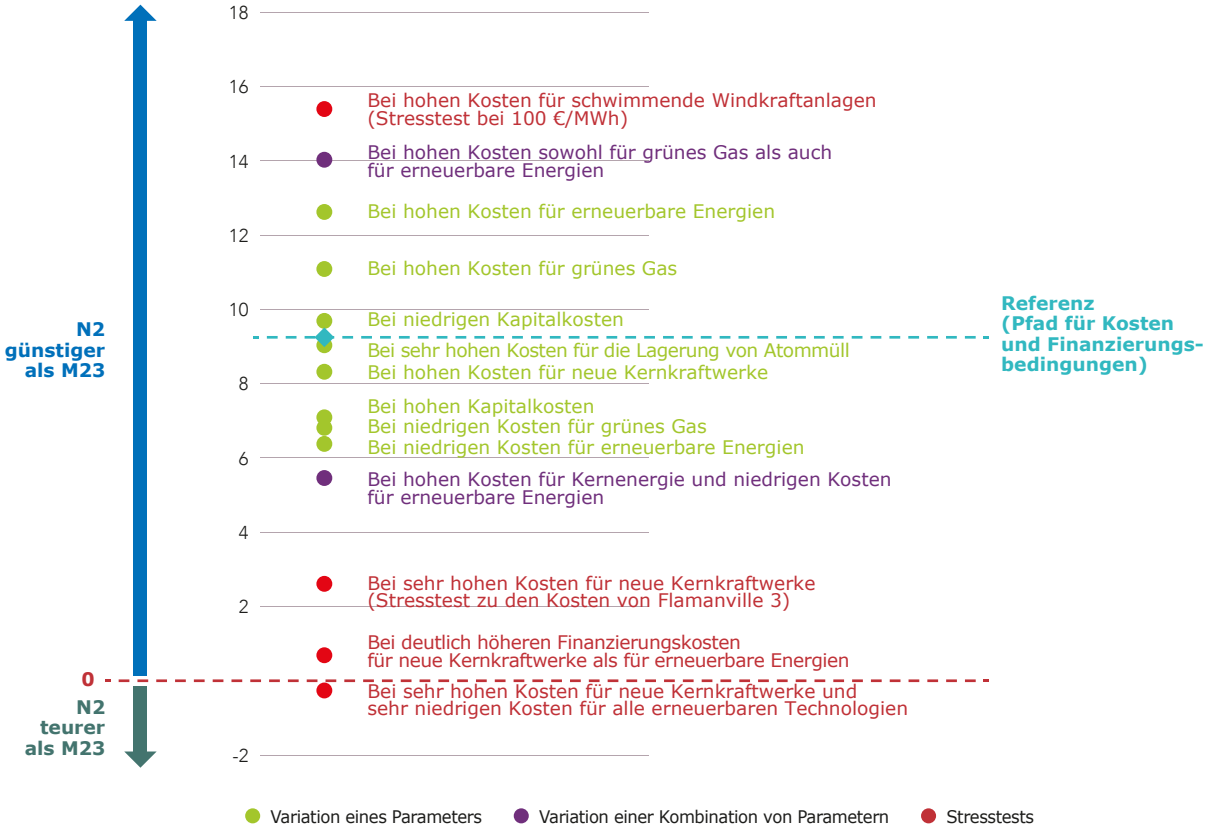
Aus der RTE-Untersuchung geht hervor, dass die Differenz zwischen den wirtschaftlichen Kosten von M23 und N2 in der überwiegenden Mehrheit der getesteten Konfigurationen in die gleiche Richtung weist, selbst dann, wenn die ungünstigsten Bedingungen für die Kosten oder die Finanzierungsbedingungen der neuen Kernkraftwerke angesetzt werden. Umgekehrt hängt die Wettbewerbsfähigkeit der Szenarien mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energien von verschiedenen Faktoren ab, darunter die Wirtschaftsleistung des Ausbaus der schwimmenden Windenergie: Ist diese nicht gegeben, so vergrößert sich die Differenz.

Ergebnisse n°6 Gesamtkosten (Erzeugung + Transport + Flexibilitäten) in Frankreich nach Szenarien (im Referenzverbrauchspfad) **bis 2060,** im zentralen Fall und nach Varianten

Pro Jahr berechnete Gesamtkosten der Szenarien bis 2060



Entwicklung der Differenz der jährlich Berechneten Gesamtkosten zwischen den Szenarien nach Varianten



7 Die strombasierten erneuerbaren Energien haben sich zu wettbewerbsfähigen Lösungen entwickelt. Besonders deutlich ist dies bei großen Solarparks sowie Onshore- und Offshorewindparks.

1 Die Kosten eines Szenarios mit 100 % erneuerbaren Energien, das auf große Windparks aufbaut, können sich den Kosten der Szenarien mit neuen Reaktoren annähern, sofern sie sich auf ein leistungsfähiges und flexibles „Wasserstoffsystem" stützen und die schwimmende Windenergie erfolgreich einsetzen.

Infolge der politischen Maßnahmen zum Ausbau der erneuerbaren Energien, die in den vergangenen Jahren in verschiedenen Regionen der Welt ergriffen wurden, hat sich die technologische Reife der großen Wind- und Photovoltaikparks erheblich verstärkt: **Ihre Kosten sind heute äußerst wettbewerbsfähig und liegen jetzt unter denen von Wärme- und Kernkraftwerken.**

Langfristig können die Kosten eines Systems, das zu 100 % auf erneuerbaren Energien beruht, unter folgenden Voraussetzungen an die eines Systems mit neuen Kernreaktoren heranreichen:

(i) Es wird auf die ausgereiftesten Technologien und die Entwicklung großer Parks gesetzt, um Größenvorteile nutzen zu können.

(ii) Die Herausforderung der schwimmenden Offshore-Windenergie wird erfolgreich bewältigt, sodass ein ähnlicher Kostenrückgang wie in den vergangenen Jahren bei der Windenergie an Land erreicht wird.

(iii) Für erneuerbare Energien werden günstige Finanzierungskosten geboten, wobei zumindest die öffentliche Förderung über die Einspeisevergütung und Marktprämien erhalten bleiben.

(iv) Die Kosten der Flexibilitätssysteme werden beschränkt, insbesondere für das dem Ausgleich der Fluktuation der Windenergie dienende System: ein wettbewerbsfähiges und gemeinsam genutztes „Wasserstoffsystem" (Speicherung und Netz), der mögliche punktuelle Einsatz von Biomethan, wenn dieses ausreichend entwickelt ist, usw.

2 Die Entwicklung großer Erneuerbare-Energien-Parks ist umso mehr wirtschaftlich vorteilhaft, wenn sie nicht zu einem erheblichen Ausbau der Flexibilitäten führt.

Bleibt der Flexibilitätsbedarf gering, wie dies heute der Fall ist, so ist der Ausbau der erneuerbaren Energien wirtschaftlich äußerst interessant, da ihre Gesamtkosten im Verhältnis zu ihren Erträgen niedriger sind als die neuer Kernreaktoren.

Das Erreichen eines den heutigen Wert übertreffenden Anteils erneuerbarer Energien ist somit nicht nur eine industrielle und klimapolitische Notwendigkeit, sondern auch in wirtschaftlicher Hinsicht sinnvoll.

Dieser rein wirtschaftliche Vorteil verringert sich und verliert sich in dem Maße, wie ein Flexibilitätsbedarf auftritt und wächst. Die im Rahmen der „Energetischen Zukunftsperspektiven 2050" durchgeführten Simulationen zeigen, dass dieser Bedarf zunächst in den Nachbarländern auftreten wird, in denen der Anteil von Wind- und Solarenergie höher ist als in Frankreich.

Für Frankreich zeigt die wirtschaftliche Analyse, dass der Gewinn aus dem Umstieg von einem Kernkraftwerkspark mit 40 GW (N2 – d. h. rund 36 % Kernkraftanteil am Referenzverbrauch) auf ca. 50 GW (N03 – rund 50 % Kernkraftanteil am Referenzverbrauch) in den meisten untersuchten Konfigurationen gering ist und von vielfältigen Parametern beeinflusst werden kann. Zur genauen Einschätzung der Kipppunkte werden weitere Analysen erforderlich sein, da hier auch der Grad der Vernetzung Frankreichs mit seinen Nachbarn eine Rolle spielt.

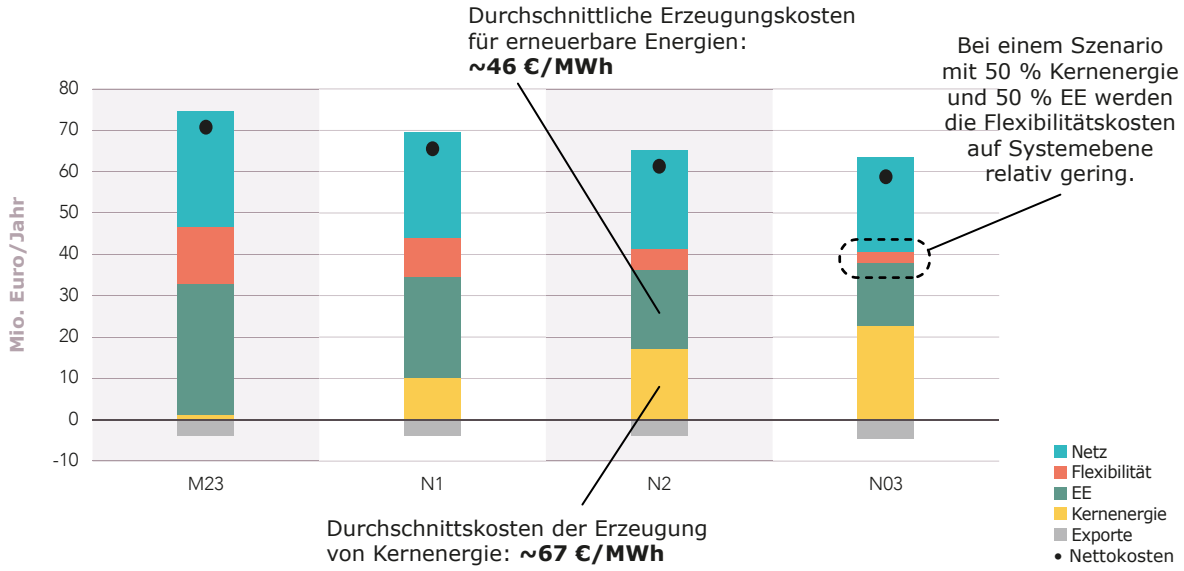
3 Szenarien, die von einem Ausstieg aus der Kernenergie ab 2050 (M0) ausgehen oder überwiegend auf dezentrale Solarenergie setzen (M1), sind erheblich teurer als andere Optionen.

Das Erreichen von 100 % erneuerbaren Energien bis 2050 (M0) ist entlang des gesamten Entwicklungspfads mit höheren Kosten verbunden. Dies liegt daran, dass der Ausbau der erneuerbaren Energien hier zu einem früheren Zeitpunkt einsetzt – weshalb der fortdauernde Kostenrückgang in diesen Branchen noch nicht in vollem Umfang greifen kann – und dass die bestehenden Kernreaktoren vorzeitig stillgelegt werden.

Wird mit dem Erreichen von 100 % erneuerbaren Energien bis 2060 (M1) und gleichzeitig mit einem dezentral angelegten Mix aus erneuerbaren Energien geplant, so fallen die Gestehungskosten teurer aus, da Aufdach-Solaranlagen mit höheren Kosten verbunden sind als große PV-Freiflächen- oder Windenergieanlagen und hier zudem mehr Batterien benötigt werden. Die gleichmäßigere Verteilung der Erzeugung über ganz Frankreich ermöglicht einen leichten Rückgang der Übertragungsnetzkosten, führt allerdings zu geringfügig erhöhten Verteilnetzkosten.

Dennoch hebt die Bewertung entsprechend M1 weder das Ziel eines verstärkten Eigenverbrauchs im Interesse der Verbraucher noch die Bedeutung des Strebens nach einer besseren Abstimmung zwischen Erzeugung und Verbrauch auf. Daher müssen die Untersuchungen zu M1 im Rahmen der für Anfang 2022 erwarteten weiterführenden Analysen fortgesetzt werden.

Ergebnisse n°7 Pro Jahr berechnete Gesamtkosten **bis 2060**



* Zentrale Annahme der Technologiekosten und Kapitalkosten bei 4 %.

8

Die vom System zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit benötigten Steuerungsmittel sind je nach Szenario sehr unterschiedlich. In wirtschaftlicher Hinsicht kommt es darauf an, den Verbrauch stärker zu steuern, Interkonnektoren und Wasserkraftspeicher auszubauen und die Solarenergie mithilfe von Batterien zu unterstützen. Der Bedarf an neuen und auf klimaneutrale Gasvorräte (wie Wasserstoff) aufbauenden Wärmekraftwerken ist hoch, wenn die Kernenergie nur in geringem Maße neu belebt wird, jedoch massiv – und damit teuer – wenn 100 % erneuerbare Energien angestrebt werden.

Unabhängig von der Entscheidung bezüglich der Wiederaufnahme eines Kernenergieprogramms wird das Stromsystem der Zukunft größtenteils auf fluktuierende erneuerbare Energien aufbauen. Es wird mit regelmäßigen Tag-Nacht-Zyklen (Solarenergie) umgehen müssen, aber auch mit sehr großen Schwankungen der Windenergieerzeugung auf Wochen-, Monats- oder sogar Jahresebene. Darin liegt eine große technische Herausforderung.

Der Betrieb eines derartigen Systems setzt den Ausbau von „Flexibilitäten" voraus. Hinter diesem Sammelbegriff, der aufgrund seines selten präzise beschriebenen Inhalts gerne als globale Lösung herangezogen wird, verbergen sich die unterschiedlichsten Technologien, zeitlichen Abläufe und Kosten.

Der Ausbau von Flexibilitäten stellt eine gemeinsame Herausforderung der verschiedenen Szenarien dar und zieht politische und organisatorische Konsequenzen nach sich. Die Digitalisierung wird eine immer wichtigere Rolle spielen, um in Echtzeit komplexe Stromsysteme steuern zu können, die aus stärker verteilten und witterungsabhängigen Erzeugungsanlagen bestehen. Dies wird neue Risiken mit sich bringen (Cybersicherheit, Datenkontrolle). Die gegenseitige Abhängigkeit zwischen verschiedenen Landesteilen, aber auch auf europäischer Ebene, wird ansteigen, da das Wachstum der erneuerbaren Energien nicht etwa das System „dezentralisiert", sondern zu stärkeren gemeinsamen Nutzungen führen wird. Schließlich erfordert ein flexibleres System auch den Aufbau von Infrastrukturen – sowohl für das Netz als auch im Speicherbereich: von kleinen, verteilten Batterien bis hin zu neuen Gaskraftwerken, die dekarbonisierte Gasvorräten nutzen.

1 Die Stärkung der Interkonnektoren zwischen Frankreich und seinen Nachbarländern kann starke Einsparungen bewirken, führt jedoch auch zu einer starken gegenseitigen Abhängigkeit der europäischen Partner.

