

BCG

THE BOSTON CONSULTING GROUP

prognos

Wir geben Orientierung.

Klimapfade für Deutschland



The Boston Consulting Group (BCG) ist eine internationale Managementberatung und weltweit führend auf dem Gebiet der Unternehmensstrategie. BCG unterstützt Unternehmen aus allen Branchen und Regionen dabei, Wachstumschancen zu nutzen und ihr Geschäftsmodell an neue Gegebenheiten anzupassen. In partnerschaftlicher Zusammenarbeit mit den Kunden entwickelt BCG individuelle Lösungen. Gemeinsames Ziel ist es, nachhaltige Wettbewerbsvorteile zu schaffen, die Leistungsfähigkeit der Unternehmen zu steigern und das Geschäftsergebnis dauerhaft zu verbessern. BCG wurde 1963 von Bruce D. Henderson gegründet und ist heute an 90 Standorten in über 50 Ländern vertreten. Das Unternehmen befindet sich im alleinigen Besitz seiner Geschäftsführer. Weitere Informationen finden Sie auf unserer Internetseite www.bcg.de.

Prognos – Wir geben Orientierung.
Wer heute die richtigen Entscheidungen für morgen treffen will, benötigt gesicherte Grundlagen. Prognos liefert sie – unabhängig, wissenschaftlich fundiert und praxisnah. Seit 1959 erarbeiten wir Analysen für Unternehmen, Verbände, Stiftungen und öffentliche Auftraggeber. Nah an ihrer Seite verschaffen wir unseren Kunden den nötigen Gestaltungsspielraum für die Zukunft – durch Forschung, Beratung und Begleitung. Unsere ökonomischen Modelle sind einzigartig, unsere Prognosen genügen höchsten Ansprüchen. Unser Ziel ist stets das eine: Ihnen einen Vorsprung zu verschaffen, im Wissen, im Wettbewerb, in der Zeit. Weitere Informationen finden Sie auf unserer Internetseite www.prognos.com.

Klimapfade für Deutschland

**Philipp Gerbert | Patrick Herhold | Jens Burchardt | Stefan Schönberger |
Florian Rechenmacher | Almut Kirchner | Andreas Kemmler | Marco Wunsch**

Januar 2018



VORBEMERKUNG

Die vorliegende Studie wurde unabhängig im Auftrag des Bundesverbandes der Deutschen Industrie (BDI) durch The Boston Consulting Group (BCG) und Prognos erstellt. Unser besonderer Dank gilt dem Einsatz der Beteiligten aus den Mitgliedsverbänden des BDI sowie den zahlreichen Experten für konstruktive Beiträge und Unterstützung bei der Validierung der Analysen.

Während angemessene Maßnahmen zur Sicherstellung der Fehlerfreiheit der in dieser Studie dargestellten Informationen getroffen wurden, geben BCG und Prognos keine Zusicherungen und Gewährleistungen für die Richtigkeit der getroffenen Aussagen und übernehmen keine Haftung für Ungenauigkeiten und Unvollständigkeiten (einschließlich für Informationen über die Realisierung oder Angemessenheit von etwaigen künftigen Prognosen, geschäftlichen Zielen, Schätzungen, Gewinnaussichten oder Renditen). Interessierten Parteien, die diese Studie nutzen, gegenüber wird weder jetzt noch in Zukunft durch BCG, Prognos, ihre Partner, Mitarbeiter oder Vertreter eine ausdrückliche oder implizite Zusicherung oder Gewährleistung gegeben oder eine Verantwortung oder Haftung übernommen. Jegliche Haftung ist hiermit ausdrücklich ausgeschlossen. Die Ergebnisse dieser Studie sollten nicht uneingeschränkt ohne eigene unabhängige Analysen verwendet werden, für welche BCG und Prognos ebenfalls keine Haftung übernehmen.



INHALT

1	EINLEITUNG UND ZUSAMMENFASSUNG	5
2	KLIMAPFADE FÜR DEUTSCHLAND	21
2.1	Szenarien und Klimapfade	21
2.1.1	Vorgehen und Methodik	21
2.1.2	Annahmen und Rahmenbedingungen der Szenarien	26
2.1.3	Ökonomische Entwicklung als Grundlage aller Szenarien	36
2.2	Referenzpfad – Fortschreibung laufender Anstrengungen	38
2.3	80 %-Klimapfad – Intensivierung bestehender Maßnahmen	46
2.4	95 %-Klimapfad – Wirtschaft fast frei von fossilen Emissionen	58
2.5	Bewertung möglicher Game-Changer	72
3	ÖKONOMISCHE EFFEKTE DES KLIMASCHUTZES	77
3.1	Vermeidungskosten, Investitionen, Mehrkosten	77
3.1.1	Vermeidungskosten der THG-Maßnahmen	77
3.1.2	Mehrinvestitionen und Mehrkosten der Klimapfade	85
3.2	Ökonomische Folgeeffekte	96
3.3	Chancen für die deutsche Industrie	107
3.4	Herausforderungen für Wirtschaft und Politik	112
4	POLITISCHE HANDLUNGSFELDER	119
4.1	Langfristige, sektorübergreifende Rahmenbedingungen	120
4.2	Politische Impulse und Richtungsentscheidungen	122
4.3	Investitionen in Infrastruktur, Forschung und Qualifikation	125
4.4	Monitoring und flexible Begleitung	127
4.5	Flankierung und Schutzmaßnahmen	128
5	SEKTORBETRACHTUNG: INDUSTRIE	131
5.1	Klimapfade	132
5.1.1	Hintergrund und Zusammenfassung	133
5.1.2	Effizienztechnologien	139
5.1.3	Energieträgersubstitution	144
5.1.4	Prozessbedingte Emissionen	150
5.2	Vermeidungskosten, Investitionen, Mehrkosten	155
6	SEKTORBETRACHTUNG: VERKEHR	167
6.1	Klimapfade	168
6.1.1	Hintergrund und Zusammenfassung	169
6.1.2	Verkehrsleistung und Verkehrsmittelwechsel	174
6.1.3	Pkw und leichte Nutzfahrzeuge	178
6.1.4	Schwerer Güterverkehr mit Lkw und Sattelzügen	183
6.1.5	Bahn-, Luft-, Bus- und Schiffsverkehr	187
6.1.6	Kraftstoffwechsel	190
6.2	Vermeidungskosten und Investitionen	193

7	SEKTORBETRACHTUNG: HAUSHALTE UND GHD	205
7.1	Klimapfade	206
7.1.1	Hintergrund und Zusammenfassung	207
7.1.2	Raumwärme und Warmwasser	212
7.1.3	Geräte und Prozesse	225
7.2	Vermeidungskosten und Investitionen	228
8	SEKTORBETRACHTUNG: ENERGIE UND UMWANDLUNG	235
8.1	Klimapfade	236
8.1.1	Hintergrund und Zusammenfassung	238
8.1.2	Nachfrage und Erzeugung	245
8.1.3	Flexibilität	254
8.1.4	Versorgungssicherheit	258
8.2	Investitionen, Mehrkosten, Stromkosten	260
8.2.1	Investitionen	262
8.2.2	Volkswirtschaftliche Mehrkosten	266
8.2.3	Kosten des Stromsystems	268
9	SEKTORBETRACHTUNG: LAND- UND ABFALLWIRTSCHAFT	271
9.1	Landwirtschaft	271
9.2	Abfallwirtschaft	275
9.3	Andere Sektoren	277
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	278
	TABELLENVERZEICHNIS	280
	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	281
	AN DEN LESER	284



1 EINLEITUNG UND ZUSAMMENFASSUNG

Mit dem **Ziel**, bis zum Jahr 2050 die Treibhausgasemissionen (THG) in Deutschland um 80 bis 95 Prozent gegenüber 1990 zu senken, hat die Bundesregierung im Einklang mit der Europäischen Union einen ehrgeizigen deutschen Beitrag zur Begrenzung des Klimawandels angekündigt. Die Verwirklichung dieser Zielsetzung ist ein langfristiges politisches, wirtschaftliches und gesellschaftliches Großprojekt von enormer Tragweite.

