

KLIMAPOLITIKFOLGENABSCHÄTZUNG

Deutschland 1990–2045

Nutzen – Aufwand – Risiken – Alternativen

Eine systematische Ex-post- und Ex-ante-Evaluation der deutschen Klimapolitik nach dem Prinzip der absoluten Nutzen-Risiko-Abwägung

Stand: September 2026 · Abschließende Fassung

Herausgeberin: Stichting Rudulin

Projektleiter: Markus Bönig

Herunterladbar auf: www.freiheitskanzlei.de/Klimapolitikfolgenabschaetzung

Zusammenfassung

Diese Folgenabschätzung behandelt die deutsche Klimapolitik wie eine Präventionsintervention: Entscheidend ist nicht, ob ein politisches Ziel erreicht oder eine Tonne CO₂ bilanziell vermieden wurde, sondern welcher zusätzliche globale Endnutzen dadurch entsteht und welcher reale Aufwand ihm gegenübersteht. Beobachtung, Attribution, Modellierung und Monetarisierung werden deshalb strikt getrennt. Messbar sind vor allem Emissionen, Energie- und Produktionsdaten sowie Finanzströme; schon die kausal zusätzlich vermiedene Tonne benötigt ein Gegenfaktum, und jede Übersetzung dieser Tonne in Temperatur, Schäden und Euro fügt weitere Unsicherheit hinzu.

Die naturwissenschaftliche Kernprüfung ergibt ein gemischtes, aber belastbares Bild. CO₂ ist ein lebensnotwendiges Spurengas; der CO₂-Düngungseffekt und eine erhöhte Wassernutzungseffizienz vieler Pflanzen sind real. Zugleich ist die atmosphärische CO₂-Konzentration seit dem 19. Jahrhundert deutlich gestiegen, und eine zusätzliche Strahlungswirkung von CO₂ ist spektroskopisch direkt beobachtet. Sonne, Ozeane, Wolken und Wasserdampf sind zentrale Komponenten des Klimasystems; daraus folgt weder, dass CO₂ der alleinige Klimatreiber ist, noch dass sein marginaler Einfluss null wäre. Die im Bericht verwendete TCRE-Beziehung von zentral 0,45 °C je 1.000 Gt CO₂ ist eine modellgestützte Aggregatbeziehung und kein Messwert für eine einzelne deutsche Maßnahme.

Für die abschließende Nutzen-Risiko-Rechnung wird eine bewusst konservative monetäre Untergrenzenbewertung benötigt. Nach Abwägung der im Bericht untersuchten negativen Endpunkte - Hitze, Extremniederschlag, Ozeanchemie, Produktivität und mögliche gesamtwirtschaftliche Schäden - gegen positive beziehungsweise schadensmindernde Effekte wie CO₂-Düngung, geringere Kältebelastung, Anpassung und technologische Reaktion setzt diese Evaluation den zentralen globalen Klimanutzen einer tatsächlich zusätzlich vermiedenen Tonne CO₂ auf 5 Euro. Dieser Wert ist kein gemessener Naturparameter, sondern eine vorsichtige Bewertungsentscheidung am unteren Rand dessen, was noch mit einem positiven globalen Netto-Klimaschaden vereinbar ist. Er liegt deutlich unter den meisten heutigen amtlichen und vielen wissenschaftlichen Mittelwerten, bleibt aber oberhalb von null, weil die direkte Strahlungswirkung und die kumulative Temperaturwirkung zusätzlichen CO₂ physikalisch nicht sinnvoll mit null angesetzt werden können. Als Sensitivitätsbereich werden 0 bis 5 Euro je Tonne geführt; 0 Euro bildet den Nullschadens-Stresstest, 5 Euro die zuvor verwendete deutlich weniger konservative zentrale Bewertung.

Damit wird die Größenordnung greifbar. Eine zusätzlich global vermiedene Gigatonne CO₂ besitzt im zentralen Bewertungsansatz einen Klimanutzen von rund 25 Mrd. Euro. Ein modelliert vermiedenes 0,001 °C entspricht bei der zentralen TCRE ungefähr 2,22 Gt CO₂ und damit rund 11,1 Mrd. Euro globalem Klimanutzen. Die im Bericht als großzügige Obergrenze gerechnete deutsche Restreduktion bis 2045 von 5,735 Gt CO₂ entspricht zentral etwa 0,00258 °C und damit rund 143 Mrd. Euro globalem Klimanutzen. Diese Beträge sind Bewertungswerte, keine gemessenen deutschen Einnahmen oder vermiedenen Rechnungen.

Auf der Aufwandseite sind die Größenordnungen wesentlich besser beobachtbar. Deutschland emittierte 2025 rund 573,5 Mio. t CO₂; 2024 entsprach dies etwa 1,48 % der globalen fossilen und industriellen CO₂-Emissionen. Bis 2021 flossen über die EEG-Umlage mehr als 200 Mrd. Euro; breitere Berechnungen des erneuerbaren Stromausbaus liegen bei knapp 300 Mrd. Euro. Für den historischen EEG-/Stromkomplex werden im Bericht rund 2,03 Gt bilanziell vermiedene Emissionen angesetzt. **Beim konservativen Klimanutzen von 5 EUR/t entspricht dies nur rund 10,2 Mrd. Euro globalem Klimanutzen gegenüber 200 bis 300 Mrd. Euro sichtbaren Brutto-Förder- beziehungsweise Belastungsströmen.** Das ist keine vollständige Nettowohlfahrtsrechnung, weil Vermögenswerte, Brennstoffersparnisse, Luftreinhaltung, Importreduktion und Innovationswirkungen hinzukommen; es zeigt aber, dass die reine Klimawirkung allein diese historischen Kostenströme in der konservativen Untergrenzenbewertung bei weitem nicht trägt.