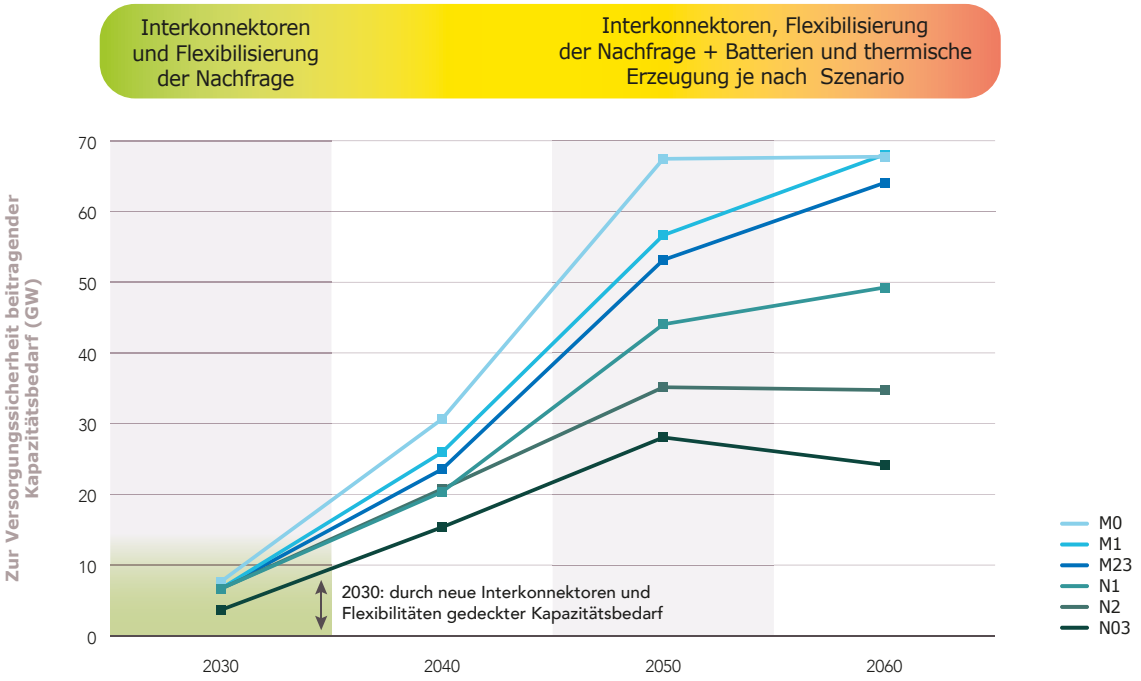
Je stärker das System vernetzt ist, umso geringer der in den verschiedenen Gebieten erforderliche Flexibilitätsbedarf: Dank dieser technischen Gegebenheit konnte die Effizienz des Stromsystems in Frankreich im 20. Jahrhundert stark verbessert werden. In den kommenden Jahren kann sie auf europäischer Ebene weiter verstärkt werden, was sich für die französischen Verbraucher vorteilhaft auswirken kann.

Eine Importkapazität von 39 GW bis 2050 (gegenüber 13 GW heute) stellt einen gelungenen Kompromiss zwischen wirtschaftlichem Optimum und technisch-politischem Realismus dar.

Interkonnektoren erleichtern zwar die Einspeisung großer Mengen erneuerbarer Energien erheblich, erfordern aber im Gegenzug die Akzeptanz des Prinzips einer gegenseitigen Abhängigkeit auf europäischer Ebene (die Versorgungssicherheit Frankreichs würde zu 5 % der Zeit von seinen Nachbarn abhängen, gegenüber derzeit 1 %) sowie eine gute Koordinierung der energiepolitischen Entscheidungen, da der Umfang und die Art der in Frankreich zu installierenden „Back-up"-Kapazitäten ebenfalls durch die Situation in den Nachbarländern bedingt ist). **Gleichzeitig würde sich Frankreich damit von Ländern unabhängig machen, die Erdöl und fossiles Gas fördern. Die Szenarien der Klimaneutralität verhelfen also zu echter Energiesouveränität.**

Der Vorschlag eines Ausbaus der Interkonnektoren ging aus der wirtschaftlichen Analyse hervor, stellt

Ergebnisse n°8 Bedarfsentwicklung der neuen flexiblen Kapazitäten, die zur Versorgungssicherheit beitragen (zusätzlich zur eigenen Flexibilität der Kernenergie-Erzeugungsanlagen und erneuerbaren Energien)



jedoch keine Verpflichtung dar. Andere Entscheidungen können erwogen werden, wie etwa eine geringere Interdependenz, die aber mit höheren Systemkosten verbunden ist. Unabhängig von dieser Wahl bleibt die Größenordnung der Kostenunterschiede zwischen den getesteten Erzeugungsmix-Szenarien gleich.

2 Die Errichtung neuer Wärmekraftwerke, die sich auf die Langzeitspeicherung von „dekarbonisiertem Gas" stützen, erscheint in den Szenarien ohne starke Wiederbelebung der Kernenergie als unbedingt notwendig.

Ein starker Ausbau der erneuerbaren Energien wie Wind- oder Solarenergie ist ohne deren Ergänzung durch steuerbare Produktionsmittel nicht denkbar. So muss das System in der Lage sein, mehrere Wochen dauernde windstille Phasen mithilfe von gespeicherter Energie zu überbrücken, was mit Batterien oder einer intelligenten Nachfragesteuerung nicht möglich ist. Dieser Bedarf kann nicht allein über die Speicher von Wasserkraftwerken gedeckt werden und so liegt die einzige Lösung in Kernkraft- oder Wärmekraftwerken, die dekarbonisierte Gasvorräte nutzen.

Die Errichtung neuer dekarbonisierter Wärmekraftwerke stellt in diesen Szenarien eine technische Verpflichtung dar. In Frankreich wird der Bedarf hier umso größer sein, je stärker der Kernreaktorpark reduziert wird. In Szenarien mit 100% erneuerbaren Energien oder bei einer geringen Wiederbelebung der Kernkraft ist er massiv und würde mit rund 30 GW mehr Wärmekraftwerke voraussetzen als Frankreich seit den 1970er-Jahren hatte (heute verfügt Frankreich über 16 mit fossilem Gas betriebene Kraftwerke). Die Szenarien mit einer starken Wiederbelebung der Kernenergie können auch ohne die Errichtung neuer Wärmekraftwerke auskommen, vorausgesetzt, es besteht eine hochgradige und reibungslose funktionierende Vernetzung mit dem europäischen Stromsystem.

Diese Kraftwerke werden jedoch nur wenig in Betrieb sein, denn ihre Aufgabe besteht darin, bei Ausfall anderer Erzeugungsarten als „Back-up" zur Verfügung zu stehen.

3 Speicherung in Wasserkraftwerken, Nachfragesteuerung und Batterien sind sinnvolle Lösungen, um Schwankungen auf Tages- oder gar Wochenebene auszugleichen.

Der Ausbau der Speicherkapazitäten von Wasserkraftwerken (Pumpspeicherkraftwerken) und der intelligenten Nachfragesteuerung (in Gebäuden und im Verkehr anhand von intelligenten Aufladesystemen für Elektrofahrzeuge) sind sowohl in technischer als auch in wirtschaftlicher Hinsicht unbedenkliche Lösungen, da ihre Rentabilität auf jeden Fall gegeben ist. Die mit ihnen verbundenen Herausforderungen sind somit ganz anders gelagert: Umweltauswirkungen bei der Wasserkraft, politische oder gesellschaftliche Akzeptanz bei der Nachfragesteuerung.

Auch die optimale Ausnutzung des Flexibilitäts- oder sogar Speicherpotenzials von Elektrofahrzeugen erscheint interessant. Dabei geht es in erster Linie um das intelligente Aufladen von Fahrzeugen (tagsüber, wenn viel Solarenergie erzeugt wird, am Wochenende oder nachts durch automatische Systeme, wenn die Fahrzeuge nicht genutzt werden): Der Nutzen sowohl für den Verbraucher als auch für das System ist groß, zumal keine zusätzlichen Kosten entstehen. Die Möglichkeit, Batterien zusätzlich auch als Speicher einzusetzen (vehicle-to-grid) stellt eine zusätzliche Option dar, ist aber bei den meisten der untersuchten Konfigurationen nicht zwingend erforderlich.

Die Speicherung durch große, speziell für das Stromsystem vorgesehene Batterien wiederum stellt eine geeignete Lösung für Szenarien dar, die auf einen sehr starken Ausbau der Solarenergie setzen, ist jedoch nicht in allen Szenarien unverzichtbar.

Ergebnisse n°8 Überblick zum Bedarf an flexiblen Kapazitäten, die 2050 zur Versorgungssicherheit beitragen (im Referenzverbrauchspfad)

FLEXIBILITÄTSBEDARF

Bedarf

- Hoher Flexibilitätsbedarf in allen Szenarien, zwischen 28 GW und 68 GW
- Viel stärker ausgeprägter Bedarf in Szenarien mit sehr hohem Anteil an erneuerbaren Energien

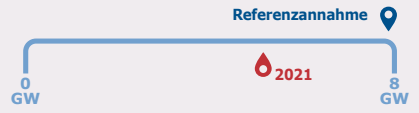
BEDARF AN NEUEN KAPAZITÄTEN*

FLEXIBILITÄTSHEBEL

Wasserkraft

- Begrenzter Ausbau (<1 GW) der steuerbaren Wasserkraft (ohne Pumpspeicherkraftwerke), hauptsächlich durch die Umrüstung bestimmter Anlagen
- Ausbau von Pumpspeicherkraftwerken um rund 3 GW (von 5 auf 8 GW) unter Ausnutzung des technischen Potenzials

INSTALLIERTE KAPAZITÄTEN



CCG/TAC

- Sehr hoher Bedarf an neuen Wärmekraftwerken in allen Szenarien mit 100 % erneuerbaren Energien, in N1 oder sogar in N2
- Die Kraftwerke müssen mit klimaneutralem Gas (Wasserstoff, Synthese-Methan, Biomethan) betrieben werden.
- Ihre Nutzungsdauer wird im Durchschnitt gering und je nach Jahr sehr unterschiedlich ausfallen, hauptsächlich im Winter

INSTALLIERTE KAPAZITÄTEN

Batterien

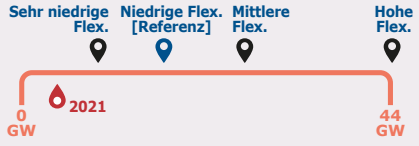
- Der Ausbau der Batterien hängt direkt von der installierten Photovoltaikkapazität ab.
- Mögliche Abwägungen zwischen Batterien und Verbrauchssteuerung
- Tägliche Nutzung der Batterien (Speicherung der Photovoltaikenergie am Tag und Abgabe am Abend/Morgen)

INSTALLIERTE KAPAZITÄTEN

Verbrauch

- Starker Ausbau der Flexibilität auf Verbrauchsseite, vor allem durch (i) Entwicklung neuer Nutzungsarten (Elektrofahrzeuge, Elektrolyse) und (ii) Elektrifizierung von Industrieprozessen.
- Eine zurückhaltende Referenzkonfiguration ohne riskante Annahmen bezüglich Technologie oder Akzeptanz und Varianten, die Unsicherheiten widerspiegeln.
- Eine gemeinsame Annahme für alle Szenarien, abgesehen von Situationen mit Überkapazitäten im Verhältnis zum Bedarf (N03) oder Auswirkung des Ausbaus des Eigenverbrauchs (M1).

MITTLERE LEISTUNG STEUERBAR/MODULIERBAR



Interkonnektoren

- Ein wirtschaftlicher Anreiz für Frankreich und Europa, die Interkonnektoren sehr weit auszubauen, um die Flexibilitätshebel gemeinsam zu nutzen
- Zunehmende gegenseitige Abhängigkeit der nationalen europäischen Stromsysteme und dadurch entstehende Fragen der politischen Akzeptanz
- Ein gefundener Kompromiss zwischen wirtschaftlicher Option (~45 GW) und technischem bzw. politischem Realismus
- Verschiedene Varianten, um Unsicherheiten widerzuspiegeln

IMPORTKAPAZITÄT

* Der Flexibilitätsbedarf wird in „perfekten" GW ausgedrückt (100 % verfügbar und ohne Aktivierungsbeschränkungen)

9 In allen Szenarien ist der Erfolg der Energiewende von einer schnellen Neudimensionierung der Stromnetze abhängig.

1 Die Netze als Herzstück der Energiewende

Die öffentliche Debatte über den Stromsektor dreht sich vor allem um die Erzeugungsquellen. In der Praxis jedoch geht es jedoch vor allem darum, eine Netzindustrie aufzubauen, bei der sämtliche Erzeugungsquellen und Verbrauchsstandorte ständig miteinander verbunden sind und die im Unterschied zu anderen Industrien einen ständigen Netzausgleich gewährleisten muss. Das bedeutet, dass jede neue Erzeugungs-, Speicher- oder Verbrauchsanlage einen Anschluss und möglicherweise eine Netzanpassung benötigt. In der Gleichung der Energiewende spielen die Netze somit eine wesentliche Rolle.

Eine erfolgreiche Energiewende setzt die beschleunigte Umwandlung dieser Netze voraus. Fragen etwa bezüglich der industriellen Dynamik dieser Entwicklung und ihrer Finanzierung müssen dabei auf lange Sicht behandelt werden. So erstreckt sich der Aufbau einer neuen Infrastruktur über mehrere Jahre, um Studien durchzuführen und die bau-, umwelt- und energierechtlichen Genehmigungen einzuholen. Sind die Infrastrukturen erst einmal aufgebaut und in Betrieb genommen, können sie bei regelmäßiger und gebührender Instandhaltung teilweise mehr als 80 Jahre lang funktionieren.

Bereits in den kommenden Jahren müssen die Netzanschlüsse vervielfacht werden und das hierfür erforderliche Tempo wird die entsprechenden Stakeholder (lokale Behörden, Industriebranche, Erzeuger, Verbände) vor eine technische und organisatorische Herausforderung stellen.

Dieser Wandel muss sich zudem in einem gesellschaftlichen Kontext vollziehen, der schnelle Ergebnisse erfordert, während gleichzeitig systematische Widerstände auftreten, obwohl diese Infrastrukturen unverzichtbar für die Energiewende sind. Dies führt zu einer paradoxen Situation.

2 Übertragungsnetze: strukturelle und vor allem in Szenarien mit 100 % erneuerbaren Energien wesentliche Entwicklungen ab 2030

RTE hat 2019 sein Zehnjahresschema zur Entwicklung des Stromnetzes *(Schéma décennal de développement du réseau,* SDDR) veröffentlicht und dieses wurde seitdem sowohl von der Ministerin als auch von der französischen Regulierungsbehörde für Energie *(Commission de Régulation de l'Énergie,* CRE) bestätigt. Angestrebt wird, mit einer Investition von 33 Milliarden Euro über 15 Jahre das Netz auf ein Niveau zu bringen, auf dem der in der PPE geplante Mix integriert und die Erneuerung von teilweise auf die Nachkriegszeit zurückgehenden Infrastrukturen eingeleitet werden kann.

Dabei handelt es sich jedoch nur um einen ersten Schritt. Nach 2030 werden sich die notwendigen Entwicklungen sowohl bei der Anpassung an die Veränderungen im Strommix als auch zur Erneuerung seiner ältesten Bestandteile beschleunigen.

Wird ein System mit hohem Erneuerbaren-Anteil angestrebt, so müssen bedeutende strukturelle Entwicklungen am Netz vorgenommen werden: neue Nord-Süd-, aber auch Ost-West-Verbindungen, Ausbau der Interkonnektoren, Anschluss großer Offshore-Parks (stehend oder schwimmend). Gleichzeitig wird der Investitionsbedarf für die Erneuerung der ältesten Infrastrukturen (in den 1950er und 1960er Jahren gebaute Leitungen) weiter steigen.

Das Tempo des Zehnjahresschemas zur Entwicklung des Stromnetzes muss in allen Szenarien beibehalten oder sogar stark beschleunigt werden, so in den Szenarien M und vor allem N1, das ein mehr als doppelt so schnelles Vorgehen voraussetzt.

3 Verteilnetz: kostenintensive Anpassungen an den Verbrauchsanstieg und Anschluss neuer Erzeugungsanlagen, dabei teilweise 100-prozentige Kostenschwankungen

Die Beschreibung der Strommix-Szenarien enthält erstmals eine Einschätzung des Investitionsbedarfs für das Verteilnetz. Diese stützt sich auf Analysen von Enedis.