Vor diesem Hintergrund wurden The Boston Consulting Group (BCG) und die Prognos AG vom Bundesverband der Deutschen Industrie e. V. (BDI) mit der Erarbeitung der vorliegenden Studie beauftragt. Ziel der Studie ist es, volkswirtschaftlich kosteneffiziente **Wege** zur Erreichung der deutschen Emissionsminderungsziele aufzuzeigen. Dabei sollen Deutschlands Wettbewerbsfähigkeit und Industriestruktur grundsätzlich erhalten bleiben und deutschen Exporteuren zusätzliche Chancen am Weltmarkt eröffnet werden. Basis hierfür ist eine umfassende, technologieoffene Analyse technischer und wirtschaftlicher THG-Reduktionsmaßnahmen und -potenziale bis 2050.

Die Ergebnisse der Studie wurden in einem umfangreichen und intensiven **Bottom-up-Prozess** mit der deutschen Industrie erarbeitet und validiert. Fast 200 Experten von BCG, Prognos, dem BDI und aus rund 70 Unternehmen und Verbänden waren über einen Zeitraum von sieben Monaten eingebunden. In fünf Arbeitsgruppen und mehr als 40 Workshops wurden unter anderem bestehende Erkenntnisse zusammengetragen, neue Ansätze zur Emissionsreduktion entwickelt, Annahmen validiert sowie Technologiepotenziale, Kosten, Chancen und Handlungsfelder diskutiert. Ein Beirat aus Wissenschaftlern und Arbeitnehmervertretern stand dem Projekt in zentralen Fragen beratend zur Seite. Wesentliche Aspekte wurden darüber hinaus in zahlreichen Interviews mit führenden Experten plausibilisiert. Damit kann die Studie eine objektive und breit abgesicherte Faktenbasis für den weiteren gesellschaftlichen und politischen Diskurs bereitstellen.

Naturgemäß bestehen hohe Unsicherheiten hinsichtlich langfristiger Entwicklungen der Klimaambitionen und -instrumente in anderen Ländern, der Energieträger- und CO₂-Preise, der Technologiekosten sowie zahlreicher anderer Rahmenbedingungen. Um diesen Unsicherheiten Rechnung zu tragen, wurden keine Prognosen erstellt, sondern **Szenarien** mit unterschiedlichen Annahmen und ausgewählten Sensitivitäten quantitativ und modellgestützt auf energie- und volkswirtschaftlicher Ebene untersucht. Damit sollen eine Bandbreite denkbarer Entwicklungen analysiert und möglichst robuste Schlussfolgerungen gezogen werden. Innerhalb der Szenarien wurden möglichst **kosteneffiziente Pfade** modelliert, welche die Klimaziele der Bundesregierung in 2050 erreichen. Dafür wurden THG-Maßnahmen nach direkten volkswirtschaftlichen Vermeidungskosten priorisiert.

Die Studie ist das Ergebnis eines umfangreichen und intensiven Prozesses mit der deutschen Industrie

Im ersten Teil der Studie werden **bestehende Anstrengungen** („Referenzpfad“) bewertet, um die Lücke zwischen einer unter derzeitigen Rahmenbedingungen absehbaren Entwicklung und den Emissionsreduktionszielen von 80 bzw. 95 Prozent zu beziffern. Danach werden die technischen Maßnahmen beschrieben, mit denen nach heutigem Stand eine volkswirtschaftlich kosteneffiziente und gesellschaftlich akzeptable Erreichung dieser Ziele möglich wäre („**80 %-Klimapfad**“, „**95 %-Klimapfad**“). Zusätzlich zu diesen Klimapfaden werden Maßnahmen diskutiert, deren technologische und wirtschaftliche Reife aus heutiger Sicht auch bis 2050 nicht hinreichend sicher scheint, die aber bei Eintritt dieser Reife einen signifikanten Beitrag zum Klimaschutz leisten könnten (sogenannte **Game-Changer**).

In Kapitel 3 werden diese Pfade in zwei Szenarien bezüglich der internationalen Rahmensetzungen zu Klimaschutzanstrengungen ökonomisch bewertet („Nationale Alleingänge“ vs. „Globaler Klimaschutz“). Betrachtet werden dazu Vermeidungskosten der zugrunde liegenden Maßnahmen, nötige Mehrinvestitionen und -kosten sowie gesamtheitliche **ökonomische Auswirkungen**.¹ Zudem werden wirtschaftliche **Chancen und Herausforderungen** diskutiert, die sich bei der Umsetzung der Klimapfade ergeben können. Abschließend erfolgt eine Identifizierung der dringlichsten **politischen Handlungsfelder**. Detailbetrachtungen der untersuchten Sektoren Industrie, Verkehr, Haushalte und Gewerbe, Energie und Umwandlung sowie Land- und Abfallwirtschaft finden sich in den Kapiteln 5 bis 9.

Die wesentlichen Erkenntnisse der Studie sind im Folgenden zusammengefasst.

Zehn Kernergebnisse der Studie

1. Mit einer Fortsetzung derzeitiger Anstrengungen in Form bestehender Maßnahmen, beschlossener politischer und regulatorischer Rahmenbedingungen sowie absehbarer Technologieentwicklungen („Referenzpfad“) werden bis 2050 ca. **61 Prozent Treibhausgas(THG)-Reduktion** gegenüber 1990 erreicht. Es verbleibt damit eine Lücke von 19 bis 34 Prozentpunkten zu den deutschen Klimazielen.
2. **80 Prozent THG-Reduktion** sind technisch möglich und in den betrachteten Szenarien volkswirtschaftlich verkraftbar. Die Umsetzung würde allerdings eine deutliche Verstärkung bestehender Anstrengungen, politische Umsteuerungen und ohne globalen Klimaschutzkonsens einen wirksamen Carbon-Leakage-Schutz erfordern.
3. **95 Prozent THG-Reduktion** wären an der Grenze absehbarer technischer Machbarkeit und heutiger gesellschaftlicher Akzeptanz. Eine solche Reduktion (über den 80 %-Pfad hinaus noch einmal um drei Viertel) erfordert praktisch Nullemissionen für weite Teile der deutschen Volkswirtschaft. Dies würde neben einem weitestgehenden Verzicht auf alle fossilen Brennstoffe² unter anderem den Import erneuerbarer Kraftstoffe (Power-to-Liquid/-Gas), den selektiven Einsatz aktuell unpopulärer Technologien wie Carbon-Capture-and-Storage (CCS) und sogar weniger Emissionen im Tierbestand bedeuten – eine erfolgreiche Umsetzung wäre nur bei ähnlich hohen Ambitionen in den meisten anderen Ländern vorstellbar.

¹ Im Szenario „Nationale Alleingänge“ wurden für den 95%-Klimapfad keine ökonomischen Auswirkungen untersucht, da dieser Pfad, wie im Folgenden erläutert, kaum realistisch erscheint.

² Als Brennstoffe werden nachfolgend im Allgemeinen feste, flüssige und gasförmige Energieträger bezeichnet. Flüssige und gasförmige Brennstoffe, die im Verkehrssektor eingesetzt werden, werden nachfolgend als Kraftstoffe bezeichnet.