Auch die Instrumente unterscheiden sich erheblich. Historische Brutto-Förderströme für erneuerbaren Strom liegen grob bei 100 bis 150 Euro je bilanziell vermiedener Tonne vor zusätzlichen Systemkosten; einfache Lebensdauerrechnungen für Gebäudeförderung bei etwa 140 bis 280 Euro je Tonne; beim früheren

Umweltbonus je nach Lebenszyklusvorteil und Additionalität bei ungefähr 160 bis 480 Euro je Tonne. Gegen einen konservativen Klimanutzen von 5 Euro je Tonne sind solche Instrumente deshalb nur dann gesamtgesellschaftlich positiv, wenn ihre lokalen Zusatznutzen, Vermögenswerte, Energieeinsparungen, Versorgungssicherheits- oder Innovationswirkungen die sehr große Differenz tatsächlich schließen. Je höher die Grenzkosten der letzten Tonnen Richtung Netto Null steigen, desto strenger wird diese Zusatzbegründung.

Die Untersuchung kommt daher nicht zu dem Ergebnis, Klimapolitik habe keinen Nutzen. Sie kommt zu einem strengeren Ergebnis: Der physische Klimaeffekt einer zusätzlich vermiedenen Tonne ist klein, aber positiv; sein Geldwert ist nicht messbar, sondern muss bewertet werden. Für eine bewusst konservative Untergrenzenrechnung beträgt der zentrale Bewertungswert dieser Evaluation 5 Euro je global zusätzlich vermiedener Tonne CO₂. Nationale Maßnahmen oberhalb dieses Werts sind nicht automatisch falsch, tragen ihre Rechtfertigung aber nicht mehr aus der reinen Klimawirkung allein. Dann müssen zusätzliche Vorteile konkret und quantitativ belegt werden. Zugleich zeigen die 2026 überarbeiteten Szenariorahmen, dass besonders weitreichende Zukunftspfade revidierbar sind; Modellwerte dürfen deshalb nie denselben Evidenzstatus erhalten wie gemessene Emissionen und Kosten.

Kernformel der Evaluation

Zusatznutzen = kausal zusätzlich vermiedene globale Emissionen × belastbar bewerteter Nutzen je vermiedener Tonne + lokale Zusatznutzen. Netto-Nutzen = Zusatznutzen – reale Zusatzkosten – monetarisierbare Nebenwirkungen – Opportunitätskosten. Eine nationale Zielerreichung ist ein Zwischenendpunkt, kein eigenständiger Wohlfahrtsnutzen.

Konservative Untergrenzenbewertung dieser Folgenabschätzung: 5 EUR globaler Klimanutzen je tatsächlich zusätzlich vermiedener Tonne CO₂; Sensitivitätsbereich 0-25 EUR/t.

Zentrale Kennzahlen

Kennzahl	Wert / Größenordnung	Bedeutung
Deutsche THG-Emissionen 1990	1.253 Mio. t CO ₂ -Äq.	Referenzjahr des KSG
Deutsche THG-Emissionen 2025	649 Mio. t CO ₂ -Äq.	-48,2 % ggü. 1990
Deutsche CO ₂ -Emissionen 2025	573,5 Mio. t CO ₂	88,4 % der deutschen THG-Emissionen
Deutscher Anteil am Welt-CO ₂ 2024	1,48 %	fossil + Industrie, ohne Landnutzung
China 2024	31,84 %	größter Einzelanteil
Indien 2024	8,27 %	stark wachsender Anteil
IPCC-TCRE	0,45 °C / 1.000 Gt CO ₂	beste Schätzung; 0,27–0,63 °C wahrscheinlich
Monetarisierter Klimanutzen	5 €/t CO ₂ konservativ	Bewertungswert der Evaluation; Sensitivität 0-25 €/t, kein Messwert
KTF-Programmausgaben 2025	26,6 Mrd. €	nur ein Teil der gesamten Klimapolitikkosten
Netzausbau bis 2045	>460 Mrd. € Investitionen	BRH; Systemkosten nicht mit Nettokosten gleichsetzen
Projizierte Brutto-THG 2045	212,5 Mio. t CO ₂ -Äq.	mit aktuell implementierten Instrumenten
Wert von 1 Gt zusätzlicher CO ₂ -Vermeidung	ca. 25 Mrd. €	bei konservativ 5 €/t
Wert von 0,001 °C vermiedener Erwärmung	ca. 11,1 Mrd. €	TCRE zentral; entspricht ca. 2,22 Gt CO ₂

TEIL I – Untersuchungsauftrag, Methodik und Beweismaß

1. Gegenstand der Evaluation

Gegenstand dieser Evaluation ist nicht die allgemeine Klimawissenschaft, sondern das Interventionssystem der deutschen Klimapolitik mit Schwerpunkt auf dem Zeitraum seit 1990 und besonderem Fokus auf die moderne Transformationsphase seit 2000. Untersucht werden CO₂-Bepreisung, europäischer und nationaler Emissionshandel, Förderung erneuerbarer Energien, Netzausbau, Gebäudepolitik, Wärme- und Effizienzprogramme, Verkehrs- und Flottenregulierung, industriepolitische Dekarbonisierung, Wasserstoffförderung, Kohleausstieg, klimapolitisch motivierte Finanzierung und die gesetzlichen Ziele 2030, 2040 und 2045.

Die Evaluation unterscheidet strikt zwischen naturwissenschaftlicher Wirkung einer vermiedenen Tonne, ökonomischer Bewertung des dadurch vermiedenen Schadens und politischer Bewertung einer konkreten Maßnahme. Dass eine vermiedene Tonne CO₂ nach dem IPCC-Modell einen positiven Klimanutzen besitzt, beweist nicht, dass jede Maßnahme zur Vermeidung dieser Tonne effizient ist. Umgekehrt beweisen hohe Kosten einzelner Maßnahmen nicht, dass Emissionsminderung insgesamt keinen Nutzen besitzt. Entscheidend ist der marginale Vergleich: Welcher zusätzliche globale Nutzen wurde mit dem jeweils zusätzlichen Aufwand erzielt?