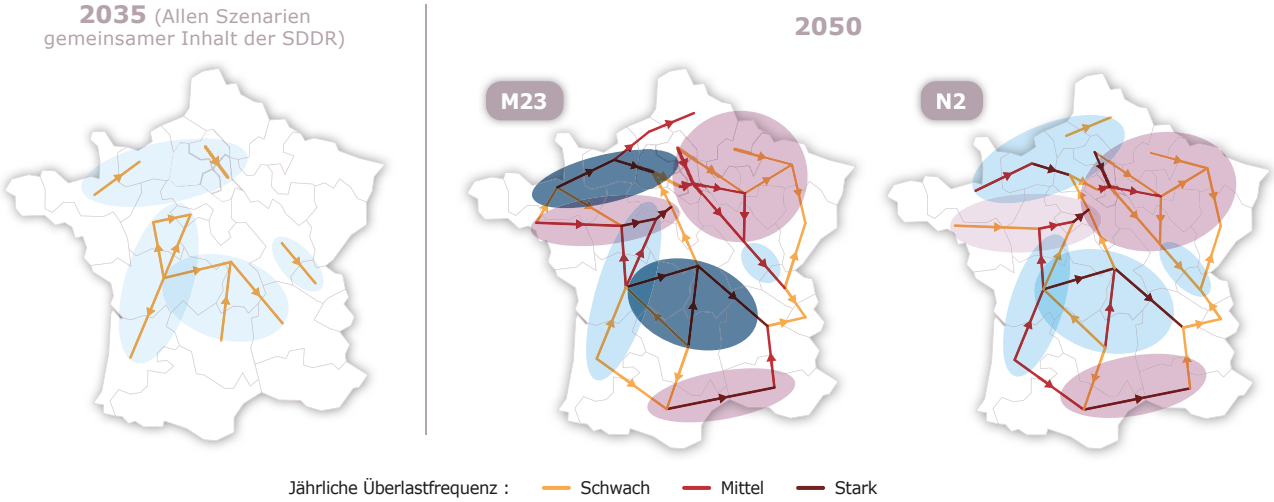
Für den Zeitraum 2021-2035 werden Investitionen von 61 Mrd. Euro veranschlagt, um die fluktuierende und nicht steuerbare Erzeugung zu

integrieren, eine steigende Stromnachfrage und die Elektrifizierung der Nutzung zu bewältigen und neue Nutzungsarten zu begleiten, ohne den bestehenden Zuverlässigkeitsgrad zu gefährden. Dieses Industrieprogramm ist von nationaler Reichweite, aber seine Umsetzung erfolgt auf lokaler Ebene und in Absprache mit den betroffenen Akteuren. Enedis wird hierzu einen Netzausbauplan erstellen.

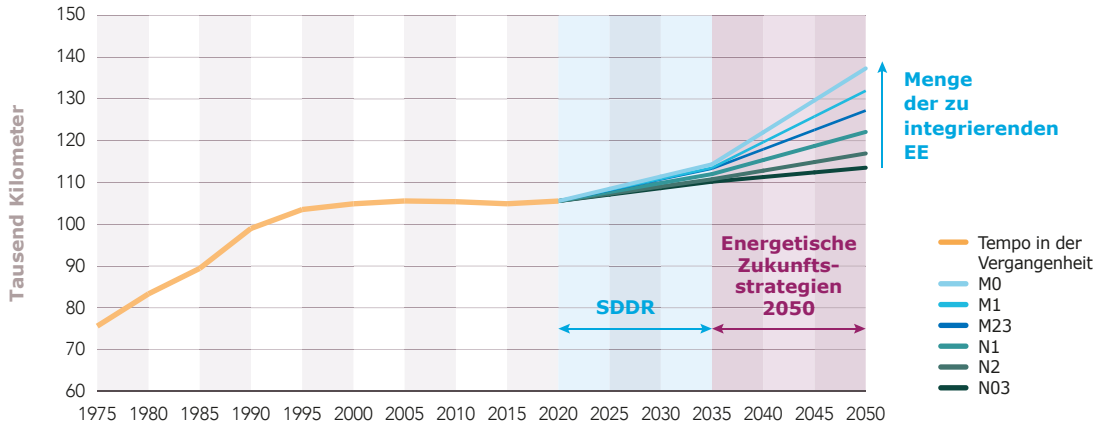
Auf längere Sicht gestalten sich die von Enedis verfolgten Pfade je nach Szenario sehr unterschiedlich. Allein die Kosten, die entstehen, um das Netz an den Verbrauch und an neue Erzeugungsanlagen anzupassen, können um 100 % variieren. Mit durchschnittlich 2 bis 4 Mrd. Euro/Jahr können sie im Zeitraum 2020-2050 ein Niveau erreichen, das über dem Tempo der vergangenen Jahre liegt. Der Investitionsbedarf für das Verteilnetz wird daher in Szenarien mit einem starken EE-Anteil höher ausfallen, und dies umso mehr, wenn dezentrale und an das Nieder- und Mittelspannungsnetz angeschlossene Anlagen (insbesondere kleine Solaranlagen) eingesetzt werden.

Ergebnisse n°9 Perspektiven der Anpassung des öffentlichen Verkehrsnetzes in den verschiedenen Szenarien

Entwicklung der Fragilitätszonen des SDDR in den Szenarien M23 und N2



Entwicklung der Länge der Regionalnetze und großen Netze



10 Die Bereitstellung eines leistungsstarken „klimaneutralen Wasserstoffs" erweist sich als äußerst vorteilhaft für die Dekarbonisierung bestimmter Sektoren, die sich schwer elektrifizieren lassen. In Szenarien mit einem sehr starken Ausbau der erneuerbaren Energien ist sie zur Energiespeicherung unverzichtbar.

In der Energiedebatte spielt der klimaneutrale Wasserstoff erst seit Kurzem eine Rolle, hat aber stark an Bedeutung gewonnen. Denn die Aussicht auf eine „Wasserstoffrevolution" kann hier als verheißungsvolle Lösung erscheinen: ein Energieträger mit Flexibilitätspotenzial, der mithilfe von klimaneutralem Strom in großen Mengen erzeugt und in vielen Bereichen anstelle von fossilem Gas eingesetzt werden kann.

In wirtschaftlicher Hinsicht bestehen jedoch noch zahlreiche Unsicherheiten. So kommt es regelmäßig zu Unklarheiten hinsichtlich der Funktionen des Wasserstoffs einerseits als Lösung für die Dekarbonisierung der Energieversorgung und andererseits als Zwischenlösung für die Speicherung im Zuge der Stromerzeugung.

1 Ein maßgeblicher Hebel: Dekarbonisierung der bestehenden Wasserstoffnutzung und Ausbau neuer Nutzungsmöglichkeiten in Industrie und Güterverkehr

Wasserstoff bietet sich in erster Linie zur Dekarbonisierung von Sektoren an, die in technischer oder wirtschaftlicher Hinsicht schwer oder gar nicht zu elektrifizieren sind. Dabei geht es vorrangig darum, den derzeit von der französischen Industrie für ihre Prozesse (in Raffinerien, Herstellung von Ammoniak oder Chemie) verwendeten und zu 95 % aus Gas, Erdöl und Kohle gewonnenen fossilen Wasserstoff durch klimaneutralen Wasserstoff zu ersetzen.

Auch im Schwerlastverkehr und insbesondere im Straßenfernverkehr soll klimaneutraler Wasserstoff vermehrt eingesetzt werden.

Der zur Dekarbonisierung dieser Nutzungen erforderliche Mindestbedarf an klimaneutralem Wasserstoff wird auf 35 TWhH2 geschätzt. Um diese Mengen erzeugen zu können, müssen Elektrolyseure entwickelt werden, die – zunächst in Form von großen Anlagen – mit dekarbonisiertem Strom aus dem Netz betrieben und in der Nähe von Industrie- oder Versorgungszentren angesiedelt werden. Der hierfür benötigte Stromverbrauch beläuft sich im Referenzentwicklungspfad auf rund 50 TWh_e.

Vor allem auf europäischer Ebene sind heute auch Szenarien im Gespräch, die bei der Nutzung von klimaneutralem Wasserstoff noch viel weiter gehen. In Frankreich werden sie als Variante „Hydrogen +" der „Energetischen Zukunftsperspektiven 2050" behandelt. Hier wird davon ausgegangen, dass parallel zum Angebot an klimaneutralem Wasserstoff auch die Nachfrage für diese Energie ausgebaut wird: Ammoniak für Schiffs- und Stahlindustrie, Biokraftstoffe für die Luftfahrt. Bei einigen dieser Nutzungen besteht Uneinigkeit bezüglich des Stellenwerts von Wasserstoff im Vergleich zur direkten Elektrifizierung oder der Nutzung von Biokraftstoffen. In jedem Fall jedoch setzt der Ausbau der Wasserstoffnutzung in den Szenarien die Erzeugung größerer Strommengen voraus, um nicht auf Importe zurückgreifen zu müssen. Denn in einer Konfiguration mit einer stark vermehrten Nutzung von klimaneutralem und in Frankreich durch Elektrolyse erzeugtem Wasserstoff wird sehr viel mehr Strom benötigt: rund 170 TWh_e.

2 Ein langfristig wirkender Hebel: der Ausbau einer flexiblen Wasserstoffspeicherung in Szenarien mit hohem Erneuerbaren-Anteil

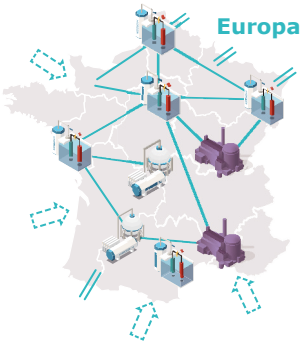
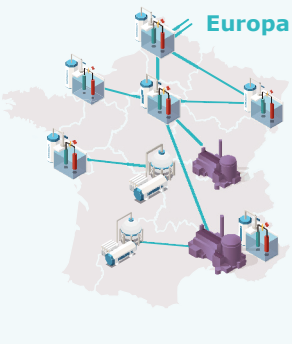
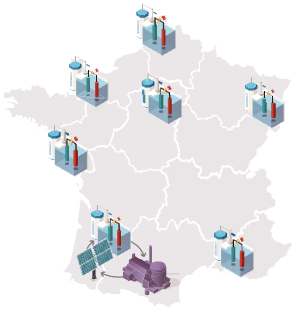
Die Wasserstofferzeugung durch Elektrolyse gilt als flexibel und geeignet, sich an die Fluktuationen der Erneuerbaren-Erzeugung und des Gesamtstromverbrauchs anzupassen. Somit birgt sie ein hohes Flexibilitätspotenzial für den Ausgleich des Stromsystems.

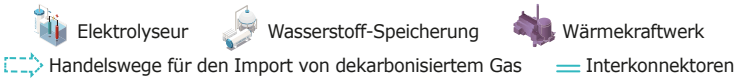
Werden die Elektrolyseure an ein großes Wasserstoffsystem mit Speicherkapazitäten angeschlossen, so sind sie in der Lage, ihren Betrieb in größerem Umfang als viele andere elektrische Nutzungen anzupassen: Im Gegensatz zu Elektrofahrzeugen, deren Batterien nach wie vor eine begrenzte Kapazität aufweisen und regelmäßig aufgeladen werden müssen, könnten Elektrolyseure ihren Betrieb über längere Zeiträume hinweg einstellen (z. B. in windstillen Wochen), wenn ausreichend Wasserstoff gespeichert wurde, um den Bedarf

zu decken. **Allerdings ist diese Flexibilität nur mithilfe von Infrastrukturen zur Speicherung und für den Transport von Wasserstoff erreichbar, deren Verfügbarkeit heute noch nicht gewährleistet ist.** Die Kosten für diese – heute noch sehr unsicheren – Lösungen wurden in die Berechnungen einbezogen.

In Stromsystemen mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energien spielt der Energieträger Wasserstoff zudem eine entscheidende Rolle für die Versorgung von Wärmekraftwerken, weshalb sich auch seine Beschaffungskosten direkt auf die Wettbewerbsfähigkeit dieser Systeme auswirken. Diese könnte verbessert werden, indem Wasserstoff aus anderen Teilen der Welt zu kontrollierten Preisen und über kontrollierte Lieferketten importiert und in Frankreich vermehrt durch große Wind- oder Solarparks hergestellt wird oder indem sonstige klimaneutrale Gase wie Biomethan ergänzend genutzt werden, wobei die von der SNBC festgelegten physikalischen Grenzen eingehalten werden müssen.

Ergebnisse n°10 Die unterschiedlichen Integrationsgrade des „Wasserstoffsystems" im Vergleich zum Stromsystem

	Vision eines stark vernetzten und sehr flexiblen Wasserstoffsystems	Referenz: flexibles Wasserstoffsystem	Vision eines gering flexiblen Wasserstoffsystems
Elektrolyse	• Flexible Elektrolyseure	• Flexible Elektrolyseure	• Nicht flexible Elektrolyseure im Bandbetrieb
Speicherung und Netze	• Speicherung breit zugänglich auf europäischer Ebene • Starke Interkonnektoren + wirtschaftliche Verbindungen mit dem Rest der Welt in Bezug auf den Import von Wasserstoff zu den günstigsten Tarifen	• Speicherung breit zugänglich (entweder über Interkonnektoren oder über entsprechenden Ausbau in Frankreich) • Möglicher Austausch mit dem Ausland, um die Speicherkapazitäten zu teilen aber keine massiven Importe	• Sehr begrenzte Speicherkapazitäten • Keine Importe oder Exporte
Wärme-erzeugung	• Wärmekraftwerke, die Wasserstoff aus dem Netz nutzen (aus Frankreich oder importiert)	• Wärmekraftwerke, die vorwiegend Wasserstoff aus dem Netz nutzen • Variante durch Kombination von Synthesegas und Biogas	• Durch Synthesegas aus regionaler Erzeugung gespeiste Wärmekraftwerke
Kosten von Gas für die Stromerzeugung	• ca. 70 €/MWhPCI	• ca. 120-130 €/MWhPCI	• ca.160 €/MWhPCI
Schematisierte Netz-Kartografie			



11 Bei den Szenarien mit einem sehr hohen Anteil an erneuerbaren Energien oder dem Szenario, das eine Verlängerung der Laufzeit der bestehenden Kernreaktoren über 60 Jahre hinaus vorsieht, stellt das Erreichen der Klimaneutralität bis 2050 äußerst hohe technische Ansprüche.

Ein klimaneutrales System bis zum Jahr 2050 zu erreichen, stellt eine echte technologische Herausforderung dar. Die zahlreichen erwarteten Innovationen können sich je nach Szenario als mehr oder weniger notwendig erweisen: Elektrofahrzeuge mit Batterien, für die geringe Mengen seltene Metalle benötigt werden, *Power-to-Gas-to-Power*-Kreisläufe mit Wasserstoff oder Synthese-Methan, mit dekarbonisiertem Gas betriebene Wärmekraftwerke, digitale Lastmanagement-Technologien, kleine modulare Kernreaktoren (SMR), neue Meeresenergien wie Strömungskraftwerke usw.

Einer jüngsten Schätzung der Internationalen Energieagentur zufolge befindet sich fast die Hälfte der Techniken, mit denen der für eine Klimaneutralität bis 2050 erforderliche Emissionsrückgang erreicht werden soll, heute noch in der Demonstrations- oder Prototypenphase. Bei der RTE-Analyse wurde versucht, statt auf technologisch sehr anspruchsvolle Lösungen auf industriell ausgereifte Technologien zu setzen. Dennoch sind alle Szenarien durch die Validierung zahlreicher technischer Voraussetzungen bedingt.

Auf technischer Ebene **führte die Analyse dazu, von der Annahme einer grundlegenden Unterscheidung zwischen den Szenarien M und N abzukommen.** Alle diese Szenarien setzen mittelfristig auf einen hohen Anteil erneuerbarer Energien und sind daher – wenn auch in unterschiedlichem Maße – von der Problematik eines weitgehend nicht steuerbaren Erzeugungsparks betroffen.

Während davon ausgegangen werden kann, dass die Herausforderungen im Technologie- bzw. Forschungs- und Entwicklungsbereich in den kommenden Jahrzehnten gemeistert werden können, setzen Szenarien, die auf 100% Erneuerbaren oder einer langfristigen Verlängerung der bestehenden Kernreaktoren über 60 Jahre hinaus beruhen, voraus, dass zahlreiche kritische technische Voraussetzungen kurzfristig erfüllt werden können. Nach dem aktuellen Stand der Dinge ist dies jedoch keineswegs gewährleistet. Sich heute für diese Szenarien zu entscheiden, oder auf den Grundsatz der technologischen Diversifizierung im Strommix zu verzichten, birgt daher das Risiko, dass das Ziel der Klimaneutralität zum relativ nahen Zeitpunkt 2050 nicht erreicht werden kann.

1 Die technologischen Voraussetzungen der Szenarien mit einem hohen EE-Anteil wurden im Januar 2021 in einem gemeinsamen Bericht von RTE und der Internationalen Energieagentur erläutert.

Darin werden die folgenden vier Bedingungen genannt: (1) das Erreichen von ausgereiften technologischen Lösungen, mit denen die Stabilität des Stromsystems ohne konventionelle Erzeugung aufrechterhalten werden kann, (2) die weitreichende Verbreitung von Flexibilitäten, (3) die Bewältigung der Herausforderungen beim Ausbau technischer Reserven und (4) die Aufrüstung der nationalen Stromnetze.