4. Mehrere „**Game-Changer**“ könnten die Erreichung der Klimaziele in den nächsten Jahrzehnten potenziell erleichtern und günstiger gestalten (unter anderem Technologien für die Wasserstoffwirtschaft und Carbon-Capture-and-Utilization-Verfahren). Ihre Einsatzreife ist aktuell noch nicht sicher absehbar und wird daher zur Erreichung der Ziele nicht unterstellt. Sie müssten allerdings mit Priorität erforscht und entwickelt werden.
5. Die kosteneffiziente Erreichung der Klimapfade würde aus heutiger Sicht in Summe **Mehrinvestitionen** von 1,5 bis 2,3 Billionen Euro bis 2050 gegenüber einem Szenario ohne verstärkten Klimaschutz erfordern, davon ca. 530 Milliarden Euro für eine Fortschreibung bereits bestehender Anstrengungen (im Referenzpfad). Dies entspricht bis 2050 durchschnittlichen jährlichen Mehrinvestitionen in Höhe von ca. 1,2 bis 1,8 Prozent des deutschen Bruttoinlandsprodukts (BIP). Die direkten volkswirtschaftlichen **Mehrkosten** nach Abzug von Energieeinsparungen lägen bei etwa 470 bis 960 Milliarden Euro bis 2050 (etwa 15 bis 30 Milliarden Euro pro Jahr), davon ca. 240 Milliarden Euro für bestehende Anstrengungen.³
6. Bei optimaler politischer Umsetzung wären die **gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen** der betrachteten Klimapfade dennoch neutral („schwarze Null“), im betrachteten 80 %-Klimapfad wäre dies sogar im Szenario ohne globalen Konsens der Fall. Dabei wäre jedoch ein umfangreicherer Schutz gefährdeter Industrien nötig, um dem Risiko einer Schwächung industrieller Wertschöpfung zu begegnen – in Form eines wirksamen Carbon-Leakage-Schutzes und langfristig verlässlicher Ausgleichsregelungen für Industrien im internationalen Wettbewerb.
7. Erfolgreiche Klimaschutzbemühungen wären mit einer umfangreichen Erneuerung aller Sektoren der deutschen Volkswirtschaft verbunden und könnten deutschen Exporteuren weitere **Chancen** in wachsenden „Klimaschutzmärkten“ eröffnen. Studien erwarten, dass das Weltmarktvolumen der wichtigsten Klimatechnologien bis 2030 auf 1 bis 2 Billionen Euro pro Jahr wachsen wird. Deutsche Unternehmen können für diesen globalen Wachstumsmarkt ihre Technologieposition stärken.
8. Gleichzeitig wird der anstehende Transformationsprozess Deutschland vor erhebliche **Umsetzungsherausforderungen** stellen. Die betrachteten Klimapfade sind volkswirtschaftlich kosteneffizient und unterstellen eine ideale Umsetzung unter anderem im Sinne sektorübergreifender Optimierung und „richtiger Entscheidungen zum richtigen Zeitpunkt“. Fehlsteuerungen in der Umsetzung – wie z. B. in der Energiewende durch Überförderungen und die Verzögerung des Netzausbaus beobachtbar – können die Kosten und Risiken erheblich steigen oder das Ziel sogar unerreichbar werden lassen.
9. Erfolgreicher Klimaschutz in Deutschland könnte einerseits international Nachahmer motivieren. Andererseits wären im Fall signifikant negativer wirtschaftlicher Auswirkungen die deutschen Klimaschutzbemühungen sogar kontraproduktiv, da sie andere Staaten abschrecken würden, während der deutsche Anteil am globalen

³ Mehrinvestitionen enthalten alle zusätzlichen Investitionen zur Erreichung der Klimapfade über im Referenzszenario getroffene Investitionen hinaus. Zur Berechnung der Mehrkosten wurden diese mit 2 Prozent volkswirtschaftlichem Realzins über die Lebensdauer des jeweiligen Kapitalguts annualisiert. Energiekosteneinsparungen und -ausgaben wurden gegengerechnet. Hierfür wurden Grenzübergangspreise für fossile Energieträger und Stromsystemkosten angesetzt. Die Mehrinvestitionen und -kosten für nichtwirtschaftliche Maßnahmen des Referenzszenarios wurden darüber hinaus grob abgeschätzt.

THG-Ausstoß (rund 2 Prozent) das Klima allein nicht wesentlich beeinflusst. Eine **international vergleichbar ambitionierte Umsetzung** zumindest in den größten Volkswirtschaften (G20) würde diese Risiken deutlich mindern und deutschen Unternehmen außerdem breitere Exportchancen eröffnen.

10. Eine erfolgreiche Erreichung der deutschen Klimaziele und eine positive internationale Multiplikatorwirkung sind daher ein politischer, gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Kraftakt. Gefragt ist eine weitsichtige **Klima-, Industrie- und Gesellschaftspolitik** „aus einem Guss“, die auf Wettbewerb und Kosteneffizienz setzt, gesellschaftliche Lasten fair verteilt, Akzeptanz für die Maßnahmen sicherstellt sowie den Erhalt und Ausbau industrieller Wertschöpfung priorisiert. Dazu bedarf es für das „Großprojekt Klimaschutz“ einer langfristigen politischen Begleitung.

Die zehn Kernergebnisse werden nachfolgend im Sinne einer Zusammenfassung konkretisiert und in den Folgekapiteln detailliert.

1. Mit einer Fortsetzung derzeitiger Anstrengungen in Form bestehender Maßnahmen, beschlossener politischer und regulatorischer Rahmenbedingungen sowie absehbarer Technologieentwicklungen („Referenzpfad“) werden bis 2050 ca. 61 Prozent Treibhausgas(THG)-Reduktion gegenüber 1990 erreicht. Es verbleibt damit eine Lücke von 19 bis 34 Prozentpunkten zu den deutschen Klimazielen.
 - Bereits in der Vergangenheit wurden durch Anstrengungen von Wirtschaft, Gesellschaft und Politik erhebliche Emissionsminderungen in Deutschland erreicht: Im Jahr **2015** lagen die nationalen THG-Emissionen Deutschlands 28 Prozent unter denen des Jahres 1990. Nur ein Teil dieses Rückgangs kam durch Nachwendeeffekte zustande.
 - Auch über die nächsten 35 Jahre werden bei Fortschreibung aktueller Rahmenbedingungen und Entwicklungen in den meisten Sektoren Emissionen reduziert. Im Referenzpfad gehen Deutschlands nationale Emissionen gegenüber 1990 um ca. 61 Prozent bis 2050 zurück. Es verbleibt damit eine deutliche **Lücke von ca. 19 bis 34 Prozentpunkten** zu den Regierungszielen von 80 bis 95 Prozent. Die 2050 verbliebenen Emissionen betragen damit noch in etwa das Doppelte bis Achtfache der angestrebten „Restmengen“ (20 Prozent bzw. 5 Prozent gegenüber 1990).
 - Im **Gebäudesektor** führen Sanierungsanstrengungen auf heutigem Niveau sowie weiterhin effiziente Neubaustandards und ein stetiger Ausbau erneuerbarer Technologien zur Wärmeerzeugung bis 2050 zu einer Reduzierung der Emissionen um ca. 70 Prozent gegenüber 1990.
 - Der weitere Umbau der Stromerzeugung inklusive des umfangreichen Ausbaus erneuerbarer Energien und des teilweisen Auslaufens der Kohleverstromung führt im **Energiesektor** bis 2050 zu einer Emissionsreduktion von mehr als 70 Prozent gegenüber 1990.