Nicht Gegenstand einer vorweggenommenen Bewertung ist die Frage, ob Deutschland aus moralischen, historischen oder geopolitischen Gründen unabhängig von einer Kosten-Nutzen-Rechnung eine Vorreiterrolle übernehmen sollte. Solche Argumente werden separat ausgewiesen. Sie dürfen nicht unbemerkt in eine angeblich rein ökonomische Rechnung einfließen. Ebenso wird die gesetzliche Zielvorgabe 'Klimaneutralität 2045' nicht als Nutzen an sich bewertet. Ein gesetzliches Ziel ist eine normative Festlegung; der gesellschaftliche Nutzen ergibt sich erst aus seinen Folgen.

2. Die vollständige Wirkungskette

Wie bei einer medizinischen Präventionsmaßnahme muss die Intervention bis zum gesundheitlichen beziehungsweise gesellschaftlichen Endpunkt verfolgt werden. Für Klimapolitik ergibt sich folgende Kette:

1. Politisches Instrument verändert Preise, Verbote, Förderungen oder Investitionsbedingungen.
2. Dadurch verändert sich das Verhalten von Haushalten, Unternehmen und öffentlichen Akteuren.
3. Dies führt zu einer zusätzlichen Veränderung von Energieeinsatz, Produktion oder Technologie.
4. Daraus entsteht eine kausal zusätzliche Veränderung der territorialen Emissionen.
5. Handels- und Verlagerungseffekte bestimmen, wie groß die globale Netto-Emissionsänderung tatsächlich ist.
6. Die globale Netto-Emissionsänderung verändert die kumulativen CO₂-Emissionen.
7. Über die TCRE verändert sich die globale Temperaturentwicklung.
8. Die Temperaturänderung verändert Wahrscheinlichkeiten und Intensitäten klimabedingter Schäden.
9. Diese Schäden werden physisch oder monetär bewertet.
10. Erst dieser Endpunkt wird den Kosten und Nebenwirkungen des Instruments gegenübergestellt.

Jeder Übergang ist eine eigenständige empirische Behauptung. Der Nachweis, dass eine Wärmepumpe weniger direkte fossile Emissionen verursacht, beweist beispielsweise noch nicht den gesamten globalen Nettoeffekt, solange Strommix, Vorleistungen, Lebensdauer, Ersatzzeitpunkt und alternative Investitionen nicht berücksichtigt sind. Ebenso ist eine gesunkene nationale Emissionszahl kein hinreichender Beweis dafür, dass dieselbe Menge global vermieden wurde, wenn Produktion und damit Emissionen teilweise ins Ausland verlagert wurden.

3. Primäre, sekundäre und Prozessendpunkte

Ebene	Endpunkt	Warum wichtig
Primär	global kausal vermiedene t CO ₂ / CO ₂ -Äq.	entscheidender physischer Interventionsnutzen
Primär	vermiedener erwarteter Klimaschaden	eigentliche Wohlfahrtswirkung
Primär	Netto-Wohlfahrtsänderung	Nutzen nach Abzug aller realen Kosten
Sekundär	territoriale deutsche Emissionsminderung	wichtiger, aber unvollständiger Zwischenendpunkt
Sekundär	erneuerbarer Anteil / Effizienz / E-Auto-Bestand	Mechanismusindikatoren
Prozess	Fördervolumen, Zertifikatspreis, Verbote, Investitionen	Interventionsintensität
Unerwünscht	Preis-, Verteilungs-, Industrie-, Natur- und Verlagerungseffekte	Belastungsseite

4. Gegenhypothesen und Falsifizierbarkeit

H1 – hoher kausaler Zusatznutzen: Die Maßnahmen vermindern global erhebliche zusätzliche Emissionen zu Kosten unterhalb oder in der Nähe des realistischen gesellschaftlichen Nutzens je Tonne. Zusatznutzen wie Luftqualität, Importreduktion, Innovation und Resilienz verbessern die Bilanz weiter.

H2 – Emissionsminderung bei geringer Kosteneffizienz: Die Maßnahmen wirken physisch, vermeiden aber Tonnen zu Kosten deutlich oberhalb des realistischen Schadenswerts. Der Klimanutzen ist real, die gewählte Instrumentenform jedoch ineffizient.

H3 – territoriale Minderung ohne proportionalen globalen Nutzen: Ein relevanter Anteil der nationalen Reduktion entsteht durch Produktionsrückgang oder -verlagerung. Der nationale Zielindikator verbessert sich stärker als die globale Emissionsbilanz.

H4 – heterogene Wirksamkeit: Einige Instrumente besitzen sehr günstige Vermeidungskosten, andere sehr hohe. Eine pauschale Bewertung der 'Klimapolitik' wäre methodisch falsch; erforderlich ist eine Rangfolge nach marginalem Nutzen-Risiko-Verhältnis.

H5 – hohe Zusatznutzen rechtfertigen teurere Maßnahmen: Selbst wenn reine CO₂-Vermeidungskosten hoch sind, können Luftreinhaltung, Versorgungssicherheit, Innovationsspillover oder vermiedene fossile Importe die Nettobilanz positiv machen.

H6 – relevante Nebenwirkungen bei kleinem marginalem Zusatznutzen: Zusätzliche Ambitionssteigerungen nahe Netto Null verursachen stark steigende Grenzkosten, während der direkte deutsche Klimanutzen proportional zur vermiedenen Tonnage klein bleibt. Dies würde für internationale Kooperation, kostengünstige globale Vermeidung und technologische Offenheit sprechen.