Die zum Erreichen dieses Ziels erforderlichen technischen Validierungen sind nach wie vor anspruchsvoll und mit umfangreichen und intensiven Forschungs- und Entwicklungsmaßnahmen verbunden.

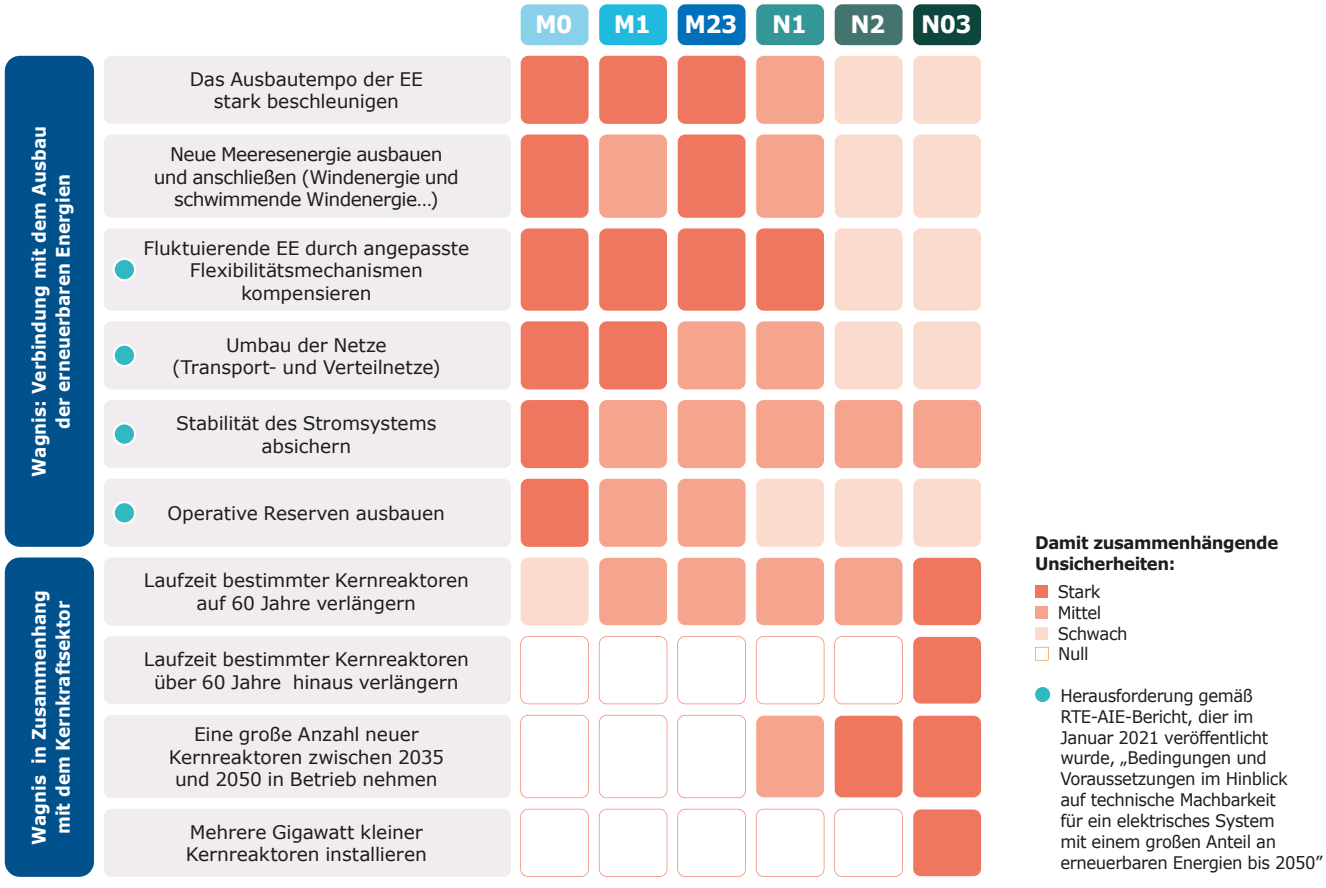
Diesen vier Bedingungen unterliegt nicht nur das Szenario M, sondern auch N1, da hier der Anteil der erneuerbaren Energien im Jahr 2060 bei über 80% läge.

2 Auch die Bewahrung einer Kernenergie-Grundkapazität von rund 50 Gigawatt ist technologisch sehr anspruchsvoll.

Fünf von sechs Szenarien der „Energetischen Zukunftsperspektiven 2050" gehen davon aus, dass bestimmte bestehende Reaktoren länger als 50 Jahre betrieben werden, wobei die erforderlichen Sicherheitsanforderungen zuvor systematisch überprüft werden müssen. Die französische Atomaufsichtsbehörde gab an, dass die von ihr generell befürwortete Verlängerung über 40 Jahre hinaus bereits „außergewöhnlich umfangreiche Maßnahmen" erfordere.

In drei der sechs Szenarien ist der Bau neuer Reaktoren vom Typ EPR 2 vorgesehen – eine echte industrielle Herausforderung. **In Szenario N03 muss durch Erfüllung der folgenden vier Bedingungen noch einen Schritt weiter gegangen werden:** (1) erfolgreiche Verlängerung der meisten Reaktoren bis 60 Jahre, (2) Weiterbetrieb bestimmter Reaktoren über 60 Jahre hinaus (vor allem, wenn andere nach 50 Jahren stillgelegt werden), (3) Bau und Inbetriebnahme von 14 Reaktoren des Typs EPR 2 (d. h. 8 mehr als im Programm „Neue französische Kernkraft"/*Nouveau nucléaire France)*, (4) Ausbau der SMR-Kapazität auf 4 GW. **Voraussetzung eines derartigen Szenarios wäre, zu einem frühen Zeitpunkt die Durchführbarkeit eines Betriebs über 60 Jahre hinaus sicherzustellen. Dieser setzt generell voraus, dass die Forschung und Entwicklung im gesamten Kernenergiesektor vorangetrieben wird, von der Konzeption neuer Reaktoren bis hin zu Technologien, mit denen der „Kreislauf geschlossen" werden kann.**

Ergebnisse n° 11 Technologische und industrielle Vorbedingungen in Zusammenhang mit verschiedenen Szenarien und Unsicherheiten



3 Mit einem Szenario, das eine weiterhin hohe Kernenergie-Erzeugungskapazität mit einem umfassenden Ausbau der erneuerbaren Energien verbindet, kann das Risiko begrenzt werden, die Klimaziele zu verfehlen.

In Szenarien vom Typ N2 können verschiedene technische und industrielle Problematiken umgangen und ein hohes Maß an klimaneutraler Stromerzeugung erreicht werden.

Denn hier ist die Abhängigkeit vom Wasserstoffsystem geringer, die Netzanpassung erfolgt im Zuge der bereits für 2035 geplanten Beschleunigung und die Synchronisierung gestaltet sich weniger anspruchsvoll. In Bezug auf die Kernenergie hängt ein derartiges Szenario nicht von der Verlängerung der Reaktoren über 60 Jahre hinaus ab und sein Entwicklungspfad ist mit einer zeitlich geglätteten Stilllegung der bestehenden Reaktoren vereinbar; der „Klippeneffekt" kann somit vermieden werden. Der Aufbau einer Industriebranche für kleine modulare Reaktoren – die in Frankreich industriell noch nicht entwickelt sind – erscheint hier als Chance (das für den Bau der EPR 2 erforderliche Tempo wird reduziert) und nicht als Verpflichtung. Die industrielle Herausforderung, die mit der möglichen Errichtung von 14 Reaktoren vom Typ EPR 2 innerhalb von 30 Jahren verbunden ist, darf jedoch nicht unterschätzt werden.

12 Bereits jetzt muss der Umbau des Stromsystems die wahrscheinlichen Folgen des Klimawandels berücksichtigen, etwa in Bezug auf Wasserressourcen, Hitzewellen oder Windverhältnisse.

Das französische Stromsystem ist heute bereits anfällig für starke Klimaschwankungen: Elektroheizungen tragen zu Verbrauchsspitzen bei Kältewellen bei, die Speicher der Wasserkraftwerke sind niederschlagsabhängig und manche Kernkraftwerke können bei Hitzewellen oder in Dürreperioden nicht betrieben werden.

Mit Blick auf die langfristige Strommix- und Klimaentwicklung sind die extremen Wetterphänomene unter zwei Aspekten stärker zu berücksichtigen:

- Einerseits verstärkt der Klimawandel die Notwendigkeit, das System an die Folgen der Erderwärmung anzupassen.
- Andererseits wird das System infolge des Ausbaus fluktuierender erneuerbarer Energien witterungsempfindlicher und bei der Analyse seines Flexibilitätsbedarfs muss insbesondere auf das Risiko windstiller Zeiten eingegangen werden.

1 Der Klimawandel verändert die Verbrauchs- und Erzeugungsprofile, daher müssen seine Auswirkungen bei der Dimensionierung und Anpassung des Stromsystems einbezogen werden.

In seinem im August 2021 erschienenen Bericht warnte der IPCC vor einem unaufhaltsamen Fortschreiten des Klimawandels in den kommenden Jahrzehnten und forderte sämtliche Wirtschaftsakteure auf, die Anpassung der Infrastrukturen an die Folgen des Klimawandels zu planen. Insbesondere gilt dies für die Infrastrukturen des Stromsystems, deren Sicherheit von entscheidender Bedeutung für das Land ist.

Die deutlichsten Folgen des Klimawandels für das Stromsystem betreffen die Temperaturentwicklung: Gemäß des DRIAS-Prospektivberichtes 2020 von Météo France könnte sich der durchschnittliche Temperaturanstieg in Frankreich im Zeitraum 2041-2070 auf 0,8° C bis 2,9° C im Vergleich zu 1976-2005 belaufen. Die Intensität und Häufigkeit von Kältewellen wird abnehmen (ihr Risiko jedoch weiterbestehen), die von Hitzewellen zunehmen: Ab 2050 könnte jeder dritte Sommer von einer mit 2003 vergleichbaren Hitzewelle geprägt sein. Diese Temperaturentwicklung führt zu einem höheren Stromverbrauch für Klimaanlagen, der über das Jahr gesehen durch den geringeren Heizbedarf jedoch mehr als ausgeglichen wird.

Über das Verbrauchsprofil hinaus betreffen die erheblichen Auswirkungen des Klimawandels auch die Anlagen zur Stromerzeugung und -übertragung. **Die Speicherung hydraulischer Energie** wird anders organisiert werden müssen, da die Stauseen durch eine früher im Jahr eintretende Schneeschmelze gefüllt werden und im Frühherbst häufiger späte Trockenperioden auftreten können. **An Flussufern angesiedelte Kernkraftwerke werden regelmäßiger von Hitze- und Trockenperioden beeinträchtigt werden** und auch wenn die „verlorenen" Energiemengen auf das gesamte Jahr bezogen gering bleiben, können sie dennoch ein hohes Niveau erreichen. Die Anfälligkeit neuer Kernreaktoren für diese klimatischen Unwägbarkeiten kann reduziert werden, **indem bestimmten Standorten (an der Küste oder am Ufer von Flüssen mit unkritischen Durchflussmengen und Schwellentemperaturen) Vorrang gewährt wird und für zukünftige Kraftwerke an Flussufern Luftkühler vorgeschrieben werden.**

Schließlich müssen auch die Stromnetze neu dimensioniert werden, um der temperaturbedingten Beeinträchtigung der Durchleitungskapazitäten von Freileitungen vorzugreifen.

2 Aufgrund der Veränderungen beim Mix wird das System empfindlicher auf Windbedingungen und nicht mehr vorrangig auf die Temperatur reagieren.

2050 wird das Gleichgewicht zwischen Stromerzeugung und -verbrauch durch neuartige Witterungsbedingungen beeinträchtigt werden.

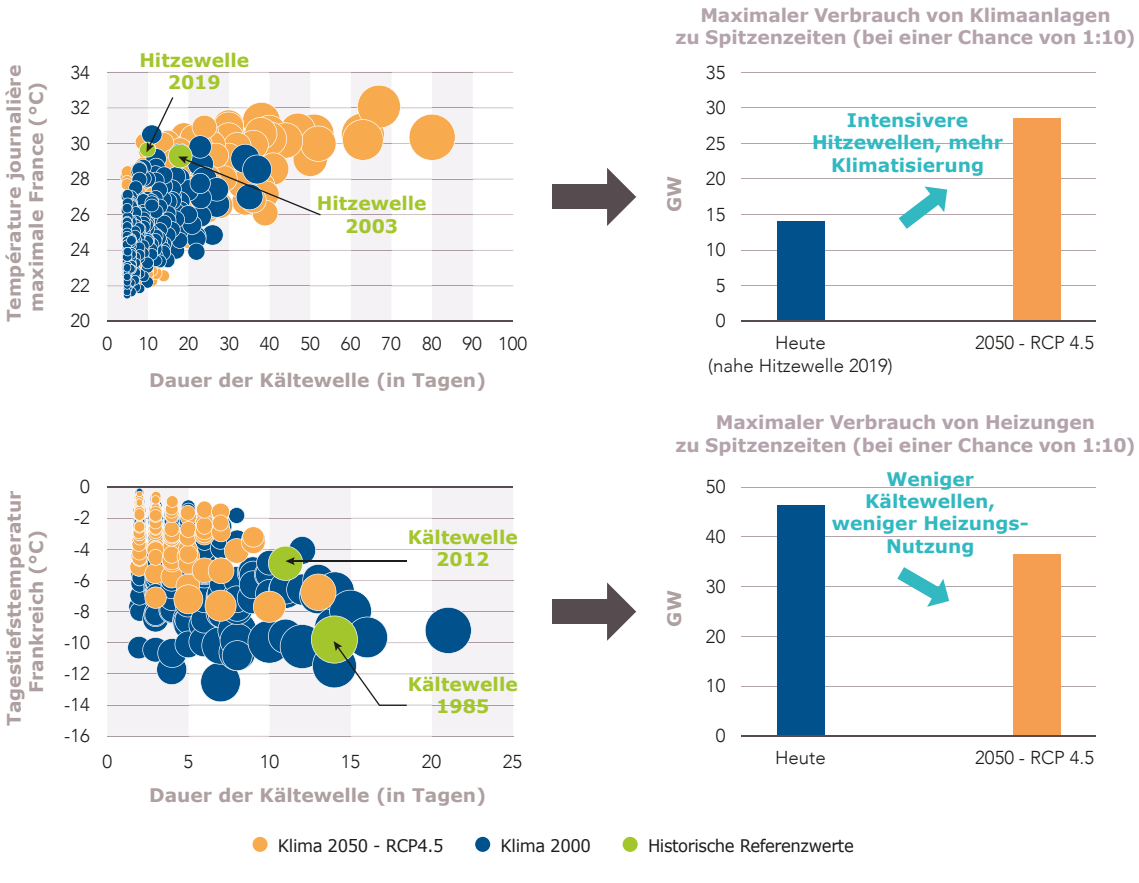
Vor allem aufgrund des Ausbaus von Wind- und Solarenergie wird das Gleichgewicht des Stromsystems deutlich stärker vom Windprofil und der Solareinstrahlung und weniger von der Temperatur abhängen.

Derzeit stellen vor allem winterliche Kältewellen eine Gefahr für die Stromversorgungssicherheit dar. In den kommenden Jahrzehnten wird sich die Art des Risikos jedoch dahingehend verändern, dass Spannungen vor allem in Zeiten auftreten, in denen niedrige Temperaturen und Windstille gleichzeitig auftreten (während sie in der Vergangenheit auf extreme Kältesituationen beschränkt waren).

Diese kalten und windstillen Zeiträume, die in der öffentlichen Debatte über den Strommix viele Fragen aufwerfen, führen somit in Szenarien mit einem hohen Erneuerbaren-Anteil (mehrere Dutzend Gigawatt) **zu einem sehr starken Bedarf an regelbaren Kapazitäten.** Nur mit ihnen können derartige Situationen überstanden werden.

Die zunehmende Trockenheit im Spätsommer und Herbst kann ebenfalls zu momentanen Spannungen beim Gleichgewicht zwischen Stromangebot und -nachfrage führen, insbesondere, wenn diese Trockenperioden in windarme Zeiträume fallen. Auch hier sind steuerbare Kapazitäten erforderlich. Diese wurden bei der Analyse der Szenarien einbezogen.