Ca. 61 Prozent
THG-Reduktion
zwischen 1990
und 2050 im
Referenzpfad



- In der **Industrie** sinken durch Effizienzfortschritte die Emissionen weiter, allerdings wird diese Reduktion durch 1,2 Prozent jährliches Wirtschaftswachstum bis 2050 teilweise wieder ausgeglichen. Im Ergebnis resultiert daraus dennoch eine Reduktion der energie- und prozessbedingten THG-Emissionen um etwa 48 Prozent gegenüber 1990 (22 Prozent gegenüber 2015). Damit zukünftiger Emissionsrückgang nicht durch Verlagerung traditionell emissionsintensiver Industrien ins Ausland „erkauft“ wird, wurde in dieser Studie ein umfangreicher Carbon-Leakage-Schutz unterstellt, der die Industrie von direkten und indirekten CO₂-bedingten Mehrkosten aus dem europäischen Emissionshandelssystem (EU-ETS), die über das heutige Niveau hinausgehen, befreit.
 - Emissionen im **Verkehr** liegen infolge der gegenüber 1990 deutlich höheren Verkehrsleistung ungefähr auf dem Niveau von 1990. Die zunehmende Durchdringung mit effizienteren Fahrzeugen⁴ und die absehbare Elektrifizierung senken Emissionen im Referenzpfad bis 2050 um ca. 40 Prozent – trotz weiter steigender Verkehrsleistungen im Güterverkehr.
 - Bereits diese Maßnahmen erfordern bis 2050 **Mehrinvestitionen** von etwa 530 Milliarden Euro (Mehrkosten nach Abzug von Energieeinsparungen: 240 Milliarden Euro); dies beinhaltet i. W. einen weiteren Ausbau von erneuerbaren Energien und Netzen im Stromsektor, nichtwirtschaftliche Maßnahmen zur Einhaltung von Flottengrenzwerten im Verkehr und einzelne nichtwirtschaftliche Maßnahmen der Gebäudesanierung.
2. 80 Prozent THG-Reduktion sind technisch möglich und in den betrachteten Szenarien volkswirtschaftlich verkraftbar. Die Umsetzung würde allerdings eine deutliche Verstärkung bestehender Anstrengungen, politische Umsteuerungen und ohne globalen Klimaschutzkonsens einen wirksamen Carbon-Leakage-Schutz erfordern.
- Eine Beschleunigung der **Sektorkopplung** ermöglicht bei gleichzeitiger Emissionssenkung im Stromsystem signifikante THG-Einsparungen vor allem in Verkehr und Gebäuden, beispielsweise durch rund 26 Millionen elektrische Pkw⁵ und rund 14 Millionen Wärmepumpen⁶ in 2050.
 - Parallel ist in mehreren Sektoren eine höhere Ausschöpfung von **Energiesparpotenzialen** durch stärkere Durchdringung mit effizientesten Technologien möglich, sodass im Ergebnis die gesamte Nettonachfrage nach Strom in einem 80 %-Klimapfad um lediglich 3 Prozent ansteigt.
 - Eine Beschleunigung der **Stromwende** durch einen zusätzlichen jährlichen Ausbau von ca. einem Gigawatt erneuerbarer Stromerzeugungskapazitäten (auf 4,7 GW Nettozubau pro Jahr) kann bei dieser Stromnachfrage fast 90 Prozent erneuerbare Erzeugung in 2050 erreichen; Gaskraftwerke würden im betrachteten Szenario bis dahin nach und nach anstelle von Kohlekraftwerken als flexibles „Backup“ die Versorgung sicherstellen.

80 Prozent THG-Reduktion sind technisch möglich und in den betrachteten Szenarien volkswirtschaftlich verkraftbar

⁴ Und anderen Verkehrsmitteln (z. B. im Flugverkehr).

⁵ Hierzu werden in dieser Studie batterieelektrische Pkw, Plug-in-Hybride und Brennstoffzellen-Pkw gezählt.

⁶ Um die dafür notwendige Durchdringung auch im Gebäudebestand zu erreichen, ist eine Intensivierung bestehender Sanierungsaktivitäten erforderlich – mit einer durchschnittlichen Sanierungsrate von 1,7 statt 1,1 Prozent.

95 Prozent
THG-Reduktion an
der Grenze techni-
scher Machbarkeit
und gesellschaftlicher
Akzeptanz

- Um die damit verbundene Zunahme volatiler Erzeugung auszugleichen, ist neben mehr Speicherkapazität auch eine **Flexibilisierung** neuer Stromverbraucher, unter anderem Elektroautos und Wärmepumpen, zwingend erforderlich. Das wirtschaftliche Potenzial für nationale elektrische Brennstoffproduktion aus „Stromüberschüssen“ (**Power-to-X-Anwendungen**) ist allerdings begrenzt.
 - National nachhaltig verfügbare **Biomasse**⁷ sollte prioritär im Industriesektor eingesetzt werden, um dort Kohle und Gas in der industriellen Nieder- und Mitteltemperaturwärmeerzeugung zu ersetzen.
 - Die volkswirtschaftlichen Auswirkungen scheinen im untersuchten Szenario insgesamt für Deutschland **verkraftbar** (im Durchschnitt knapp 15 Milliarden Euro Mehrkosten pro Jahr, plus 0,4 bis 0,9 Prozent BIP in 2050). Der damit verbundene Transformationsprozess erfordert jedoch umsichtige staatliche Lenkung und wird einzelne Industrien vor erhebliche **Herausforderungen** stellen.
 - Der betrachtete kosteneffiziente 80 %-Klimapfad ist für das Jahr 2050 optimiert. Die im aktuellen Klimaschutzplan für 2030 vorgesehenen **Sektorziele** würden dafür nicht in jedem Sektor erreicht werden müssen; insgesamt beträgt die Abweichung knapp 35 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalent bzw. 3 Prozentpunkte der Emissionen des Jahres 1990.
3. 95 Prozent THG-Reduktion wären an der Grenze absehbarer technischer Machbarkeit und heutiger gesellschaftlicher Akzeptanz. Eine solche Reduktion (gegenüber dem 80 %-Pfad noch einmal um drei Viertel) erfordert praktisch Nullemissionen für weite Teile der deutschen Volkswirtschaft. Dies würde neben einem weitestgehenden Verzicht auf alle fossilen Brennstoffe unter anderem den Import erneuerbarer Kraftstoffe (Power-to-Liquid/-Gas), den selektiven Einsatz aktuell unpopulärer Technologien wie Carbon-Capture-and-Storage (CCS) und sogar weniger Emissionen im Tierbestand bedeuten – eine erfolgreiche Umsetzung wäre nur bei ähnlich hohen Ambitionen in den meisten anderen Ländern vorstellbar.
- Eine Emissionsreduzierung von 95 Prozent gegenüber 1990 erfordert quasi **Nullemissionen** in Energie, Verkehr, Gebäuden und industrieller Wärmeerzeugung, da in anderen Sektoren Restemissionen bestehen bleiben – insbesondere in der Landwirtschaft.
 - Nullemissionen im **Stromsystem** wären erreichbar, wenn zuvor fossile flexible Backup-Erzeugung zu 100 Prozent mit Power-to-Gas betrieben wird und damit im Gasnetz ein saisonaler Energiespeicher entsteht.
 - Die Wärmeerzeugung in der **Industrie** ließe sich durch den Einsatz national verfügbarer Biomasse sehr weitgehend „de-fossilisieren“ und könnte über „Carbon-Capture-Verfahren“ außerdem zu großen Teilen als biogene Kohlenstoffquelle für die Power-to-Gas-Erzeugung einen Systemnutzen erfüllen.

⁷ Vor allem bestehende und wenige bisher ungenutzte Feststoffe, keine Importe oder Umwidmung landwirtschaftlicher Flächen.



- Im **Gebäudebestand** müssten bis 2050 knapp 80 Prozent der Gebäude auf heutiges Neubauniveau saniert und fossile Energieträger in der Wärmeerzeugung vollständig ersetzt werden – vor allem durch Wärmepumpen und emissionsfreie Fernwärme.
- **Verkehrsanwendungen** müssten noch stärker elektrifiziert werden – durch Batteriefahrzeuge im Personenverkehr und bei leichten Nutzfahrzeugen sowie z. B. Lkw-Oberleitungen auf den wichtigsten Autobahnstrecken im Güterverkehr. Gleichzeitig müsste eine schnellere Verlagerung von Verkehrsleistung auf jeweils energieeffizientere Verkehrsmittel (Bahn, Busse, Binnenschiffe) erfolgen. Zur vollständigen Vermeidung fossiler Emissionen im Flug-, Schiffs-, Schwerlast- und Personenverkehr wäre außerdem der Einsatz von erneuerbarem Treibstoff (Power-to-Liquid/Gas) erforderlich.
- Dafür wären umfangreiche **Importe** synthetischer Kraftstoffe aus Ländern mit günstigeren Bedingungen für erneuerbare Energien nötig. Dennoch sanken Energieimporte bis 2050 insgesamt um fast 80 Prozent gegenüber 1990.⁸
- Die insgesamt erforderliche **Nettostromerzeugung** von 715 TWh (2015: 610 TWh) lässt sich aus inländischer erneuerbarer Energie decken, ohne dass Potenzialgrenzen in Deutschland erreicht oder überschritten werden.⁹ Eine darüber hinausgehende vollständige Elektrifizierung aller Sektoren wäre nicht nur sehr teuer, sondern könnte den Strombedarf verdoppeln. In Anbetracht der wahrscheinlichen Potenzialgrenzen wäre dies aus heutiger Sicht nicht realistisch.
- Solange mögliche Alternativen nicht deutlich günstiger werden, wäre nach heutigem Stand **CCS** erforderlich, um Prozessemissionen in der Stahl- und Zementproduktion, der Dampfreformierung in der Chemie sowie Emissionen in verbliebenen Raffinerien und bei der Müllverbrennung zu eliminieren. Dafür wären nach derzeitigem Stand allerdings noch gravierende Akzeptanzprobleme in der Bevölkerung zu überwinden.
- Außerdem wäre für eine vollständige Zielerreichung nach heutigem Stand auch eine Emissionssenkung im landwirtschaftlichen **Tierbestand** nötig (um ca. 30 Prozent gegenüber heute), z. B. über methanausstoßhemmende Futtermittelzusätze („Methanpille“).¹⁰
- Die **verbleibenden 5 Prozent Emissionen** würden zu fast 70 Prozent aus der Landwirtschaft stammen; dazu kämen Restemissionen vor allem aus Industrie- prozessen und Abfallwirtschaft.