5. Beweismaß und Quellenhierarchie

Die Evaluation priorisiert Primär- und Behördenquellen: IPCC für die physikalische Klimawirkung, Umweltbundesamt für deutsche Emissionsinventare und Projektionen, Global Carbon Budget für internationale CO₂-Daten, Bundesfinanzministerium für Haushalts- und KTF-Daten, Bundesrechnungshof für Systemkosten und Umsetzungsrisiken sowie Evaluationsberichte einzelner Förderinstrumente. Modellerte Größen werden ausdrücklich als Modelle bezeichnet; beobachtete Größen als Beobachtungen. Politische Zielwerte werden nicht mit empirischen Wirkungen verwechselt.

TEIL II – Was bringt eine vermiedene Tonne CO₂ ganz praktisch?

6. Vor jeder Nutzenrechnung: Was ist CO₂, was ist belegt, was ist Modell?

Vermiedene CO ₂ -Menge	Temperaturwirkung bei 0,45 °C / 1.000 Gt	wahrscheinliche Bandbreite
1 t	0,00000000000045 °C	0,27–0,63 × 10 ⁻¹² °C
1 Mio. t	0,00000045 °C	0,00000027–0,00000063 °C
100 Mio. t	0,000045 °C	0,000027–0,000063 °C
1 Mrd. t	0,00045 °C	0,00027–0,00063 °C
5 Mrd. t	0,00225 °C	0,00135–0,00315 °C
10 Mrd. t	0,0045 °C	0,0027–0,0063 °C

Eine Nutzen-Risiko-Evaluation der Klimapolitik darf nicht mit einem in Euro ausgedrückten „Klimaschaden pro Tonne“ beginnen. Das wäre methodisch dasselbe, als würde man bei einer Arzneimittelbewertung den angeblichen Geldwert einer verhinderten Erkrankung übernehmen, ohne zuvor zu prüfen, ob die Intervention den biologischen Endpunkt überhaupt kausal verändert. Zuerst ist deshalb die physikalische Kausalkette zu prüfen. Sie lautet nicht schlicht „CO₂ = Erwärmung = Schaden“, sondern: zusätzliche anthropogene Emission → Veränderung der atmosphärischen CO₂-Menge → Veränderung der Strahlungsbilanz → Reaktion von Atmosphäre, Ozean, Land, Eis, Wasserdampf und Wolken → Veränderung regionaler und globaler Klimagrößen → Veränderung konkreter Schadens- und Nutzendpunkte. Jeder Pfeil ist eine eigene empirische Behauptung. Dass ein frühes Glied belegt ist, beweist nicht automatisch die Größe jedes späteren Glieds.

Für diese Evaluation wird deshalb eine Evidenztrennung eingeführt. „Direkt gemessen“ bedeutet, dass der betreffende physikalische Effekt instrumentell beobachtet wurde. „Abgeleitet“ bedeutet, dass aus mehreren Messgrößen unter Verwendung physikalischer Beziehungen eine Größe berechnet wird. „Attribuiert“ bedeutet, dass konkurrierende Ursachen statistisch und physikalisch gegeneinander geprüft werden. „Modelliert“ bedeutet, dass ein nicht direkt beobachtbarer Gegenverlauf oder Zukunftspfad simuliert wird. „Monetarisiert“ bedeutet schließlich, dass physische Folgen in Geldwerte übersetzt werden. Diese fünf Stufen dürfen später nicht sprachlich vermischt werden.

6.1 CO₂ ist ein Spurengas – aber seine relative Zunahme ist groß

Kohlendioxid macht gegenwärtig nur rund 0,043 Prozent der trockenen Atmosphäre aus. Diese kleine absolute Konzentration ist real und sollte in jeder sachlichen Darstellung genannt werden. Aus der geringen Prozentzahl folgt jedoch physikalisch nicht, dass die Wirkung zwangsläufig gering sein muss; radiativ aktive Spurengase wirken in bestimmten Wellenlängenbereichen auch bei kleinen Volumenanteilen. Ebenso wichtig ist die zweite Zahl: Die Konzentration ist nicht seit 1895 praktisch unverändert geblieben.

Eisbohrkerne und direkte Messungen zeigen für die Zeit vor der Industrialisierung etwa 278 bis 280 ppm, für die Mitte des 20. Jahrhunderts bereits über 310 ppm und für 2025 global ungefähr 425,6 ppm. Im September 2026 lag der geglättete globale Wert bei rund 428 ppm. Das entspricht gegenüber vorindustriell einer Zunahme um gut 50 Prozent. Um 1895 lag die Konzentration nach Rekonstruktionen bei knapp 295 ppm; gegenüber diesem Niveau beträgt der Anstieg bis heute grob 45 Prozent. Die Aussage „es sind immer nur rund 0,04 Prozent gewesen“ beschreibt daher die Größenordnung des Volumenanteils, verschleiert aber eine erhebliche relative Veränderung innerhalb dieser kleinen Größenordnung.

Die Evaluation behandelt diese beiden Perspektiven parallel: 0,04 Prozent ist eine kleine absolute Konzentration; die Zunahme von rund 280 auf mehr als 425 ppm ist zugleich eine große relative Veränderung. Keine der beiden Aussagen darf die andere ersetzen. Für die Kausalfrage ist nicht der Prozentwert als solcher

entscheidend, sondern wie sich die spektrale Absorption und die gesamte Energiebilanz mit der Konzentration ändern.