Ergebnisse n° 12 Entwicklung der Häufigkeit von Extremwetterereignissen (Hitzewellen und Kältewellen) im Klima zwischen heute und 2050 (IPCC-Pfad RCP4.5) und Auswirkungen auf die Leistungsabrufe für Klimaanlagen und Heizung



13 Der Ausbau der erneuerbaren Energien wirft auch Fragen der Flächennutzung und der Nutzungseinschränkung auf. Seine Intensivierung kann ohne übermäßig starke Denaturierung erfolgen, dabei muss jedoch im jeweiligen Gebiet für den Erhalt der Lebensräume gesorgt werden.

1 Die Frage der Akzeptanz von Wind- und Solarenergie stellt sich weniger in ökologischer Hinsicht als mit Blick auf die Integration in das eigene Lebensumfeld.

Das französische Stromsystem wurde um Kernkraftwerke, große Wasserkraftwerke und einige Wärmekraftwerke herum aufgebaut. Die Stromerzeugung ist dabei geografisch auf einige wenige Gebiete konzentriert, in denen die Infrastrukturen im Allgemeinen gut akzeptiert werden, da sie Arbeitsplätze schaffen und für lokale Steuereinnahmen sorgen.

Das „fossile System", das über 60 % der frankreichweit verbrauchten Energie liefert, ist dagegen kaum sichtbar: Die Öl- und Gasfelder liegen nicht in Frankreich, die wenigen Raffinerien sind in meist stark industrialisierten Hafengebieten angesiedelt und die Gaspipelines verlaufen unterirdisch ...

Somit stellt das elektrische Hoch- und Höchstspannungsnetz den sichtbarsten Teil des französischen Energiesystems dar.

Die erneuerbaren Energien, die zum Erreichen der CO_2-Neutralität ausgebaut werden müssen, sind an dezentralen Standorten über das Land verteilt. Damit tritt ein bisher verborgenes – da im Ausland angesiedeltes oder extrem konzentriertes – Energieerzeugungssystem offen zu Tage. Die Problematik dieses „Auftauchens" der Infrastrukturen bildet die Grundlage sowohl der Kontroverse um Windenergieanlagen oder große Solarparks als auch der Debatte über deren Akzeptanz durch die französische Bevölkerung.

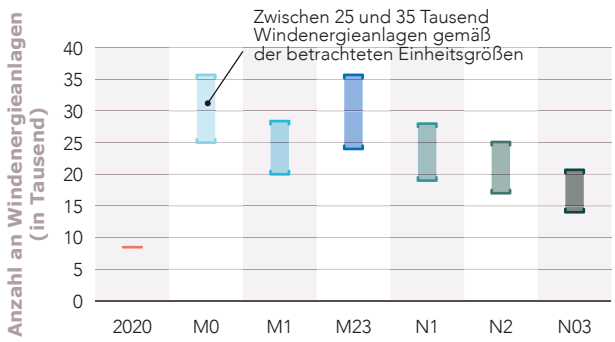
Daher konzentriert sich die Problematik in erster Linie auf Fragen der Ästhetik oder des Natur- bzw. Kulturerbes.

Die Einschätzungen der „Energetischen Zukunftsperspektiven 2050" bestätigen diese erhöhte Sichtbarkeit der Infrastrukturen. Sie planen mit 14 000 bis 35 000 Windenergieanlagen und gehen davon aus, dass die Solarmodule eine Fläche von 0,1% und 0,3% des französischen Staatsgebietes belegen werden.

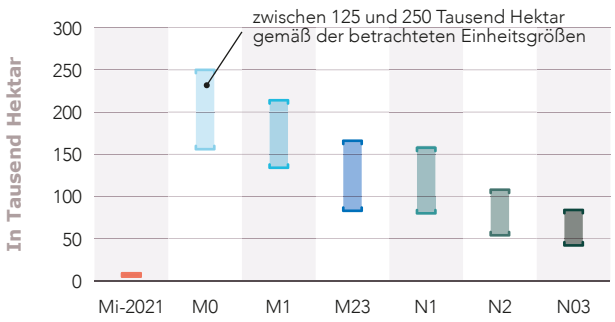
Geringer ist die Flächenbelastung in den Szenarien mit neuen Kernreaktoren, da diese voraussichtlich auf oder neben bestehenden Standorten gebaut würden. **Dieser geringere Raumbedarf der Kernkraftwerke darf jedoch nicht die unvermeidbare Akzeptanzdebatte um die neuen Anlagen verschleiern, bei der auch das Störfallrisiko zur Sprache kommen wird.**

Ergebnisse n° 13 Anzahl der Windenergienalagen auf dem französischen Festland und Fläche, die von PV-Anlagen bedeckt ist

Prognose Anzahl der Onshore-Windenergieanlagen bis 2050



Prognose der durch PV-Freiflächenanlagen belegten Hektar Boden bis 2050



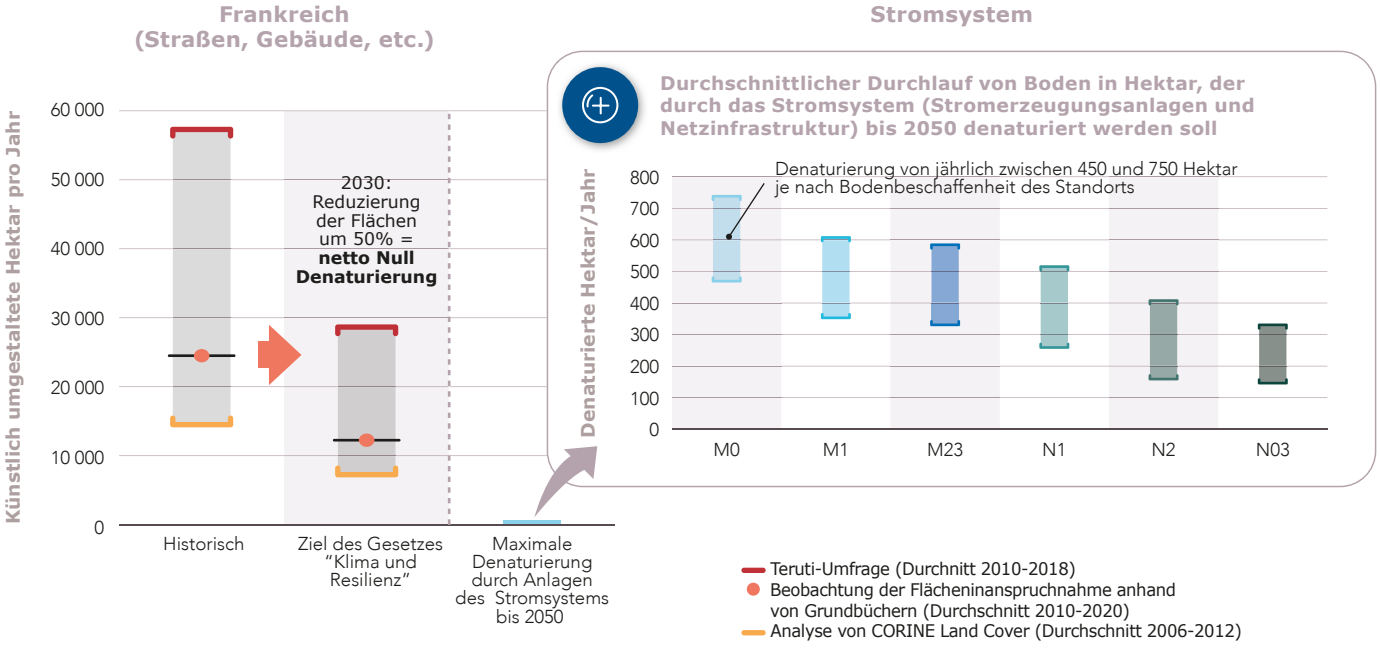
2 Erneuerbare Energien führen nicht generell zu einer starken Flächenversiegelung und -denaturierung.

Je mehr erneuerbare Energien ein Szenario enthält, umso größer ist die Fläche, die landesweit für die Energieinfrastruktur benötigt wird. Dennoch sind die versiegelten und bebauten Flächen, um die herum sich die Bedenken bezüglich der Biodiversität kristallisieren, im Verhältnis zur Größe des französischen Staatsgebiets sehr gering. So werden sich die dem Stromsystem bestimmten denaturierten Flächen bis 2050 auf 20 000 bis 30 000 Hektar belaufen, während allein das französische Straßennetz über eine Million Hektar beansprucht. In den M-Szenarien steigt der Flächenverbrauch stärker an, bleibt jedoch gering im Vergleich zum Bedarf von Siedlungen, Gewerbegebieten und Straßen (1-3%). **Sämtliche Maßnahmen zur Begrenzung der durch die Strominfrastruktur verursachten Denaturierung (Wiederverwendung von ungenutzten Brachen) tragen dazu bei, das Ziel „Null Netto-Denaturierung" zu erreichen.**

3 Standorte von Erneuerbaren-Anlagen können generell gleichzeitig für andere Zwecke genutzt werden, wobei dies im Fall der Photovoltaik an bestimmte Bedingungen gebunden ist.

Die Möglichkeiten der „Mitnutzung von Flächen" im Umfeld von Stromerzeugungsanlagen gestaltet sich je nach Energieart unterschiedlich. Im Falle der Windenergie sind sie relativ gering, aber über große Flächen verteilt, da um die Windenergieanlagen herum zahlreiche Nutzungen, besonders landwirtschaftlicher Art, möglich sind. Umgekehrt verhält sich die Situation bei der Solarenergie: Der Flächenanspruch ist im Verhältnis zur installierten Leistung geringer, gleichzeitig besteht weniger Möglichkeit zur Mitnutzung. Die Nutzungsmöglichkeiten des Raums unter den

Ergebnisse n° 13 Durchschnittlicher Durchlauf von Boden in Hektar und in den jeweiligen Szenarien in Frankreich, der bis 2050 denaturiert werden soll (Historie und Ziel 2030)



Quelle: CEREMA, 2021, „Les déterminants de la consommation d'espaces (Entscheidende Faktoren für den Flächenverbrauch)".
Hinweis: Der Umfang der jährlichen Denaturierung seit 2019 zeigt eine durchschnittliche Varianz über zehn Jahre gemäß der Grundbucheinträge und den erfassten Umfragen (~60 000 ha)

Modulen von Freiflächenanlagen können stark eingeschränkt sein, auch dann, wenn der Boden weder bebaut noch versiegelt ist – außer in speziellen Modellen der Agrophotovoltaik (Beweidung und bestimmte Anbauarten).

Mit Blick auf die Flächensicherung stellt die Studie keine strukturellen Probleme fest, in manchen Regionen allerdings ist hier mit gesellschaftlichen Spannungen zu rechnen.

14 Der in Frankreich verbrauchte Strom bleibt selbst dann weitgehend klimaneutral, wenn die vollständige CO_2-Bilanz der Infrastrukturen über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg eingerechnet wird. Ersetzt der Strom die fossilen Energieträger, so leistet er einen hohen Beitrag zum Erreichen der Klimaneutralität.

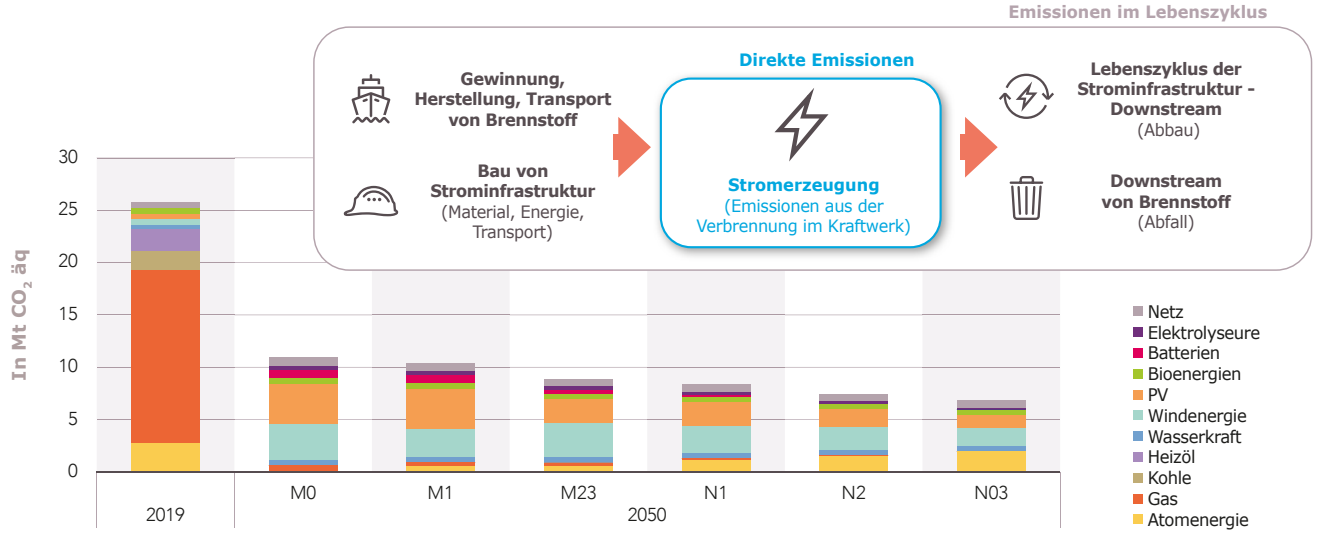
1 Die CO_2-Bilanz der erneuerbaren Energien und der Kernenergie bleibt selbst bei Einberechnung ihres gesamten Lebenszyklus sehr positiv.

Die Debatte über die zur Stromerzeugung genutzten Energiequellen dreht sich derzeit um die Treibhausgasemissionen, die bei der Nutzung der Anlagen entstehen sowie um die Bedingungen der Herstellung und der Wiederaufbereitung der Anlagen am Ende ihrer Lebensdauer.

Die Einbeziehung des Lebenszyklus von Materialien in die CO_2-Bilanz erfolgt heute anhand einer standardisierten und kontrollierten Methode: **Selbst unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus sind die Gesamtemissionen der Technologien zur Erzeugung von Strom mithilfe von erneuerbaren Energien oder Kernenergie sehr gering** und liegen weit unter den Emissionen, die bei der Nutzung fossiler Brennstoffe freigesetzt werden.

Unter den erneuerbaren Energien weisen Photovoltaikmodule eine etwas höhere CO_2-Bilanz auf als Kernreaktoren oder Windenergieanlagen. Aber auch sie bleiben um das Zehn- bis Zwanzigfache hinter den fossilen Wärmekraftwerken zurück. Weiter verbessert werden könnte die Bilanz durch die Verlagerung der Produktionsphase der Module, insbesondere mit Blick auf einen „Technologiesprung" bei der Art der Module.

Ergebnisse n° 14 Lebenszyklusemissionen von Treibhausgasen aus dem Stromsystem



2 Obwohl der französische Strom heute bereits zu 93 % dekarbonisiert ist, wirkt sich der Ausbau der erneuerbaren Energien positiv auf das Klima aus.

Mit Bezug auf die Emissionen steht die Leistungsfähigkeit des bestehenden französischen Anlagenparks außer Zweifel: Deutschland gibt bei seiner Stromerzeugung siebenmal so viel Emissionen ab (obwohl das Land in den vergangenen Jahren im Zuge seines Atomausstiegs die erneuerbaren

Energien stark ausgebaut hat), Großbritannien die doppelte Menge und Italien fast dreimal so viel.

Diese günstige Ausgangslage kann teilweise dazu verleiten, den klimatischen Nutzen des Ausbaus von Wind- und Solarenergie in Frankreich zu bestreiten. **Dabei kann der verstärkte Ausbau der Wind- und Solarenergie die Emissionen weiter verringern, wenn die neuen Kapazitäten die bestehenden Kernkraftwerke ergänzen:** 1) Die klimaneutrale Stromerzeugung muss gesteigert werden, um den Bedarf zu decken, der sich aus der Verlagerung des heutigen Verbrauchs fossiler Energieträger ergibt. 2) Angesichts des Ziels, dieses Potenzial im Vergleich zu heute anzuheben, bietet sich kurzfristig keine Alternative zum Ausbau der Erneuerbaren (die neuen Reaktoren, deren Bau Frankreich beschließen könnte, würden bestenfalls ab 2035 Strom erzeugen). 3) Die klimaneutrale Stromerzeugung muss frühzeitig entwickelt werden, um der absehbaren Stilllegung der bestehenden Reaktoren vorzugreifen und so die heutige Leistung langfristig aufrechterhalten zu können.