⁸ Nach Energiegehalt. Rückgang der Energieimportkosten wäre weniger stark, da die Kosten synthetischer Kraftstoffe über den Kosten fossiler Energieträger liegen.

⁹ Die Ausbaupotenziale der erneuerbaren Energien unterliegen technischen, ökologischen, ökonomischen und akzeptanzbedingten Restriktionen. Die vorliegende Studie geht davon aus, dass das Potenzial für Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland auf zwischen 800 und 1.000 TWh pro Jahr begrenzt ist (vgl. Abbildung 71 in Kapitel 8.1.2).

¹⁰ Aktuell denkbare Alternativen wären lediglich eine Steigerung der Kohlenstoffsenkeigenschaften landwirtschaftlicher Böden, gemäß aktueller Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen allerdings nicht zielrelevant (LU-LUCF), sowie die Abscheidung biogener Emissionen aus Biomasseverbrennung (CCS mit Negativemissionen), mit zumindest im benötigten Umfang unklarer Umsetzbarkeit.

Technologische
„Game-Changer“
könnten die
Erreichung der
Klimaziele erleichtern

- In Summe wäre ein solcher Pfad damit mit deutlich gravierenderen Veränderungen verbunden und würde größere **Herausforderungen** in allen Sektoren (z. B. Power-to-Gas, erneuerbare Treibstoffe), das Überwinden aktueller Akzeptanzhürden (z. B. CCS, starker Stromnetzausbau, „Methanpille“) und sehr umfangreiche staatliche Begleitung und Navigation erfordern. Deshalb und in Anbetracht der hohen erforderlichen Mehrinvestitionen vor allem in heute emissionsintensiven Branchen scheint dieser 95 %-Pfad nur bei einem ähnlich hohen Ambitionsniveau in anderen großen Volkswirtschaften umsetzbar.

4. Mehrere „Game-Changer“ könnten die Erreichung der Klimaziele in den nächsten Jahrzehnten potenziell erleichtern und günstiger gestalten (unter anderem Technologien für die Wasserstoffwirtschaft und Carbon-Capture-and-Utilization-Verfahren). Ihre Einsatzreife ist aktuell noch nicht sicher absehbar und wird daher zur Erreichung der Ziele nicht unterstellt. Sie müssten allerdings mit Priorität erforscht und entwickelt werden.

- Eine radikal steilere Lernkurve bei **Photovoltaik** („dritte Generation“) und insbesondere elektrochemischen (sowie ggf. alternativen) **Speichertechnologien** würde günstigere Elektrizität deutlich umfangreicher verfügbar machen und eine noch breitere Elektrifizierung im Verkehr ermöglichen (z. B. Batterie-Lkw).
- Effizientere Erzeugung und bessere Lösungen für Transport und Speicherung von **Wasserstoff**, wie auch effizientere **Power-to-X**-Erzeugungsverfahren, könnten in vielen Sektoren weitere Technologiealternativen schaffen und damit langfristig fossile Kohlenstoffe ersetzen.
- Im Industriesektor würden kostengünstigere **Carbon-Capture-and-Utilization**(CCU)-Verfahren geschlossene Kohlenstoffkreisläufe ermöglichen.
- Nicht zuletzt würden neue Technologien bei der **Bindung und Lagerung abgechiedener Kohlenstoffe** die nicht dauerhaft nachhaltige CCS-Technologie ersetzbar machen.
- Aufgrund mangelnder aktueller Reife wurden solche „Game-Changer“ in den Klimapfaden nicht unterstellt, sie sind jedoch hochprioritäre **Forschungsfelder**. Außerdem sollten politische Rahmenbedingungen zur Erreichung der Klimaziele so flexibel und offen gestaltet sein, dass sie Anreize für solche Innovationen setzen.

Mehrinvestitionen
von 1,5 bis 2,3
Billionen Euro bis
2050 für Erreichung
der Klimapfade

5. Die kosteneffiziente Erreichung der Klimapfade würde aus heutiger Sicht in Summe Mehrinvestitionen von 1,5 bis 2,3 Billionen Euro bis 2050 gegenüber einem Szenario ohne verstärkten Klimaschutz erfordern, davon ca. 530 Milliarden Euro für eine Fortschreibung bereits bestehender Anstrengungen (im Referenzpfad). Dies entspricht bis 2050 durchschnittlichen jährlichen Mehrinvestitionen in Höhe von ca. 1,2 bis 1,8 Prozent des deutschen Bruttoinlandsprodukts (BIP). Die direkten volkswirtschaftlichen Mehrkosten nach Abzug von Energieeinsparungen lägen bei etwa 470 bis 960 Milliarden Euro bis 2050 (etwa 15 bis 30 Milliarden Euro pro Jahr), davon ca. 240 Milliarden Euro für bestehende Anstrengungen.



- Vier Fünftel der im kosteneffizienten Pfad unterstellten und notwendigen Maßnahmen zur Erreichung eines 80 %-Klimaziels (bezogen auf das Emissionssenkungspotenzial) sind mit direkten volkswirtschaftlichen **Vermeidungskosten** verbunden. Dies betrifft auch alle weiteren Maßnahmen für den 95 %-Klimapfad.
 - Insgesamt erfordert die Erreichung eines 80 %-Klimaziels im Vergleich zum Referenzpfad bei unterstellter optimaler Umsetzung **Mehrinvestitionen** in Höhe von etwa 970 Milliarden Euro; zur Erreichung des 95 %-Klimaziels wären weitere etwa 800 Milliarden Euro nötig, davon ca. 180 Milliarden Euro für den Aufbau von Produktionskapazitäten für synthetische Kraftstoffe im Ausland. Zudem erfordert bereits die Referenz geschätzt 530 Milliarden Euro. Die gesamten Mehrinvestitionen betragen damit ca. 1,5 bis 2,3 Billionen Euro – das entspricht jährlich etwa 1,2 bis 1,8 Prozent des deutschen Bruttoinlandsprodukts.
 - Da vielen dieser Investitionen auch Einsparungen (i. W. bei den Energiekosten) gegenüberstehen, betragen die direkten volkswirtschaftlichen **Mehrkosten** der Klimapfade bei optimaler Umsetzung sektorübergreifend 230 bzw. 720 Milliarden Euro bis 2050. Zusätzlich belaufen sich die Mehrkosten für nichtwirtschaftliche Maßnahmen der Referenz ca. 240 Milliarden Euro. Insgesamt wären also volkswirtschaftliche Mehrkosten in Höhe von 470 bis 960 Milliarden Euro bis 2050 zu tragen – im Schnitt etwa 15 bis 30 Milliarden Euro pro Jahr.
 - Diesen Berechnungen liegen heute schon absehbare Entwicklungen der **Technologiekosten** zugrunde. Im Falle schneller durchschrittener Lernkurven, weiterer Innovationen und z. B. noch umfangreicherer Effekte aus Industrie 4.0 und Digitalisierung könnten sich entsprechend geringere Mehrkosten ergeben.
6. Bei optimaler politischer Umsetzung wären die gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen der betrachteten Klimapfade dennoch neutral („schwarze Null“), im betrachteten 80 %-Klimapfad wäre dies sogar im Szenario ohne globalen Konsens der Fall. Dabei wäre jedoch ein umfangreicherer Schutz gefährdeter Industrien nötig, um dem Risiko einer Schwächung industrieller Wertschöpfung zu begegnen – in Form eines wirksamen Carbon-Leakage-Schutzes und langfristig verlässlicher Ausgleichsregelungen für Industrien im internationalen Wettbewerb.
- Bei globalem Klimaschutz und entsprechendem „Level Playing Field“ haben alle betrachteten Klimapfade bei optimaler Umsetzung sehr geringe, aber tendenziell positive Effekte auf das **Bruttoinlandsprodukt** (etwa plus 0,9 Prozent in 2050).
 - Der **80 %-Klimapfad** hätte bei optimaler Umsetzung sogar im Szenario ohne globalen Konsens noch einen neutralen BIP-Effekt („schwarze Null“). Bei ineffizienter Umsetzung und Steuerung kann sich dieser Effekt allerdings nivellieren.
 - Ein wesentlicher positiv wirkender Faktor ist die stark abnehmende Abhängigkeit von **Energieimporten** – Importmengen fossiler Energieträger sinken bis