6.2 CO₂ ist lebensnotwendig und kein „Gift“ – das beantwortet die Klimafrage aber noch nicht

CO₂ ist ein elementarer Rohstoff der Photosynthese. Pflanzen verbinden mit Hilfe von Lichtenergie Kohlendioxid und Wasser zu organischer Substanz; ohne atmosphärisches CO₂ gäbe es die heutige pflanzliche Primärproduktion und damit die Nahrungsgrundlage komplexer Ökosysteme nicht. Eine sachliche Evaluation darf CO₂ deshalb nicht wie einen klassischen toxischen Luftschadstoff behandeln. Der sogenannte CO₂-Düngungseffekt ist experimentell und durch Satellitenbeobachtungen belegt. Eine große, von NASA dargestellte Studie zum globalen „Greening“ kam für 1982 bis 2015 zu dem Ergebnis, dass zwischen einem Viertel und der Hälfte der bewachsenen Landflächen eine signifikante Zunahme der Blattfläche zeigte und dass in den verwendeten Modellen etwa 70 Prozent dieses Begrünungssignals auf den CO₂-Düngungseffekt entfielen. Stickstoffeinträge, Landnutzungsänderungen sowie Temperatur-, Niederschlags- und Strahlungsänderungen wirkten ebenfalls mit.

Dieser positive Effekt gehört zwingend auf die Nutzenseite einer CO₂-Gesamtbilanz. Er darf weder mit dem Hinweis abgetan werden, dass CO₂ zugleich Treibhausgas ist, noch darf er umgekehrt als Beweis verwendet werden, dass zusätzliche CO₂-Konzentrationen insgesamt nur vorteilhaft seien. Die Nettofrage lautet vielmehr: Wie groß sind zusätzliche Photosynthese, Wasser-Nutzungseffizienz und potenzielle Ertragsvorteile, wie stark werden sie durch Nährstoff-, Wasser- und Temperaturgrenzen begrenzt, und wie verhalten sie sich zu den nachteiligen Wirkungen einer zusätzlichen Erwärmung? Die Evaluationslogik verlangt ausdrücklich, positive und negative Endpunkte gemeinsam zu erfassen.

6.3 CO₂ ist nicht der „alleinige Verursacher“ des Klimas – und das behauptet die seriöse Attribution auch nicht

Das Klimasystem wird von mehreren externen und internen Einflussgrößen bestimmt. Dazu gehören die solare Einstrahlung, Vulkanaerosole, Treibhausgase wie CO₂, Methan und Lachgas, anthropogene Aerosole, Landnutzungsänderungen, Wolken, Wasserdampf, Eis- und Schneealbedo sowie interne Schwankungen von Atmosphäre und Ozean. Die Behauptung, CO₂ sei der alleinige Verursacher von Klimaänderungen, wäre fachlich falsch. Die relevante Frage ist enger: Welchen Anteil an der beobachteten längerfristigen Erwärmung seit dem 19. Jahrhundert erklären die verschiedenen Antriebe und Rückkopplungen?

Der IPCC ordnet die beobachtete Erwärmung von 1850–1900 bis 2010–2019 nicht allein CO₂ zu. Seine Synthese schätzt den Beitrag gut durchmischter Treibhausgase insgesamt auf etwa 1,0 bis 2,0 °C Erwärmung, während andere menschliche Einflüsse – vor allem Aerosole – einen Teil davon abgekühlt haben. Natürliche solare und vulkanische Antriebe werden für denselben Zeitraum mit ungefähr –0,1 bis +0,1 °C bewertet; interne Variabilität mit etwa –0,2 bis +0,2 °C. Diese Zahlen sind Ergebnisse von Attributionsstudien und daher nicht mit direkten Messungen gleichzusetzen. Sie zeigen aber, dass die etablierte wissenschaftliche Position gerade nicht lautet „nur CO₂ bestimmt das Klima“.

6.4 Gibt es einen direkten Messbeleg für eine CO₂-Strahlungswirkung?

Für die Grundfrage, ob zusätzliches CO₂ die terrestrische Wärmestrahlung messbar beeinflusst, existieren inzwischen direkte Beobachtungen. Satellitenspektren von 1970 und 1997 zeigten Veränderungen der ausgehenden langwelligen Strahlung genau in Spektralbereichen, die CO₂, Methan, Ozon und bestimmten FCKW zugeordnet werden. Harries und Kollegen werteten diese Unterschiede als direkte experimentelle Evidenz für eine Zunahme des Treibhauseffekts. Eine spätere Studie von Feldman und Kollegen maß an zwei Bodenstationen zwischen 2000 und 2010 den spektralen Anstieg der abwärts gerichteten langwelligen Strahlung und ordnete einen Trend von etwa 0,2 W/m² pro Dekade dem in dieser Zeit um 22 ppm gestiegenen CO₂ zu. Diese Messungen sind wichtig, weil sie eine verbreitete zu starke Behauptung widerlegen: Es ist nicht richtig, dass es „überhaupt keinen Beweis“ dafür gebe, dass zusätzliche CO₂-Moleküle die Strahlungsbilanz beeinflussen.

Genauso wichtig ist aber die Begrenzung dieses Befunds. Der direkte Nachweis der radiativen Wirkung beweist nicht automatisch eine bestimmte Klimasensitivität, keinen bestimmten Temperaturanstieg bis 2100 und erst recht keinen bestimmten volkswirtschaftlichen Schaden. Zwischen einem gemessenen spektralen Strahlungseffekt und einem gesellschaftlichen Endschaden liegen Rückkopplungen, Ozeanwärmeaufnahme, Wolken, Aerosole, natürliche Variabilität, Anpassung und ökonomische Reaktionen. Die Evaluation trennt deshalb streng zwischen „CO₂ besitzt eine messbare radiative Wirkung“ und „eine vermiedene Tonne besitzt einen bestimmten monetären Nettonutzen“.