In Szenarien, in denen die abgeschalteten Kernreaktoren nicht durch neue ersetzt werden, setzt die Aufrechterhaltung der Klimaschutzleistung voraus, das Ausbautempo der erneuerbaren Energien streng einzuhalten und das in Wärmekraftwerken verwendete fossile Gas bereits im Jahrzehnt 2030-2040 durch grünes Gas zu ersetzen. Werden diese Bedingungen nicht erfüllt, so steigen die Treibhausgasemissionen des Stromsystems weiter und die Klimaneutralität rückt in unerreichbare Ferne.

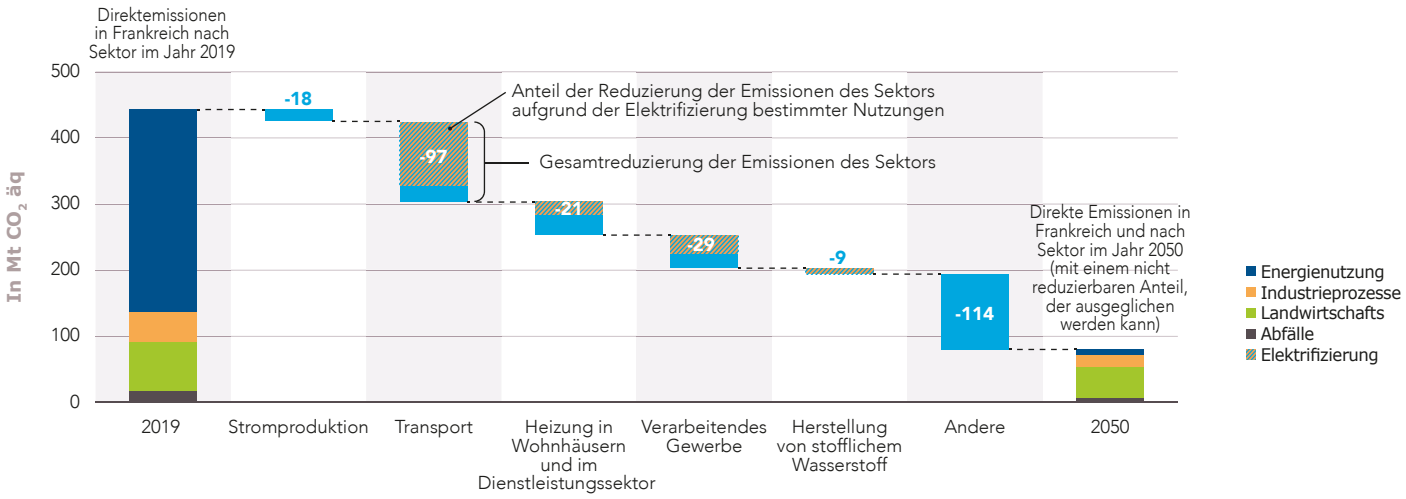
3 Allein durch die Elektrifizierung der Nutzungen können die französischen Emissionen bis 2050 um 35 % gesenkt werden.

Die Absicht einer Emissionsreduzierung stellt Frankreich vor eine andere Herausforderung als die meisten seiner Nachbarn: Während diese ihre Energie-Fahrpläne in erster Linie auf den Ausbau einer klimaneutralen Stromerzeugung ausrichten, muss das Land einen Schritt weiter gehen und seine gesamte Wirtschaft dekarbonisieren, teilweise auch mithilfe seines klimaneutralen Stroms.

Die in klimatischer Hinsicht effizientesten Maßnahmen sind der Ersatz der von Pkws und Lkws genutzten fossilen Treibstoffe (Benzin und Diesel) durch Strom (oder aus Strom hergestellten Wasserstoff) sowie die Substitution von Heizöl und fossilem Heizgas im Rahmen von Gebäudesanierungen. In der Industrie können die Emissionen auch durch die vermehrte Nutzung von klimaneutralem Strom oder Wasserstoff in bestimmten Prozessen sowie von Elektroheizkesseln verringert werden.

Insgesamt können durch die Elektrifizierung der Gebräuche bis 2050 rund 150 Millionen Tonnen CO_2 eingespart werden. Strom spielt daher eine wesentliche, aber nicht ausreichende Rolle: Der Energiemix des Jahres 2050 kommt bei Weitem nicht mit Strom allein aus und das Erreichen der CO_2-Neutralität erfordert weitere Hebel wie den Ausbau der Bioenergie oder die Reduzierung von Emissionen in der Landwirtschaft.

Ergebnisse n° 14 Auswirkungen der Elektrifizierung auf die Dekarbonisierung der Wirtschaft



15 In wirtschaftlicher Hinsicht kann die Energiewende zu Spannungen bei der Beschaffung von mineralischen Ressourcen führen, insbesondere bei bestimmten Metallen. Hier ist vorausschauendes Handeln gefragt.

1 Die Energiewende verringert zwar die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern, lässt aber einen Bedarf an mineralischen Ressourcen und neuen Beschaffungsketten entstehen.

Im 20. Jahrhundert war die Debatte über die Energieversorgung geprägt von wiederkehrenden Fragen nach der Größe der Gas- und Ölreserven, dem Erreichen des globalen Ölfördermaximums oder der energetischen Abhängigkeit von den Förderländern.

Im Rahmen der Energiewende des 21. Jahrhunderts verschiebt sich die Problematik der Ressourcenbeschaffung, denn das Energiesystem löst sich zwar von seiner Abhängigkeit von den fossilen Energieträgern, benötigt aber große Mengen mineralischer Ressourcen, die ihre eigenen Herausforderungen in Bezug auf Versorgung und Abhängigkeiten aufwerfen. Diese Situation muss genau analysiert werden und dabei gilt es auch, vereinfachende Darstellungen zu vermeiden.

Die Frage der seltenen Erden taucht in den verschiedenen Szenarien nicht als problematisch auf. Denn diese kommen zwar in der Debatte zu den Auswirkungen der erneuerbaren Energien häufig zur Sprache; praktisch sind sie jedoch in den Bestandteilen des Stromsystems kaum vorhanden (nur in bestimmten Technologien für Offshore-Windenergieanlagen), während sie in anderen Bereichen wie der Digitaltechnik, Haushaltsgeräten oder auch in Autos mit Verbrennungsmotoren weitaus stärker zum Einsatz kommen. Zudem sind sie aus rein geologischer Sicht keine Seltenheit.

Im Gegensatz dazu besteht bei vielen der für den Wandel des Energiesystems benötigten Ressourcen (Kupfer, Lithium, Kobalt …) eine echte Kritikalität, die sowohl vielgestaltig als auch ressourcenspezifisch sein kann: Umfang der bekannten Reserven, Monopole, Nutzungskonflikte und wirtschaftliche Bedeutung, Substituierbarkeit, durch den Abbau bedingte Umweltfolgen usw.

2 Angesichts des wachsenden Bedarfs an spezifischen Metallen für die Batterien insbesondere von Elektrofahrzeugen ist Wachsamkeit geboten.

Lithium-Ionen-Akkumulatoren, deren Kosten in den vergangenen Jahren stark zurückgegangen sind, sind in den verschiedenen Szenarien zur Dekarbonisierung unverzichtbar. So können speziell auf das Stromsystem ausgerichtete Batterien benötigt werden, um den Ausbau der Photovoltaik zu begleiten (100 GWh im höchsten Szenario); die hier benötigten Mengen stehen jedoch in keinem Verhältnis zum Bedarf für den Ausbau der Elektromobilität (rund 2 900 GWh für Pkw).

Derzeit werden für die **in Fahrzeugen verwendeten Batterien kritisch eingestufte Metalle wie Kobalt, Lithium, Nickel oder Mangan** benötigt. Die Beschaffung dieser Rohstoffe gestaltet sich äußerst schwierig, wenn auch aus unterschiedlichen Gründen: Kobalt kommt nur begrenzt vor und sein Abbaugebiet ist auf die Demokratische Republik Kongo konzentriert, während China eine Art Monopolstellung bei seiner Raffinierung innehat. Die Versorgung mit Lithium wird vor dem Hintergrund der starken weltweiten Entwicklung von Elektrofahrzeugen, der zunehmenden Abhängigkeit von China für diese Ressource und der geringen Recyclingperspektiven mit besonderer Wachsamkeit beobachtet.

Daher werden in jedem Fall spezifische Maßnahmen zur Reduzierung des Bedarfs an kritischen Ressourcen erforderlich sein: Suffizienz im Verkehrssektor (Verringerung der Fahrzeugzahl), Begrenzung der Batteriegröße, Entwicklung neuer Batteriegenerationen mit geringerem Einsatz von Metallen wie Kobalt usw.

3 Materialien wie Kupfer stehen ebenfalls unter Beobachtung, vor allem in Szenarien mit einem hohen Erneuerbaren-Anteil

Kupfer kommt in fast allen Bestandteilen des Stromsystems (Kernenergie und erneuerbare Energien, Batterien, Netz) sowie in vielen anderen strategischen Wirtschaftszweigen (Bau, Transport, Telekommunikation, Industrie usw.) vor, die sich weltweit im Wachstum befinden. Daher ist hier mit Versorgungsengpässen zu rechnen, zumal die vorhandenen Abbaukapazitäten wahrscheinlich nicht ausreichen werden, um einen starken Nachfrageanstieg aufzufangen. In Szenarien mit einem hohen Erneuerbaren-Anteil wird mehr Kupfer benötigt, aber die Kritikalität wird hier sehr von der weltweiten Angebots- und Nachfragesituation sowie vom Ausbau der Recyclingkapazitäten abhängen.

Auch Silizium ist Gegenstand besonderer Aufmerksamkeit. Es ist zwar relativ reichlich und weltweit vorhanden, angesichts des absehbaren Wachstums der Solarenergie müssen jedoch neue Kapazitäten für seinen Abbau und für die Erzeugung von Siliziumdioxid geschaffen werden, um hier eine totale Monopolstellung zu vermeiden.

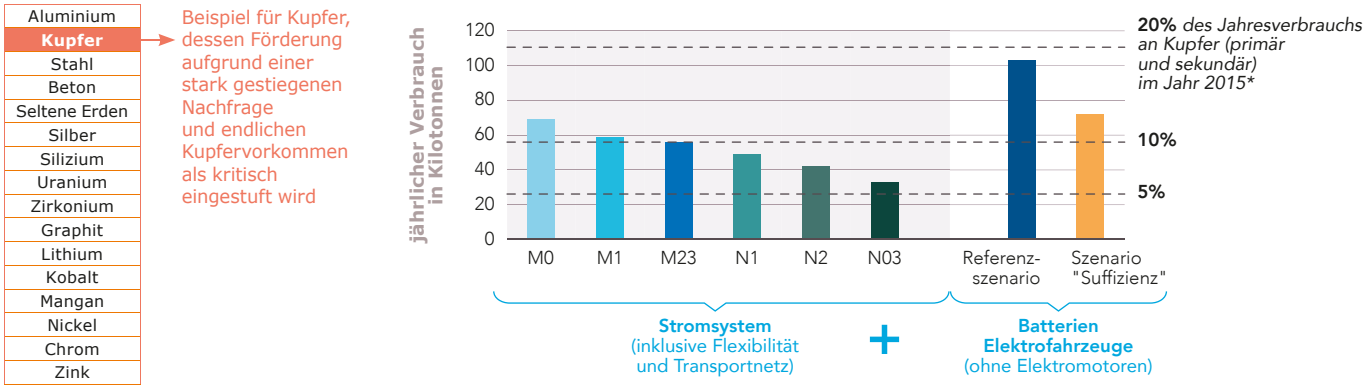
4 Die Szenarien mit Wiederbelebung der Kernenergie setzen eine Anpassung der langfristigen Strategie für das Ende des Kraftwerkszyklus voraus, um dauerhaft zusätzliche Mengen radioaktiver Materialien und Abfälle zu bewältigen.

Die Vorkommen von natürlichem Uran erscheinen heute ausreichend, um die Versorgung der französischen Kernkraftwerke selbst im Falle einer starken Wiederbelebung der Kernenergie für viele Jahrzehnte zu gewährleisten.

Allerdings fallen bei der Nutzung von Uran am Ende des Kraftwerkszyklus verschiedene Arten von Stoffen an, die aufgrund ihrer Radioaktivität und ihrer Lebensdauer ein äußerst langfristiges Entsorgungsmanagement erfordern. Teilweise können die Materialien in bestehenden oder zukünftigen Reaktoren wiederverwertet werden, dabei ist ihre maximale Wiederverwendung Teil der französischen Strategie des „geschlossenen Kreislaufs". Diese Perspektive ist jedoch mit Unsicherheiten verbunden, da die Versuchsprojekte der Generation IV in Frankreich ausgesetzt wurden. Der Brennstoffkreislauf erfordert spezielle Infrastrukturen für die Lagerung (Becken), die beim Be- und Entladen der Reaktoren eine wesentliche Rolle spielen, sowie für die Behandlung und das Recycling abgebrannter Brennelemente. Ihre Kosten werden in die wirtschaftliche Berechnung einbezogen.

Darüber hinaus entstehen bei der Erzeugung von Kernenergie radioaktive Endabfälle, die über mehrere

Ergebnisse n° 15 Prognostizierter Jahresverbrauch an Kupfer im Jahr 2050 nach unterschiedlichen Szenarien sowie für Elektrobatterien in Fahrzeugen



* Daten aus Exiobase + Eurostat – ComExt sowie BNR

zehntausend Jahre gelagert werden müssen. Sie sind Gegenstand eines entsprechenden Projektes des französischen Industriezentrums für geologische Endlagerung *(Centre Industriel de Stockage Géologique, CIGEO).* **Die Wiederbelebung eines Kernreaktorparks wird mit einem vermehrten Bedarf an Infrastrukturen zur langfristigen Entsorgung der Abfälle aus den neuen Reaktoren einhergehen. Dieser wird in den entsprechenden Szenarien beziffert.**

16 Bis 2050: Ein klimaneutrales Stromsystem kann in Frankreich zu kontrollierbaren Kosten erreicht werden.

1 Die Gesamtkosten (pro MWh) des französischen Stromsystems werden wahrscheinlich steigen, aber in einem kontrollierbaren Ausmaß (inflationsbereinigt mittelfristig um rund 15 %).

Trotz der Höhe der für die verschiedenen Komponenten des Energiesystems erforderlichen Investitionen zeigt die Studie, dass die Kostenentwicklung des französischen Stromsystems mittel- bis langfristig kontrollierbar ist. Im Zeitraum von vierzig Jahren könnten die Kosten pro MWh auf mittlere Sicht um etwa 15 % steigen (inflationsbereinigt). Dabei können manche Finanzierungsszenarien und -konfigurationen zu einer nahezu stabilen Situation führen, andere zu einem stärkeren Anstieg.

Hauptfaktor für die steigenden durchschnittlichen Stromgestehungskosten ist die Stilllegung der bestehenden Kernkraftwerke. Denn diese sind bereits amortisiert und selbst dann noch wettbewerbsfähig, wenn die Kosten der umfassenden Reparaturen im Rahmen der Laufzeitverlängerung entsprechend des EDF-Programmes *Grand carénage* einbezogen werden. Dabei können sowohl eine Strategie, die auf den massiven Ausbau der erneuerbaren Energien durch große Parks setzt und somit Größeneffekte nutzen kann, als auch ein neues Kernenergieprogramm, das die aus den Audits hervorgegangenen Kostenziele erreicht, für kontrollierte Stromgestehungskosten sorgen. Voraussetzung ist dabei allerdings das Bestehen günstiger Finanzierungsbedingungen (zumal ein Teil der teuersten Investitionen sowohl bei den erneuerbaren Energien als auch bei der Kernenergie bereits für die ersten Serienanlagen getätigt wurde). Daher ist der Unterschied zwischen der höchst- und niedrigstmöglichen langfristigen Tendenz der Stromsystemkosten vor allem bei den Flexibilitäts- und Netzkosten angesiedelt.