Neutrale volkswirtschaftliche Auswirkungen der Klimapfade – im 80 %-Klimapfad sogar ohne globalen Konsens

2050 im 80 %-Klimapfad um 70 Prozent und im 95 %-Klimapfad um 85 Prozent.¹¹

- Dadurch profitiert die Mehrheit der **Branchen** von steigender nationaler Wertschöpfung, z. B. die Bauindustrie, die Elektroindustrie, Teile der Energiewirtschaft oder der Maschinen- und Anlagenbau.
- Trotz insgesamt positiver volkswirtschaftlicher Effekte können für einzelne Sektoren und Unternehmen gleichzeitig erhebliche **betriebswirtschaftliche Risiken** entstehen. Diese Risiken sind umso größer, je stärker Branchen im internationalen Wettbewerb stehen.
- Um die Gefahr einer (schleichenden) Abwanderung energie- und heute noch emissionsintensiver Industrien zu minimieren und ein Aufbrechen von nationalen Wertschöpfungsnetzwerken zu verhindern, wäre daher ein wirksamer politischer **Carbon-Leakage-Schutz** erforderlich. Abhängig vom parallelen Ambitionsniveau in anderen großen Volkswirtschaften müssten dafür entsprechend umfangreichere Ausgleichsregelungen geschaffen werden.

Chancen durch umfangreiche Erneuerung der deutschen Volkswirtschaft und Teilhabe an globalen Wachstumsmärkten

7. Erfolgreiche Klimaschutzbemühungen wären mit einer umfangreichen Erneuerung aller Sektoren der deutschen Volkswirtschaft verbunden und könnten deutschen Exporteuren weitere Chancen in wachsenden „Klimaschutzmärkten“ eröffnen. Studien erwarten, dass das Weltmarktvolumen der wichtigsten Klimatechnologien bis 2030 auf 1 bis 2 Billionen Euro pro Jahr wachsen wird. Deutsche Unternehmen können für diesen globalen Wachstumsmarkt ihre Technologieposition stärken.
 - Die in den Klimapfaden beschriebene umfassende technische Modernisierung aller Sektoren eröffnet bei wirtschaftlich erfolgreicher Umsetzung die Chance, Deutschland als **Leitmarkt** für innovative, ressourceneffiziente Technologien auszubauen – ebenso für digitale Lösungen und System-Know-how.
 - Nicht erst seit dem Klimaschutzabkommen von Paris wächst die Nachfrage nach diesen Technologien weltweit. Studien Dritter weisen für 2030 ein **Weltmarktpotenzial** von 1 bis 2 Billionen Euro pro Jahr aus.
 - In vielen Segmenten ist das „Rennen“ um globale Marktführerschaft noch offen – und deutsche Unternehmen können für den globalen Wachstumsmarkt ihre **Technologieposition** stärken.
 - Für eine auf diese Chancen ausgerichtete **Innovationspolitik** taugt die bisherige Entwicklung des Windenergiesektors als positives Vorbild; der schnelle Verlust einer ehemaligen deutschen Vorreiterrolle bei Photovoltaik kann als Negativbeispiel gelten.
8. Gleichzeitig wird der anstehende Transformationsprozess Deutschland vor erhebliche Umsetzungsherausforderungen stellen. Die betrachteten Klimapfade sind volkswirtschaftlich kosteneffizient und unterstellen eine ideale Umsetzung unter anderem im Sinne sektorübergreifender Optimierung und „richtiger Entschei-

¹¹ Nach Energiegehalt. Es verbleiben Importe für die stoffliche Nutzung.



dungen zum richtigen Zeitpunkt“. Fehlsteuerungen in der Umsetzung – wie z. B. in der Energiewende durch Überförderungen und die Verzögerung des Netzausbaus beobachtbar – können die Kosten und Risiken erheblich steigen oder das Ziel sogar unerreichbar werden lassen.

- Die in dieser Studie betrachteten Klimapfade unterstellen eine **kosteneffiziente Auswahl und Umsetzung** der Maßnahmen.
- Allein der **80 %-Pfad** erfordert – zusätzlich zu bestehenden Anstrengungen – unter anderem eine weitere Beschleunigung der Energiewende im Stromsektor, eine deutliche Ausweitung der Sektorkopplung, eine höhere Ausschöpfung existierender Effizienzpotenziale sowie eine Umlenkung der Biomasse in die Industrie.
- Zur Erreichung von **95 Prozent Emissionsreduktion** wären die erforderlichen Anstrengungen noch einmal größer und komplexer – nötig wären z. B. ein vollständiger Verzicht auf fossile Brennstoffe, umfangreicher Import synthetischen Kraftstoffs, CCS in der Industrie sowie weniger Emissionen im Tierbestand. Neben der Lösung technischer und wirtschaftlicher Herausforderungen wären erhebliche Widerstände gegen Maßnahmen wie CCS oder Emissionsreduktionen im Tierbestand zu überwinden.
- Die bisherigen Erfahrungen aus der laufenden **Energiewende** verdeutlichen – trotz der Erfolge beim Ausbau erneuerbarer Energien – die Gefahr nicht optimaler Steuerung (z. B. Überförderungen, Verzögerung des Netzausbaus, stark steigende Redispatch-Kosten, kaum abgefederter Strukturwandel in der Energiewirtschaft). Komplexität, direkte Betroffenheit vieler Bürger und damit die Breite der zu überwindenden Technologieskepsis sowie auch der Veränderungsumfang bei Unternehmen wären bei sektorübergreifenden Anstrengungen zum Klimaschutz noch einmal deutlich höher.
- Mehrere **Umsetzungsrisiken** können die Erreichung der Ziele grundsätzlich teurer machen und Mehrkosten für betroffene Branchen damit vergrößern. Dazu zählen z. B. eine weitere Verzögerung des Netzausbaus, ein Ausbleiben der Flexibilisierung von Stromverbrauchern, ein weiterhin weniger effizienter Einsatz der Biomasse außerhalb des Industriesektors sowie ein Ausbleiben von Effizienzgewinnen in Gebäuden und in der Industrie, wodurch die Potenziale der Erneuerbaren schneller und stärker ausgeschöpft werden müssten.
- **Kostenrisiken** für einzelne Unternehmen und Branchen können außerdem deren internationale Wettbewerbsfähigkeit deutlich beeinträchtigen. Für stromintensive Unternehmen besteht z. B. durch den Umbau des Kraftwerksparks von Kernkraft und Kohle zu Gas ein großes Risiko steigender Wholesale-Preise, für das aktuell keine Befreiungsregelungen existieren.
- Außerdem kann der anstehende wirtschaftliche **Transformationsprozess** in mehreren Branchen (z. B. der Automobilindustrie) bestehende Wertschöpfungsnetzwerke gefährden. Mögliche positive Folgeeffekte der Klimaschutzmaßnahmen sind auch von Erhalt und Ausbau industrieller Wertschöpfung abhängig.

Anstehender Transformationsprozess birgt erhebliche Umsetzungs-herausforderungen

International
vergleichbar
ambitionierte
Umsetzung würde
Risiken senken,
Chancen erhöhen

Beides wird parallel zur Erreichung der Klimaziele eine umsichtige Industriepolitik und große Anpassungsanstrengungen erfordern.