6.5 Die Sonne: fundamentale Energiequelle, aber ist ihre Veränderung der dominante moderne Trendtreiber?

Ohne Sonneneinstrahlung gäbe es praktisch kein heutiges Klimasystem. Die Sonne liefert die Energie, die Atmosphäre und Ozeane antreibt. In diesem fundamentalen Sinn ist die Sonneneinstrahlung selbstverständlich sehr viel größer als jeder einzelne Treibhausgas-Antrieb. Für die Attribution des jüngsten Klimawandels ist jedoch nicht die absolute Größe der solaren Energiezufuhr entscheidend, sondern deren zeitliche Veränderung. Satellitenmessungen zeigen im 11-jährigen Sonnenzyklus Schwankungen der Total Solar Irradiance von deutlich unter einem Prozent; NASA beziffert die satellitengemessene Variation über mehrere Jahrzehnte auf weniger als 0,1 Prozent. Zugleich zeigt die Langzeitreihe seit der Mitte des 20. Jahrhunderts keinen anhaltenden Nettoanstieg der solaren Einstrahlung, während die globale Temperatur deutlich stieg.

Damit ist Solarvariabilität keineswegs irrelevant. Sie ist für frühere Klimaänderungen, für den 11-jährigen Zyklus, für UV-Ozon-Wechselwirkungen und zusammen mit orbitalen Änderungen auf langen Zeitskalen bedeutsam. Die konkrete Gegenhypothese „die moderne Erwärmung seit der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts wird überwiegend durch einen Anstieg der solaren Einstrahlung verursacht“ müsste jedoch einen entsprechenden positiven Langzeittrend der Einstrahlung und passende räumlich-vertikale Temperaturfingerabdrücke zeigen. Die vorhandenen direkten TSI-Reihen liefern diesen Trend nicht. Für die Evaluation wird Solarforcing deshalb als zwingend zu prüfender natürlicher Einfluss geführt, aber nicht ohne Evidenz als dominanter Gegenfaktor gesetzt.

6.6 Der Ozean: größter Wärmespeicher, Klimaregulator und Quelle natürlicher Variabilität

Der Hinweis auf die Ozeane ist wesentlich stärker als eine bloße Nebenbemerkung. Wasser bedeckt mehr als 70 Prozent der Erdoberfläche und besitzt eine enorme Wärmekapazität. Der Ozean speichert, transportiert und zeitverzögert Wärme, prägt regionale Temperaturen und erzeugt über ENSO, PDO, AMOC und weitere Zirkulationsmuster erhebliche natürliche Schwankungen. In kurzen und mittleren Zeiträumen kann eine Änderung des ozeanischen Wärmetransports die Oberflächentemperatur stark verändern, ohne dass sich der externe Strahlungsantrieb entsprechend ändert. Genau deshalb darf eine reine Korrelation von Lufttemperatur und CO₂ niemals als vollständiger Kausalbeweis genügen.

Für die langfristige globale Energiebilanz ist aber entscheidend, ob der Ozean netto Wärme an das Gesamtsystem abgibt oder netto zusätzliche Energie aufnimmt. Die Messbilanz zeigt seit Jahrzehnten einen starken Anstieg des ozeanischen Wärmeinhalts. Der IPCC bilanziert für 1971 bis 2018 etwa 91 Prozent der gesamten beobachteten zusätzlichen Energie des Erdsystems im Ozean, rund 5 Prozent an Land, 3 Prozent in der Kryosphäre und etwa 1 Prozent in der Atmosphäre. NOAA beschreibt den Ozean entsprechend als größten Speicher der überschüssigen Wärme. Das macht den Ozean zum dominanten Speicher und Verteiler der Erwärmung; es ist aber gerade nicht dasselbe wie der Nachweis, dass er die zusätzliche Energie aus eigenem Antrieb erzeugt.

Die kausale Unterscheidung lautet deshalb: Ozeanische Variabilität kann Wärme zwischen Tiefsee, Oberfläche und Regionen umverteilen und dadurch die Oberflächentemperatur über Jahre bis Jahrzehnte stark modulieren. Ein langfristiger positiver Trend des globalen Ozeanwärmeinhalts benötigt hingegen eine Nettoenergiezufuhr zum Erdsystem oder eine langfristige Veränderung der Abstrahlung. Attributionsstudien kommen zu dem Ergebnis, dass natürliche Variabilität allein die beobachtete globale Ozeanerwärmung nicht

erklärt; zugleich bleiben regionale Zirkulationen und kurzfristige Schwankungen wichtige Unsicherheits- und Modulationsfaktoren. Für unsere Nutzen-Risiko-Rechnung wird der Ozean daher nicht als bloßer „Folgeindikator“, sondern als eigener Prüfkomples behandelt.

6.7 Kann ein warmer Ozean den CO₂-Anstieg verursachen?

Physikalisch gilt: Wärmeres Wasser kann weniger CO₂ lösen als kälteres Wasser. Ozeanerwärmung kann deshalb regional und zeitweise CO₂ ausgasen; dies ist unter anderem aus Eiszeitzyklen und aus aktuellen Schwankungen des Kohlenstoffkreislaufs bekannt. 2023 zeigten besonders hohe Meerestemperaturen beispielsweise eine messbare Schwächung der ozeanischen CO₂-Aufnahme in mehreren Regionen. Diese Rückkopplung ist real und muss in der Kausalbetrachtung enthalten sein.

Für den modernen globalen Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration reicht die Hypothese „der Ozean wird wärmer und gas deshalb das zusätzliche CO₂ aus“ jedoch nicht aus, weil der Ozean gegenwärtig netto CO₂ aufnimmt. Der Global Carbon Budget 2025 schätzt, dass der Ozean im Jahrzehnt 2015–2024 im Mittel rund 29 Prozent der gesamten anthropogenen CO₂-Emissionen aufgenommen hat; seit 1850 beträgt die kumulierte Aufnahme rund 27 Prozent. Ein Reservoir, das im globalen Saldo netto Kohlenstoff aufnimmt, kann nicht zugleich die Hauptquelle des ansteigenden atmosphärischen Bestands sein. Ozeantemperatur beeinflusst die jährliche Aufnahme und Freisetzung stark, erklärt aber nicht den langfristigen Nettoanstieg allein.