Da dieser Anstieg geringer ausfällt, als zu erwarten war, kann der Aufbau eines weitgehend erneuerten und neu dimensionierten klimaneutralen Stromsystems parallel zum Ausstieg aus fossilen Brennstoffen zu kontrollierten Kosten erfolgen, wenn eine kostengünstige Finanzierung vorhanden ist. Die Studie geht hier von einer zentralen Annahme von 4 % aus.

Eine Erhöhung um 15 % würde allerdings einen „Angebotsschock" auslösen, der in die makroökonomischen Bewertungen einbezogen werden muss, zumal zahlreiche mit der Umstellung verbundene Kosten auf der Stromerzeugung nachgelagerten Stufen anfallen. Daher darf sich die Perspektive einer Reindustrialisierung nicht auf das Versprechen langfristig stabiler Stromkosten stützen.

Das gleiche gilt für Elektrofahrzeuge: Ihre Herstellung ist heute teurer ist als die von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren, aber anschließend stellt Strom einen günstigeren Treibstoff dar als Erdölprodukte. Dasselbe gilt im Bausektor, wo die Installation von Wärmepumpen gewisse Kosten verursacht, ihr Betrieb jedoch kostengünstig ist. Und auch in der Industrie ist der Bau neuer Fabriken teuer, aber diese verbrauchen anschließend weniger Strom. Die Kosten der Energiewende können gesenkt werden, wenn sie im Rahmen des nächsten Investitions- und Modernisierungszyklus der französischen Industrie getätigt werden. Dieser ist in den letzten Jahren im Vergleich zur Konkurrenz in Verzug geraten.

2 Zum Erreichen der Klimaneutralität muss das Tempo der Investitionen in das Stromsystem verdoppelt werden.

Die Systemkosten können insgesamt unter Kontrolle gehalten werden, aber alle Szenarien setzen sehr hohe Investitionen voraus. Je nach gewähltem Szenario müssen in einem Zeitraum von 40 Jahren zwischen 750 Mrd. und 1 Billion Euro – d. h. jährlich 20 bis 25 Mrd. Euro – investiert werden, um die französische Stromversorgung zu gewährleisten.

Dies entspricht einer Verdoppelung der jährlichen Investitionsrate im Vergleich zu heute. Betroffen sind sämtliche Bestandteile des Systems: Stromerzeugung, Flexibilitätsmittel (Elektrolyseure, Wasserstoffnetze und -speicher, Wärmekraftwerke, Batterien, Systeme zur Nachfragesteuerung), Übertragungs- und Verteilnetze.

Aber mit dieser bedeutenden Investition kann ein System mit sehr niedrigen operativen Betriebskosten geschaffen werden, das nicht mehr von den Preisen für fossile Energieträger abhängt. Dies entspricht auch der heutigen Situation bei den Kosten des französischen Stromsystems, das bereits weitgehend auf Kernenergie und erneuerbare Energien aufbaut, während die Preise aufgrund der Interkonnektoren vor allem den Bedingungen auf dem europäischen Strommarkt unterliegen. In Zukunft würde dies für einen größeren Teil der französischen Energieversorgung gelten.

3 In einem klimaneutralen Szenario sind die Energiekosten stabiler und hängen nicht mehr von den Weltmarktpreisen für fossiles Gas und Erdöl ab.

Im Vergleich zur Versorgung mit fossilen Energieträgern verhalten sich die Kosten des Stromsystems konstanter.

Die Parameter, von denen sie abhängen, sind teilweise kontrollierbar: Der Großteil der Kernenergieindustriekette ist in Frankreich angesiedelt, die Hauptbestandteile von Offshore-Windkraftanlagen (Rotorblätter, Gondeln, Umspannwerke) werden im Land selbst oder in Europa (Kabel) hergestellt, und die Wasserstoffstrategie der europäischen Staaten verfolgt das Ziel, die Herstellung der Schlüsselkomponenten (Elektrolyseure, nachgelagerte Logistik) zu kontrollieren. Die Lieferkette der Solarenergie dagegen liegt weitgehend außerhalb Europas, aber hier bestehen teilweise Aussichten auf eine Rückverlagerung. Im Batteriebereich wurden im Zuge der europäischen Initiativen und der staatlichen französischen Pläne *France relance* und *France 2030* umfangreiche Investitionen angekündigt.

Bei den mineralischen Ressourcen ist mit Blick auf die Versorgungskreisläufe besondere Wachsamkeit sowie vorausschauendes Handeln geboten, nicht nur im Bereich erneuerbare Energien, sondern vor allem auch bei den Batterien. Die Kosten der Kernenergie bleiben dagegen gegenüber der Entwicklung der Uranpreise relativ stabil.

4 Zur Kontrolle der Kostenentwicklung des Stromsystems sind starke öffentliche Vorgaben nötig, um die Finanzierungskosten der neuen klimaneutralen Erzeugungsmittel und der Netze zu senken.

Die Kontrolle der Stromsystemkosten hängt direkt und wesentlich von den Bedingungen der Investitionsfinanzierung ab. Die Studien zeigen, dass ein dreiprozentiger Anstieg bei den Kapitalkosten die Gesamtkosten langfristig um 20 Mrd. Euro/Jahr (+30 %) erhöht, während ein Rückgang sie um 15 Mrd. Euro/Jahr senkt. Dies gilt für die meisten Maßnahmen, die Voraussetzung einer klimaneutralen Gesellschaft sind. Daher hängt die Leistung einer nach Klimaneutralität strebenden Politik aufgrund der hohen Ausgangsinvestitionen von deren Finanzierung ab.

Der Ausbau der erneuerbaren Energien in Europa wurde bisher durch öffentliche Fördermittel ermöglicht, mit denen feste Preise für die gesamte Betriebsdauer der Anlagen garantiert und den Projektträgern eine günstige Finanzierung gewährt wurde. Dies führte zu einem Rückgang der Kosten. Die wirtschaftlichen Prognosen der „Energetischen Zukunftsperspektiven 2050" zeigen, dass **eine direkte Eigenfinanzierung der erneuerbaren Energien durch Einnahmen auf den Märkten und ohne jegliche staatliche Förderung oder langfristige Verträge wie dem *Power Purchase Agreement* (PPA) unwahrscheinlich ist.** So könnte die Solarenergie trotz ihrer wettbewerbsfähigen Erzeugungskosten aufgrund der „Kannibalisierung" ihres Wertes (einbrechende Marktpreise bei maximalen Solarerträgen) auf den Märkten niedriger vergütet werden als erwartet.

Dasselbe gilt auch für die Kernenergie: **Neue Reaktoren** sind extrem kapitalintensive

Investitionen und die Erfahrung der vergangenen Jahre hat gezeigt, dass **diese ohne eine starke öffentliche Förderung – sei es in Form von Differenzkontrakten oder direkten öffentlichen Investitionen – nicht ausgebaut werden können.** Daher sind sie in wirtschaftlicher Hinsicht nur dann sinnvoll, wenn sie im Vergleich zu anderen klimaneutralen Technologien kohärente Finanzierungsbedingungen nutzen können.

Alle öffentlichen Maßnahmen, mit denen das Risiko von Investitionen in klimaneutrale Technologien reduziert wird, wirken sich daher direkt auf die Systemkosten aus und führen so langfristig zu niedrigeren Preisen für die Verbraucher. **Die aktuelle makroökonomische Situation mit niedrigen Zinssätzen und der Verteuerung fossiler Energieträger bietet besonders gute Bedingungen für Investitionen in klimaneutrale Energien.**

5 Die Gesamtenergieausgaben der Franzosen werden immer weniger vom Preis für fossile Brennstoffe und immer stärker von der Wettbewerbsfähigkeit des Stromsystems abhängen.

Die Folgen eines Ausstiegs aus den fossilen Energieträgern sind auf verschiedenen Ebenen sehr umfangreich und werden eventuell auch noch unterschätzt. Die Privathaushalte werden eine strukturelle Veränderung ihrer Energieausgaben erleben, da ein Teil ihrer unvermeidbaren Ausgaben heute direkt von den Preisen der fossilen Energieträger abhängt (Kraftstoffe für die Mobilität, Heizöl oder fossiles Heizgas).

Die im Rahmen der „Energetischen Zukunftsperspektiven 2050" durchgeführten Voruntersuchungen müssen zu einem späteren Zeitpunkt konsolidiert werden. Aus ihnen geht hervor, dass die Energiewende nicht zu erheblichen Mehrkosten im Vergleich zu einem fossilen System führt und in manchen Fällen die Aussicht auf eine Stabilisierung oder sogar Reduzierung der unvermeidbaren Energieausgaben bietet.

Die Energieausgaben verhalten sich je nach Haushalt oder Unternehmen sehr unterschiedlich. Der Vergleich zwischen einem auf fossile Energieträger aufbauenden und einem vermehrt strombasierten System ist stärker von den Marktpreisen der fossilen Brennstoffe abhängig, die im Laufe der Zeit großen Schwankungen unterliegen, als von den Stromsystemkosten. Verglichen mit Zeiten, in denen die fossilen Energieträger reichlich vorhanden und kostengünstig sind, wird ein Umstieg auf klimaneutralen Strom zu höheren Kosten führen. Dagegen dürfte im Vergleich zu Situationen mit angespannten Ölpreisen, wie sie in den vergangenen 15 Jahren immer häufiger aufgetreten sind, **die Umstellung auf ein klimaneutrales Stromsystem für bestimmte Haushalte zu erheblichen Einsparungen führen – selbst dann, wenn die Kosten der Szenarien der „Energetischen Zukunftsszenarien 2050" einbezogen werden.**

6 Damit sich die moderaten Kosten des französischen Stromsystems direkt auf die Stromrechnung der Haushalte niederschlagen, müssen gewisse Umverteilungsmechanismen fortbestehen.

Frankreich verfügt über ein bereits dekarbonisiertes und wettbewerbsfähiges Stromsystem. An die französischen Verbraucher wird dies mithilfe verschiedener „außerhalb des Marktes" angesiedelter Mechanismen weitergegeben. Die Strompreise für Privatkunden in Frankreich gehören so zu den niedrigsten in Westeuropa (nur Schweden, das einen ähnlichen Mix aus erneuerbaren Energien und Kernenergie nutzt, schneidet besser ab).

Allerdings hängt in einem stark vernetzten System der Strompreis auf den Märkten vom europaweiten Gleichgewicht zwischen Stromerzeugung und -verbrauch ab und spiegelt die Preisspannungen bei fossilen Brennstoffen und Kohlenstoffzertifikaten (EU-ETS-Markt) wider. Die Tatsache, dass die Strompreise auch in Frankreich infolge des jüngsten Gaspreisanstiegs und der geopolitischen Spannungen bei der Gasversorgung beeinträchtigt

werden können, obwohl Frankreich sehr wenig Gas zur Stromerzeugung nutzt, verdeutlicht gerade den Grad der Vernetzung des Stromsystems.

Damit die französischen Verbraucher bei ihrer Stromversorgung dauerhaft von den wirtschaftlichen Vorzügen des französischen Erzeugungsmixes profitieren können, müssen *Ad-hoc*-Regulierungssysteme langfristig aufrechterhalten werden. Die Koexistenz zwischen relativ stabilen Stromerzeugungskosten in Frankreich einerseits und einer starken Fluktuation des Strompreises in einem vernetzten europäischen Stromsystem andererseits scheint in den verschiedenen von RTE untersuchten Szenarien in der Tat dauerhaft zu sein, wenn auch je nach Szenario in unterschiedlichem Ausmaß.

17 Bis 2030: Die Perspektive, das Ziel des neuen EU-Pakets „-55% netto" zu erreichen, erhöht sich, wenn der Ausbau der erneuerbaren Energien schnellstmöglich vorangetrieben und die Laufzeit der bestehenden Kernreaktoren mit dem Ziel verlängert wird, die klimaneutrale Stromerzeugung zu maximieren.

Der IPCC-Bericht vom 9. August 2021 hat erneut hervorgehoben, wie wichtig es ist, im kommenden Jahrzehnt aktive Klimaschutzmaßnahmen zu ergreifen. Auf der COP 26, die vergangenen November in Glasgow stattfand, standen die Staaten vor der Aufgabe, neue Ziele zu verabschieden, um den Temperaturanstieg innerhalb der im Pariser Abkommen festgelegten Grenzen zu halten.

Frankreich hatte sich bis dahin verpflichtet, seine Emissionen bis 2030 um 40 % zu senken. Wie aus zahlreichen Berichten, insbesondere des französischen Hohen Klimarats *(Haut Conseil pour le climat)*, hervorgeht, ist dieses Ziel mit den bestehenden Maßnahmen nur schwer zu erreichen und es müssen zahlreiche Hebel in Bewegung gesetzt werden.

Im Rahmen des neuen *Grünen Deals* der EU wird dieses Ziel jedoch angehoben werden, denn jetzt ist geplant, die Nettoemissionen bis 2030 um 55 % zu senken – eine immense Herausforderung.

1 Wenn alle erdenklichen Hebel in Bewegung gesetzt werden, ist es möglich, die Bemühungen zum Erreichen des neuen Ziels für 2030 schneller zu verstärken.

Alle Analysen der „Energetischen Zukunftsperspektiven 2050" kommen zu dem Schluss, dass eine Strategie, die (i) den Ausbau der neuen Stromnutzungen, (ii) eine starke Konzentration auf die Energieeffizienz (oder sogar der Suffizienz) und (iii) die Maximierung der klimaneutralen Stromerzeugung kombiniert, eine großflächige Dekarbonisierung in Frankreich deutlich schneller voranbringen kann.

Die Variante „Beschleunigung 2030" des Berichts untersucht den vorgezogenen Ausstieg aus den fossilen Energieträgern. Sie setzt eine rasche Beschleunigung der Umstellung auf Strom in den drei Sektoren voraus, die in Frankreich die höchsten Treibhausgasemissionen verursachen: Verkehr, Industrie und Bauwesen. Dadurch würde der Stromverbrauch bis 2030 auf 546 TWh ansteigen (gegenüber 508 TWh im Referenzentwicklungspfad). Eine größere Suffizienz könnte diesen Wert verringern, wohingegen ein Scheitern der Effizienzziele der SNBC zu seiner Erhöhung führen würde.

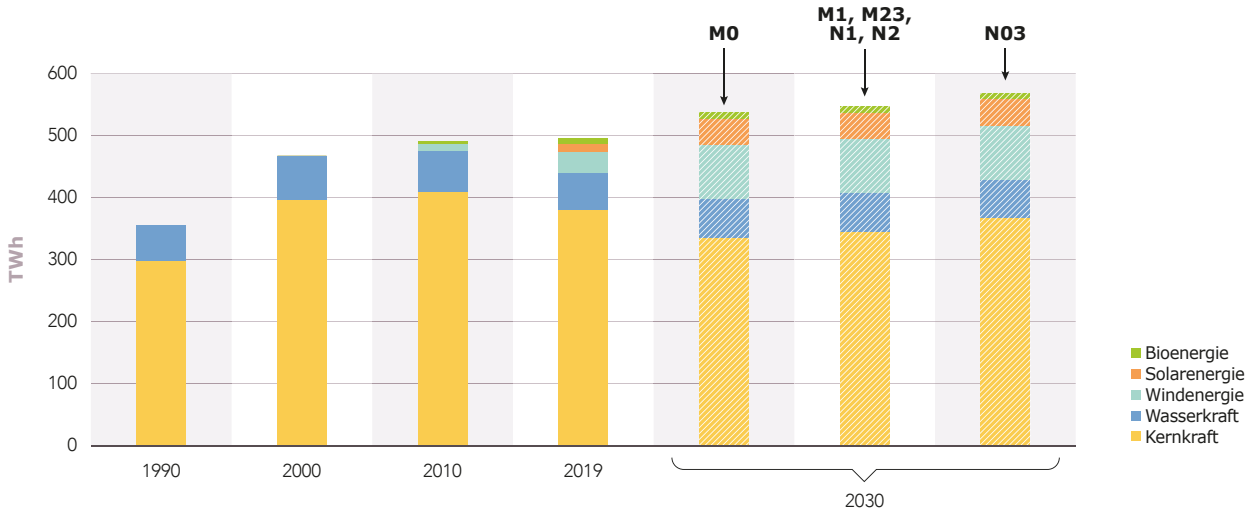
Der Entwicklungspfad ist vereinbar mit einem vorgezogenen Verkaufsstopp für Autos mit Diesel- oder Benzinmotor bis 2035, mit entschlossenen politischen Maßnahmen zum Ausstieg aus der Nutzung von Heizöl in Privathaushalten und Umstellung von Gas auf Wärmepumpen sowie mit erheblichen Reinvestitionen in den industriellen Anlagenbestand.