9. Erfolgreicher Klimaschutz in Deutschland könnte einerseits internationaler Nachahmer motivieren. Andererseits wären im Fall signifikant negativer wirtschaftlicher Auswirkungen die deutschen Klimaschutzbemühungen sogar kontraproduktiv, da sie andere Staaten abschrecken würden, während der deutsche Anteil am globalen THG-Ausstoß (rund 2 Prozent) das Klima allein nicht wesentlich beeinflusst. Eine international vergleichbar ambitionierte Umsetzung zumindest in den größten Volkswirtschaften (G20) würde diese Risiken deutlich mindern und deutschen Unternehmen außerdem breitere Exportchancen eröffnen.
 - Im Jahr 2015 betrug Deutschlands Anteil an den globalen **THG-Emissionen** nur rund 2 Prozent, der Anteil der Europäischen Union ca. 12 Prozent. Selbst mit massivem Aufwand könnten Deutschland oder die EU den Klimawandel daher nicht allein stoppen.
 - Bei einem ambitionierten Angang der Treibhausgasemissionen stünde Deutschland als eine der führenden Industrienationen weiterhin unter intensiver **Beobachtung**.
 - Ein wirtschaftlich und gesellschaftlich erfolgreicher Klimaschutz in Deutschland kann daher eine positive Multiplikatorwirkung entfalten und böte die Chance, Deutschland als **Leitmarkt** für innovative und ressourceneffiziente Technologien auszubauen, aus dem heraus sich deutsche Unternehmen eine wertvolle Position im „Rennen“ um globale Marktführerschaft erarbeiten können.
 - Gleichzeitig würden negative wirtschaftliche Auswirkungen – seien es zu hohe Kosten oder ein kaum abgefederter Strukturwandel, wie in der Energiewende geschehen – die komplexe Transformation nicht nur unnötig verteuern und deren Akzeptanz und Umsetzbarkeit in Deutschland gefährden, sondern in vielen globalen Regionen **abschreckend wirken**. Damit wäre die ursprüngliche Ambition ins Gegenteil verkehrt.
 - Je größer der **internationale Konsens** und die Ähnlichkeit politischer Klimaschutzinstrumente in anderen Ländern – insbesondere in den G20 –, desto geringer sind die Risiken negativer struktureller wirtschaftlicher Auswirkungen eines ambitionierten Handelns für Deutschland. Gleichzeitig würde ein globaler Klimaschutzkonsens auch die Exportchancen deutscher Unternehmen für ressourceneffiziente Technologien erhöhen.
10. Eine erfolgreiche Erreichung der deutschen Klimaziele und eine positive internationale Multiplikatorwirkung sind daher ein politischer, gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Kraftakt. Gefragt ist eine weitsichtige Klima-, Industrie- und Gesellschaftspolitik „aus einem Guss“, die auf Wettbewerb und Kosteneffizienz setzt, gesellschaftliche Lasten fair verteilt, Akzeptanz für die Maßnahmen sicherstellt sowie den Erhalt und Ausbau industrieller Wertschöpfung priorisiert. Dazu bedarf es für das „Großprojekt Klimaschutz“ einer langfristigen politischen Begleitung.



- Die Politik steht vor der anspruchsvollen Aufgabe, die Umsetzung der komplexen Klimaschutzmaßnahmen mit der Wahrung und Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit des Standorts Deutschland, einer fairen Lastenverteilung sowie einer Sicherstellung der Akzeptanz der Maßnahmen in Einklang zu bringen. Dazu bedarf es einer langfristigen politischen **Begleitung des „Großprojekts Klimaschutz“** entlang von fünf politischen Handlungsfeldern.
- **Handlungsfeld 1: Langfristige, sektorübergreifende Rahmenbedingungen.** Hierzu zählen unter anderem ein internationaler Ansatz bei Klimaschutzinstrumenten, verlässliche Wettbewerbs- und Investitionsbedingungen sowie eine Ausrichtung der Klimaschutzpolitik auf Kosteneffizienz.
- **Handlungsfeld 2: Politische Impulse und Richtungsentscheidungen.** Für die Umsetzung eines 80 %-Klimaziels wären in allen Sektoren weitere Impulse erforderlich, z. B. für zusätzliche Effizienzsteigerungen, den weiteren Umbau des Stromsystems und zur Schaffung von Anreizen für Sektorkopplung sowie letztlich THG-Einsparungen. Für ein 95 %-Ziel wären in Anbetracht der ungleich höheren Ambition und umfangreicherer gesellschaftlicher Einschnitte außerdem eine öffentliche Richtungsdebatte sowie zentrale politische Weichenstellungen bereits in den kommenden Jahren erforderlich.
- **Handlungsfeld 3: Öffentliche Investitionen in Infrastruktur, Forschung und Qualifikation.** Für zentrale Infrastrukturinvestitionen¹² müsste die öffentliche Hand frühzeitig entsprechende Rahmenbedingungen schaffen und außerdem gezielt in die Erforschung von Zukunftstechnologien wie auch in Ausbildung und Qualifizierung investieren.
- **Handlungsfeld 4: Monitoring und flexible Begleitung.** Aufgrund von Unsicherheit über die Geschwindigkeit von Lernkurven, den Erfolg gesetzter Rahmenbedingungen, die Materialisierung getroffener Annahmen und die Entwicklung internationaler Klimaschutzambitionen wären ein kontinuierliches Monitoring der Erreichbarkeit der Ziele und der Fortschritte sowie flexible Kontrollmechanismen über die Zeit erforderlich.
- **Handlungsfeld 5: Flankierung und begleitende Maßnahmen.** Hierzu zählen das Sicherstellen einer ausgewogenen gesellschaftlichen Lastenverteilung, die Vermeidung und Abfederung von Strukturbrüchen sowie eine Verknüpfung von Klima- und Industriepolitik für Erhalt, Wachstum und Modernisierung der deutschen Industriestruktur parallel zur Erreichung der Klimaziele.

Fünf wesentliche
politische
Handlungsfelder

¹² Zentrale erforderliche Investitionen sind z. B. die Modernisierung des Systems Schiene, der Aufbau einer (Schnell-)Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge, Lkw-Oberleitungen sowie Speicher und Transportnetze für Carbon-Capture-and-Storage (CCS).

DIE STUDIE BESCHREIBT FÜNF KLIMAPFADE

ABBILDUNG 1 | Übersicht über Kernergebnisse der fünf Klimapfade

	REFERENZ	80 %-KLIMAPFAD Globaler Klimaschutz	Nationale Alleingänge	95 %-KLIMAPFAD Globaler Klimaschutz	Nationale Alleingänge
Maßnahmen bis 2050 (Auswahl)	<ul style="list-style-type: none"> • 76 % EE-Anteil an Nettostromerzeugung • 2050 noch 18 GW Kohle¹ • 14 Mio. elektrische Pkw (BEV, PHEV, H₂) • 1,1 % Sanierungsrate • 4 Mio. Wärmepumpen • Fortschr. Effizienzgewinne 	<ul style="list-style-type: none"> • 90 % EE-Anteil an Nettostromerzeugung • Auslaufen Kohlestromversorgung bis 2050, Ersatz durch Gas und Speicher • 26 Mio. elektrische Pkw, 4.000 km Lkw-Oberleitung • 1,7 % durchschnittliche Sanierungsrate 2015 – 2050 • 14 Mio. Wärmepumpen bis 2050 • Zusätzliche Effizienz und Biomasse in der Industrie 		<ul style="list-style-type: none"> • 100 % EE-Anteil an Nettostromerzeugung (inkl. PtG) • 340 TWh Importe synthetischer Brenn-/Kraftstoffe • Fossile Energieträger nur noch stofflich genutzt • 33 Mio. elektrische Pkw, 8.000 km Lkw-Oberleitung • 1,9 % durchschnittliche Sanierungsrate 2015 – 2050 • CCS in Teilen der Industrie • Weniger Emissionen im Tierbestand 	
Kosten² Mehrinvestitionen Direkte Mehrkosten	€ 530 Mrd. ³ € 230 Mrd. ³	€ 1.500 Mrd. € -270 Mrd. ⁴ / € 820 Mrd. ⁵	€ 1.500 Mrd. € 470 Mrd. ⁴ / € 470 Mrd. ⁵	€ 2.300 Mrd. € 380 Mrd. ⁴ / € 1.400 Mrd. ⁵	€ 2.300 Mrd. € 960 Mrd. ⁴ / € 960 Mrd. ⁵
Ökonomische Folgeeffekte	Basisannahme: Ca. 50 % BIP-Wachstum bis 2050	BIP-Effekt: +0,9 % 2050 ggü. Referenz	BIP-Effekt: +0,4 bis +0,6 % 2050 ggü. Referenz ⁶	BIP-Effekt: +0,9 % 2050 ggü. Referenz	Nicht untersucht
Chancen	Neutral (Basis der Betrachtung)	Nationales Investitions- und Modernisierungsprogramm und deutlich wachsender Weltmarkt für Klimatechnologien	Nationales Investitions- und Modernisierungsprogramm	Nationale Innovations- und Investitionsimpulse und rasant wachsende globale Nachfrage nach neuen Technologien (PtX, CCS, CCU, H ₂ etc.)	Vor allem nationale Innovations- und Investitionsimpulse
Risiken und Herausforderungen	Fortschreibung Energiewende, Netzausbau Wachstum E-Mobilität inkl. Infrastruktur	Deutliche Beschleunigung von Maßnahmen in allen Sektoren Mehrere Umsteuerungen, z. B. Biomasse in die Industrie	Zusätzlich: Steuerungskomplexität, u. a. zum Erhalt von Industrien im internationalen Wettbewerb Erhöhte Kostenrisiken	Grenzen technisch-wirtschaftlicher Machbarkeit Akzeptanz (z. B. bei CCS) Erhebliche, frühzeitige politische Umsteuerungen (z. B. synthetische Brenn-/Kraftstoffe)	Zusätzlich: Verschärfte Steuerungskomplexität zum Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit Erhebliche Akzeptanzprobleme (z. B. CCS im Alleingang) Verwerfungen durch hohe Mehrkosten für Stahl, Chemie u. a.