Die Kausalkette ist daher bidirektional: Temperatur beeinflusst den Kohlenstoffaustausch zwischen Ozean und Atmosphäre, und atmosphärisches CO₂ beeinflusst über die Strahlungsbilanz die Temperatur. Solche Rückkopplungen sind genau der Grund, warum einfache Ein-Richtungs-Erzählungen unzureichend sind. Die Evaluation muss unterscheiden zwischen kurzfristiger Flussvariabilität, langfristigem Nettofluss und kumuliertem atmosphärischem Bestand.

6.8 Wasserdampf und Wolken: große Wirkung, aber andere kausale Rolle

Wasserdampf ist für den natürlichen Treibhauseffekt außerordentlich wichtig und atmosphärisch mengenmäßig viel variabler als CO₂. Seine Konzentration wird jedoch stark durch die Temperatur bestimmt: Wärmere Luft kann mehr Wasserdampf enthalten, kältere weniger. In der etablierten Klimaphysik wird Wasserdampf deshalb überwiegend als schnelle Rückkopplung behandelt und nicht als unabhängiger langfristiger Antrieb in derselben Weise wie zusätzliches CO₂. Wird das System aus irgendeinem Grund erwärmt, kann zusätzlicher Wasserdampf die Erwärmung verstärken; wird es abgekühlt, nimmt Wasserdampf ab. Ob und wie stark diese Verstärkung ausfällt, ist Teil der Klimasensitivität und muss empirisch begrenzt werden.

Wolken sind noch komplizierter, weil sie sowohl kurzwellige Sonnenstrahlung reflektieren und damit kühlen als auch langwellige Wärmestrahlung zurückhalten und damit wärmen können. Änderungen von Höhe, Typ, Bedeckungsgrad und geographischer Verteilung wirken unterschiedlich. Wolkenfeedbacks gehören deshalb weiterhin zu den wichtigen Unsicherheitsquellen der Klimasensitivität. Eine robuste Folgenabschätzung muss diese Unsicherheit ausdrücklich führen. Sie darf aber aus dem Vorhandensein einer Wolkenunsicherheit weder schließen, der CO₂-Effekt sei null, noch umgekehrt so tun, als sei die genaue Nettoverstärkung vollständig direkt gemessen.

6.9 Evidenzmatrix der zentralen physikalischen Behauptungen

Behauptung	Status für diese Evaluation	Evidenztyp
CO ₂ ist lebensnotwendiger Bestandteil der Photosynthese.	Belegt	Biochemie, Experimente
Steigendes CO ₂ fördert unter geeigneten Bedingungen Pflanzenwachstum.	Belegt; Stärke kontextabhängig	Experimente, Satelliten, Modelle
Atmosphärisches CO ₂ ist seit dem 19. Jahrhundert nur unwesentlich verändert.	Widerlegt	Eisbohrkerne, direkte Messungen
Zusätzliches CO ₂ verändert die langwellige Strahlungsbilanz.	Direkt beobachtet	Spektroskopie Satellit/Boden
CO ₂ ist der einzige Klimatreiber.	Widerlegt	Energiebilanz, Attribution
Solarvariabilität beeinflusst Klima.	Belegt	Messungen, Paläoklima
Anstieg der solaren Einstrahlung erklärt den jüngsten Langzeittrend überwiegend.	Durch direkte TSI-Reihen nicht gestützt	Satellitenmessungen, Attribution
Ozeane dominieren die Speicherung zusätzlicher Wärme.	Belegt	Ozeanwärmeinhalt
Ozeanvariabilität kann Oberflächentemperaturen stark modulieren.	Belegt	Beobachtung, Dynamik
Der moderne CO ₂ -Anstieg stammt hauptsächlich aus ozeanischer Ausgasung.	Mit globalem Netto-Ozeansenkenbefund unvereinbar	Global Carbon Budget
Wolken und Wasserdampf sind für Sensitivität wichtig.	Belegt; Nettofeedback teils unsicher	Beobachtung, Theorie, Modelle

7. Was bewirkt eine einzige vermiedene Tonne CO₂ wirklich?

Erst nach dieser Kausalprüfung darf die Nutzenrechnung beginnen. Die wichtigste methodische Feststellung lautet: Der unmittelbare Nutzen einer einzelnen vermiedenen Tonne CO₂ ist nicht ein beobachtbares „verhindertes Unwetter“, kein messbarer Meeresspiegelmillimeter und kein unmittelbar verhinderter Todesfall. Die physikalische Wirkung einer einzelnen Tonne ist viel zu klein, um auf dieser Ebene direkt beobachtet zu werden. Was sich belastbar angeben lässt, ist ein marginaler Beitrag zu kumulativen Größen. Alle konkreten Endpunkte entstehen erst aus der Aggregation sehr vieler Tonnen und aus weiteren Dosis-Wirkungs-Annahmen.

7.1 Von einer Tonne zur atmosphärischen Konzentration

Ein ppm atmosphärisches CO₂ entspricht grob 2,12 Gigatonnen Kohlenstoff beziehungsweise rund 7,77 Gigatonnen CO₂ im gesamten Atmosphärenbestand. Würde eine zusätzliche Tonne CO₂ vollständig und dauerhaft in der Atmosphäre verbleiben, entspräche sie daher nur rund $1,3 \times 10^{-10}$ ppm. Tatsächlich verbleibt nicht die gesamte Emission dauerhaft in der Atmosphäre. Im globalen Kohlenstoffbudget der jüngsten Dekade blieb ungefähr die Hälfte der anthropogenen Emissionen netto atmosphärisch, während Ozean und Land den Rest aufnahmen. Für den Langzeitverlauf ist die Verteilung dynamisch und nicht mit einem konstanten „Airborne Fraction“-Faktor vollständig beschrieben. Schon an diesem ersten Glied ist daher klar: Eine Tonne ist nur als winziger Beitrag zu einem globalen kumulativen Bestand sinnvoll interpretierbar.