2 Dieser Entwicklungspfad setzt eine Maximierung der klimaneutralen Stromerzeugung voraus.

Der Ansatz einer Verstärkung der Erzeugungskapazitäten für klimaneutralen Strom (Kombinationsansatz „Erneuerbare + Kernenergie") weist kurz- bis mittelfristig die stärkste Klimabilanz auf und ist daher am besten geeignet, die Klimaziele bis 2030 umzusetzen.

Im Gegensatz dazu verringern Szenarien, die eine rasche Substitution der Kernenergie durch Erneuerbare vorsehen, das Potenzial der dekarbonisierten Erzeugung. Daher ist mit ihnen keine Beschleunigungsstrategie bis 2030 möglich und sie sind nur dann mit dem Ziel, die Emissionen auf ihrem derzeitigen Niveau zu halten, vereinbar, wenn erstens der Ausbau der erneuerbaren Energien tatsächlich sehr schnell erfolgt und zweitens die Hebel der Suffizienz (und nicht nur der Effizienz) betätigt werden.

Ergebnisse n° 17 Dekarbonisierte Stromerzeugung in Frankreich (historisch und Prognosen)



Diesen Ansatz zu verfolgen, bedeutet, gleichzeitig das Erneuerbaren-Ausbautempo auf das Maximum hochzufahren und die bestehenden Reaktoren unter Änderung des in der PPE vorgesehenen Abschalt-Zeitplans länger zu betreiben, wobei alle Reaktoren auch die von der ASN festgelegten Sicherheitsanforderungen erfüllen müssen. Allerdings müsste eine derartige Änderung des Zeitplans mit der langfristigen Strategie vereinbar bleiben, die Stilllegungen über einen längeren Zeitraum hinweg zu glätten, um den durch die Altersstruktur der bestehenden Kraftwerke bedingten „Klippeneffekt" zu vermeiden. Im Hinblick auf die Verstärkung der für 2030 angestrebten Klimaziele können die **Optionen, die im Rahmen der Ausarbeitung der künftigen PPE diskutiert werden müssen, also sowohl die Einhaltung oder sogar Beschleunigung des Entwicklungspfades für die erneuerbaren Energien als auch die Streckung des Zeitplans für die Abschaltung der Kernreaktoren anstreben. Dabei dürfen auch die notwendigen Bemühungen zur Verbrauchskontrolle nicht vernachlässigt werden.**

3 Der Ansatz einer Kombination verschiedener klimaneutraler Stromerzeugungsarten stellt in wirtschaftlicher Hinsicht eine äußerst wettbewerbsfähige Dekarbonisierungsoption dar.

Die emissionstechnisch vorteilhafte Kombinationsstrategie kann sich auf ökonomische Evaluierungen stützen, in denen ihre wirtschaftliche Leistungsfähigkeit hervorgehoben wird.

Die Kosten für die Verlängerung der Lebensdauer der Reaktoren einschließlich der Ausgaben für die Maßnahmen des Grand Carénage können auf 30 bis 40 Euro/MWh geschätzt werden. Damit bleibt der Weiterbetrieb der bestehenden Reaktoren sehr rentabel. Die Sensitivitätsanalysen zeigen, dass dies auch dann der Fall ist, wenn sich die an den Kraftwerken durchzuführenden Maßnahmen als länger oder teurer erweisen als erwartet. Die Risiken im Zusammenhang mit den vierten Zehnjahresuntersuchungen betreffen daher nicht die Kosten des Stromsystems, sondern die Versorgungssicherheit im Falle von langen Ausfallzeiten aufgrund des Umfangs der Maßnahmen. Allerdings wurde bei den bereits durchgeführten vierten Zehnjahresuntersuchungen der angekündigte Zeitplan eingehalten– abgesehen von Verzögerungen aufgrund der Coronakrise.

In wirtschaftlicher Hinsicht spricht RTE in seiner Bedarfsanalyse von 2017 eine mögliche Beschränkung der Verlängerung für den Fall europaweiter Erneuerbaren-Überkapazitäten an (stabile oder sinkende Stromnachfrage in den wichtigsten Ländern, hohes Tempo beim Ausbau der erneuerbaren Energien, niedrige Marktpreise). Diese kann heute angesichts der Entwicklung des europäischen Kontexts aufgehoben werden: Die Programme für den Ausbau der erneuerbaren Energien sind in Europa generell im Rückstand, während die Programme zur Stilllegung von Kernreaktoren den angekündigten Zeitplan einhalten – und so zu einer belastenden Situation bei der Versorgung mit klimaneutralem Strom führen – und die Entwicklungsperspektiven des Stromverbrauchs einer steigenden Tendenz folgen (insbesondere aufgrund der Einbeziehung der Wasserstofferzeugung).

Zudem bleibt der Ausbau der erneuerbaren Energien im Vergleich zum Wert einer vermiedenen Tonne CO_2 äußerst wettbewerbsfähig.

Insgesamt führt die von der PPE verfolgte Politik trotz der Einbeziehung der Ausgangskosten für die Entwicklung von Offshore-Windenergieanlagen und deren Netzanschluss nicht zu einem starken Anstieg der Systemkosten. In Kombination mit der Elektrifizierung der Nutzungen belaufen sich bei derartigen Stromgestehungskosten die CO_2-Vermeidungskosten auf 0 bis 200 Euro/tCO_2 im Verkehrsbereich, auf rund 100 Euro/tCO_2 für den Ersatz von mit fossilen Brennstoffen betriebenen Heizkesseln durch Wärmepumpen und auf etwa 150 bis 250 Euro/tCO_2 für die Erzeugung von klimaneutralem Wasserstoff. Alle diese Beträge liegen unter dem langfristigen staatlich festgelegten CO_2-Preis *(state imposed value of carbon)*.

4 Die Interkonnektoren des europäischen Stromsystems bewahren Frankreich vor der Gefahr von wirtschaftlich oder klimatisch bedingten „gestrandeten Kosten".

In einem vernetzten Stromsystem, in dem die Nachbarländer noch weitgehend oder überwiegend fossile Energieträger nutzen, besteht keine Gefahr, dass der Ausbau oder die Aufrechterhaltung eines klimaneutralen Stromerzeugungsparks in Frankreich zu gestrandeten Kosten führt. Stromexporte sind wirtschaftlich rentabel, wobei die auf dem europäischen Markt erzielten Preise meist von denen der fossilen Brennstoffe und dem CO_2-Preis auf dem EU-ETS-Markt abhängen.

Auf europäischer Ebene würde diese Situation zu einem Rückgang der Treibhausgasemissionen führen: Sollte der Aufwärtstrend des Stromverbrauchs in Frankreich verzögert einsetzen, würde das Land mehr Strom exportieren. Der Betrieb von Gas- und Kohlekraftwerken in den Nachbarländern würde dadurch noch weiter reduziert werden und der so bedingte Rückgang der CO_2-Emissionen in Europa entspräche den Einsparungen, die durch die Elektrifizierung der Gebräuche in Frankreich erreicht werden können.

18 Unabhängig von der Wahl des einen oder anderen Szenarios: Es besteht dringender Handlungsbedarf.

Aus allen bisher genannten Erkenntnissen ergibt sich der dringende Bedarf, sich auf verschiedene Formen von Notsituationen vorzubereiten.

So muss zunächst einmal in Reaktion auf die Klimakrise unbedingt die Dekarbonisierung auf den Weg gebracht werden.

Frankreich hat diesen Weg bereits eingeschlagen, muss aber in Zukunft verschiedene gewaltige Hürden überwinden, wie die von der Europäischen Union 2021 verabschiedete 55-prozentige Reduzierung der Nettoemissionen bis 2030 (im Vergleich zu 1990), die weitere Reduzierung bis 2040 und schließlich die vollständige Klimaneutralität bis 2050. Danach darf Frankreich nur noch geringfügige Emissionen in Höhe seiner eigenen Kohlenstoffsenken (vor allem Wälder und Kulturpflanzen) ausstoßen.

Ein Teil dieser Herausforderungen betrifft die Gebräuche: Sämtliche französischen Wirtschafts- und Industriesektoren müssen schrittweise umgestellt werden, um den Ausstieg aus dem Verbrauch fossiler Energieträger, insbesondere Öl und Gas, zu bewältigen.

Doch obwohl Frankreich bereits zahlreiche effiziente politische Maßnahmen ergriffen hat und auf europäischer Ebene wirtschaftliche Instrumente wie die Kohlenstoffmärkte einführt wurden, muss der eingeschlagene Entwicklungspfad rasch geändert werden, um den CO_2-Fußabdruck des Landes zu korrigieren. Angesichts der Klimakrise muss im nächsten Jahrzehnt wesentlich schneller vorangeschritten werden als im vergangenen. Dabei kommt es auch darauf an, dass die Gesellschaft die Ziele und eingeleiteten Projekte mitträgt und dass nicht nur die Emissionen aus Frankreich heraus verlagert werden. In dieser Hinsicht haben die „Energetischen Zukunftsperspektiven 2050" gezeigt, dass sich das Verbrauchsszenario „Re-Industrialisierung – hochgradig" bereits kurzfristig vorteilhaft auf die Reduzierung des französischen CO_2-Fußabdrucks auswirkt. Dabei ist auch zu betonen, dass die Abkehr von der Abhängigkeit von fossilen Energieträgern über geopolitische und souveränitätsbezogene Überlegungen hinaus auch eine strukturelle Antwort auf die Energiekrisen der vergangenen Jahrzehnte mit ihrem bis heute starken Anstieg der Preise für fossiles Gas und Öl darstellt.

Die zweite – stark mit der ersten zusammenhängende – Dringlichkeit betrifft die Energieeffizienz und generell die Verbrauchskontrolle.

Über das Ziel hinaus, durch Umstellung auf umweltfreundlichere Energieträger wie dekarbonisierten Strom „weniger zu emittieren", muss Frankreich seine generelle Verpflichtung zur Energieeffizienz fortsetzen, um „weniger zu verbrauchen". Der angestrebte Wert einer 40-prozentigen Reduzierung innerhalb von 30 Jahren ist ehrgeizig, aber erreichbar und absolut unumgänglich, wenn Frankreich den eingeschlagenen Weg weiterverfolgen möchte.

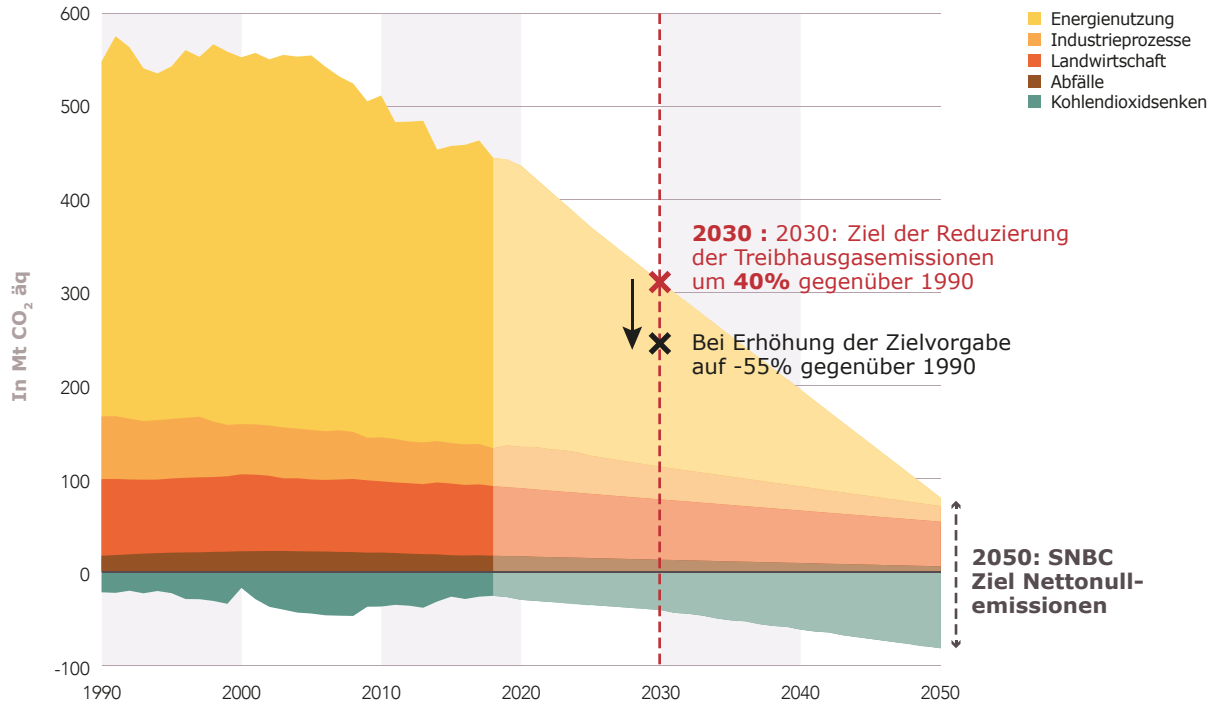
Die dritte Dringlichkeit betrifft den Wandel in den beiden Technologien zur klimaneutralen Energieerzeugung, die 2050 noch bestehen werden: Bioenergie und Strom.

Die Definition des Stromsystems von morgen steht im Zentrum der „Energetischen Zukunftsperspektiven 2050", in denen verschiedene mögliche Wege zu einem in Europa eingebetteten, klimaneutralen Frankreich aufgezeigt und anschließend miteinander verglichen werden. Die Studie zeigt, dass auch in industrieller Hinsicht ein vielfältiger Handlungsbedarf besteht.

So ist es ist auf jeden Fall notwendig, die Errichtung von Anlagen zur klimaneutralen Stromerzeugung mit allen erdenklichen Mitteln zu vereinfachen und zu beschleunigen. Die tatsächlichen oder derzeit abzusehenden Fristen für die Genehmigung und den Bau von Onshore- oder Offshore-Windenergieanlagen, PV-Freiflächenanlagen oder neuen Kernreaktoren sind sehr lang und verzögern die Inbetriebnahme heute beschlossener Projekte weit über 2030 hinaus. **Derartige Fristen sind nicht mit dem Anspruch vereinbar, die französischen Emissionen zu reduzieren, insbesondere, wenn dabei auf eine dieser drei großen Technologien verzichtet werden soll.**

Aber diese Ambitionen sind nicht unrealistisch, solange ihre Umsetzung in einer friedlichen und konstruktiven Debatte vorangebracht wird. Darin liegt die Aufgabe der Prospektivstudie „Energetische Zukunftsperspektiven 2050": die Debatte und

Ergebnisse n° 18 Entwicklung der Treibhausgasemissionen und -senken (bisherige Entwicklung und Ziele)



(Quelle: SNBC)

anschließend die öffentliche Entscheidung mit fundierten, transparenten und wissenschaftlich unterlegten und erörterten Daten zu unterstützen.

Der vollständige Bericht vom 25. Oktober 2021 befasst sich mit den wichtigsten Erkenntnissen aus Phase II. Im ersten Quartal 2022 wird er durch weiterführende Analysen zu bestimmten Varianten und Szenarien ergänzt werden. RTE empfiehlt, die vertiefte Studie zu den möglichen Zukunftsperspektiven des Stromsektors in fünf Jahren zu aktualisieren, nachdem die Leitlinien der französischen Energie- und Klimastrategie im Rahmen des künftigen Programmgesetzes verabschiedet wurden.

Le réseau
de transport
d'électricité

RTE
Immeuble WINDOW - 7C Place du Dôme,
92073 PARIS LA DEFENSE CEDEX
www.rte-france.com

RTE Réseau de transport d'électricité, Société anonyme à Directoire et Conseil de surveillance au capital de 2 132 285 690 € - RCS Nanterre 444 619 258 - Mise en page : Good Eye'D - © adobestock : sharpnose, macrovector, Taras Livyy - Impression sur papiers issus de forêts gérées durablement.

IMPRIM'VERT®

Energetische Zukunfts-perspektiven 2050

Wichtigste Ergebnisse

Oktober 2021

ZUSAMMENFASSUNG