¹ Stromerzeugungskapazitäten ² Bei kosteneffizienter Umsetzung der optimierten Klimapfade; direkte Mehrkosten aus volkswirtschaftlicher Perspektive, CO₂-Preise sind nicht berücksichtigt ³ Investitionen und Kosten für nichtwirtschaftliche Maßnahmen in der Referenz, v. a. Fortschreibung der Energiewende, nichtwirtschaftliche Effizienzmaßnahmen zur Erreichung von Flottengrenzwerten im Verkehr, Teile Gebäudesanierung ⁴ Mehrkosten der Szenarien im Vergleich zur „Referenzwelt“ ⁵ Mehrkosten der Klimaschutzmaßnahmen innerhalb der Szenarien (niedrigere Energieträgerpreise bei globalem Klimaschutz erhöhen die Mehrkosten) ⁶ BIP-Spanne beinhaltet Sensitivität bei vollständigem Crowding-out der Klimaschutzinvestitionen (niedriger Wert) und ohne Crowding-out (höherer Wert)



DIE STUDIE IDENTIFIZIERT DIE WESENTLICHEN TECHNISCHEN STELLHEBEL FÜR KOSTENEFFIZIENTE KLIMAPFADE

ABBILDUNG 2 | Wesentliche technische Maßnahmen und ihre Ausprägungen bis 2050

	Wesentliche Maßnahmen	Referenz	80 %-Klimapfad	95 %-Klimapfad
Industrie	Energieeffizienz: Erhöhte Durchdringung heute bekannter Effizienztechnologien	30 – 50 % Durchdringung bei elektrischen Verbrauchern	90 % Durchdringung bei elektrischen Verbrauchern, Wärmeerzeugern und Prozesstechnologien (Stahl, Zement, Kalk)	
	Erneuerbare in der Wärme-/Dampferzeugung	58 TWh	172 TWh feste Biomasse in Niedertemperatur (< 500 °C)	100 % erneuerbar durch 196 TWh Biomasse, -gas, PtG
	CCS (Stahl, Ammoniak, Zement, Raffinerien, Abfallverbrennung)		Nicht genutzt (Akzeptanz)	93 Mt abgeschiedenes CO ₂
	CCU (für Power-to-Liquid/-Gas)		Begrenzt genutzt (Kosten)	19 TWh PtG/PtL, nur mit CO ₂ aus Biomasseverbrennung ¹
Verkehr	Verkehrsmittelwechsel (auf Bus, Bahn, Binnenschiff, nicht-motorisierte Verkehre)	2 % des Personenverkehrs 1 % des Güterverkehrs	7 % des Personenverkehrs (78 Mrd. Pkm), 7 % des Güterverkehrs (64 Mrd. tkm)	
	Antriebswechsel Pkw	14 Mio. E-Pkw ² , 2 Mio. Gas-Pkw	26 Mio. Pkw, 3 Mio. Gas-Pkw	33 Mio. E-Pkw, 2 Mio. Gas-Pkw
	Antriebswechsel Lkw (> 3,5 t)	0 km Oberleitung 8 % E-Lkw ³ , 1 % Gas-Lkw ⁴	4.000 km Oberleitung 48 % E-Lkw, 17 % Gas-Lkw	8.000 km Oberleitung 69 % E-Lkw, 16 % Gas-Lkw
	Synthetische Kraftstoffe		Nicht genutzt (Kosten)	125 TWh nationaler Verkehr 143 TWh internationaler Verkehr
Haushalte und GHD	Gebäudesanierung			
	<ul style="list-style-type: none"> Ø energetische Sanierungsrate 2015 – 2050 Effizienz sanierte Gebäude 2050⁵ 	<ul style="list-style-type: none"> • 1,1 % • ~ KfW-85-Niveau 	<ul style="list-style-type: none"> • 1,7 % • ~ KfW-70-Niveau 	<ul style="list-style-type: none"> • 1,9 % • ~ KfW-55- bis -70-Niveau
	Wärmepumpen und Fernwärme	<ul style="list-style-type: none"> • Anteil EEV_{Raumwärme + Warmwasser} • WP: 14 %, FW: 14 % 	<ul style="list-style-type: none"> • WP: 47 %, FW: 21 % 	<ul style="list-style-type: none"> • WP: 55 %, FW: 26 %
Energie und Umwandlung	Ausbau erneuerbarer Energien	76 % Nettostromerzeugung	88 % Nettostromerzeugung	100 % Nettostromerzeugung
	<ul style="list-style-type: none"> • Leistung Wind Onshore • Leistung Wind Offshore • Leistung Photovoltaik • Erneuerbares Power-to-Gas 	<ul style="list-style-type: none"> • 90 GW • 35 GW • 95 GW • 0 TWh 	<ul style="list-style-type: none"> • 97 GW • 47 GW • 105 GW • 0 TWh 	<ul style="list-style-type: none"> • 102 GW • 60 GW • 130 GW • 48 TWh_{el} aus 119 TWh_{ptG}
	Flexibilität und Versorgungssicherheit	<ul style="list-style-type: none"> • Netzausbau (UN und VN) • Installierte Leistung Gas • Speicher (v. a. Batterien, Pumpspeicher) 	<ul style="list-style-type: none"> • 142 Mrd. € • 62 GW • 9 GW 	<ul style="list-style-type: none"> • 184 Mrd. € • 61 GW • 16 GW
Landwirtschaft	THG-Einsparungen 2015 – 2050	8 Mt CO ₂ ä; i. W. Stickstoffeinsatz	22 Mt CO ₂ ä; i. W., Vergärung, Effizienz Düngemiteleinsatz	27 Mt CO ₂ ä; i. W. „Methanpille“ für Rinderbestand

¹ Fossiles CO₂ würde nicht zu hinreichenden THG-Senkungen führen, da es bei der Verbrennung wieder emittiert; Nutzung für stofflichen Einsatz ist nach heutigem Stand begrenzt. Zusätzlich werden im Inland 23 TWh Wasserstoff hergestellt, synthetische kohlenstoffhaltige Energieträger aus erneuerbaren Energien werden aus Kostengründen zu einem überwiegenden Teil importiert (340 TWh) ² BEV, PHEV, FCV ³ OL-Hybrid, FCV, PHEV, BEV ⁴ CNG, LNG ⁵ Die dargestellten KfW-Niveaus beziehen sich in dieser Studie ausschließlich auf den Raumwärme- und Warmwasserverbrauch
Quelle: Prognos; BCG