7.2 Von der Konzentration zur Strahlungsänderung

Die Strahlungswirkung von CO₂ wächst näherungsweise logarithmisch mit der Konzentration. Das bedeutet: Eine zusätzliche ppm bei 280 ppm hat etwas mehr marginale Strahlungswirkung als eine zusätzliche ppm bei 425 ppm. Für eine einzelne Tonne ist die daraus abgeleitete Änderung der global gemittelten Strahlungsbilanz extrem klein. Solche Rechnungen beruhen auf spektroskopisch überprüften Transferbeziehungen, sind aber dennoch Ableitungen und keine direkt messbare Ein-Tonnen-Wirkung. Für politische Evaluationen ist deshalb die kumulative Temperaturbeziehung meist die praktischere Einheit.

7.3 Von einer Tonne zur globalen Mitteltemperatur: TCRE

Der IPCC und der Global Carbon Budget verwenden die annähernd lineare Beziehung zwischen kumulierten CO₂-Emissionen und globaler Erwärmung, die Transient Climate Response to cumulative carbon Emissions (TCRE). Der AR6 nennt für 1.000 Gigatonnen CO₂ eine wahrscheinliche Erwärmung von etwa 0,27 bis 0,63 °C, mit einer zentralen Schätzung um 0,45 °C. Der Global Carbon Budget 2025 formuliert dieselbe Größenordnung anschaulich als ungefähr 0,1 °C zusätzliche Erwärmung pro weiteren 180 Gigatonnen CO₂. Beide Darstellungen führen für eine einzelne Tonne zu einer Größenordnung von etwa $4,5 \text{ bis } 5,6 \times 10^{-13} \text{ °C}$ globaler Mitteltemperatur.

Das bedeutet rechnerisch: Eine Million tatsächlich zusätzlich vermiedene Tonnen entsprechen ungefähr 0,0000005 °C; eine Milliarde Tonnen etwa 0,0005 °C; 10 Milliarden Tonnen etwa 0,005 °C. Diese Größen sind keine instrumentell isolierbaren Temperaturänderungen, sondern marginale Beiträge innerhalb einer statistisch-physikalischen Beziehung. Die Stärke dieser Darstellung liegt gerade darin, dass sie keine dramatische Sprache benötigt. Eine Tonne hat eine winzige Wirkung; Milliarden Tonnen ergeben eine relevante Wirkung.

7.4 Was mit dieser Zahl noch nicht bewiesen ist

Die TCRE beantwortet nur die Frage, wie kumulative CO₂-Emissionen mit der globalen Mitteltemperatur verknüpft sind. Sie sagt nicht unmittelbar, wie viele Hitzetote, Überschwemmungen, Dürren, Ernteausfälle, Sturmschäden oder Ökosystemveränderungen eine Tonne verursacht. Für jeden dieser Endpunkte ist eine weitere Kausalkette erforderlich: globale Temperatur → regionale Klimaänderung → Exposition → Vulnerabilität → Anpassung → konkreter Endpunkt. Jede Stufe besitzt eigene Unsicherheiten. Deshalb ist die Aussage „eine Tonne CO₂ verursacht 350 Euro Schaden“ keine direkte Messung, sondern das Endergebnis einer langen Modell- und Bewertungsfolge.

Für diese Evaluation wird der physikalische Nutzen einer Tonne deshalb zunächst ohne Geld ausgewiesen: ungefähr 0,5 Billionstel Grad vermiedene globale Mitteltemperatur je tatsächlich zusätzlich global vermiedener Tonne. Erst für größere Emissionsmengen werden daraus messbare Größenordnungen. Der monetäre Wert darf erst in einer nachgelagerten Stufe hinzukommen und muss aus den konkreten physischen Endpunkten rekonstruiert werden.

7.5 Der Endpunktkatalog: Wo kann Erwärmung schaden, wo kann sie nutzen?

Die Nutzen-Risiko-Rechnung darf weder nur Schäden noch nur Vorteile erfassen. Potenzielle negative Endpunkte einer zusätzlichen Erwärmung umfassen unter anderem hitzebedingte Mortalität und Morbidität, thermische Arbeitsproduktivitätsverluste, Meeresspiegelanstieg, Küstenanpassung, Veränderungen extremer Niederschläge, regionale Dürre- und Wasserstressrisiken, Ertragsverluste bestimmter Kulturen bei Hitze, Waldbrandrisiken, Korallenbleiche sowie Veränderungen von Ökosystemen. Potenziell positive oder schadensmindernde Endpunkte umfassen unter anderem geringere Kältebelastung in manchen Regionen, geringeren Heizenergiebedarf, längere Vegetationsperioden in hohen Breiten, CO₂-Düngung, erhöhte Wasser-Nutzungseffizienz vieler Pflanzen und mögliche Ertragsgewinne dort, wo Hitze, Wasser und Nährstoffe nicht limitieren. Die Netto-Wirkung ist regional, zeitlich und sektorabhängig.

Damit ist auch die Möglichkeit eines lokal oder sektoral negativen „Schadenswerts“ – also eines Nettovorteils zusätzlicher CO₂-Konzentration in einem bestimmten Endpunkt – methodisch zulässig. Für die

globale Gesamtbilanz müssen jedoch sämtliche relevanten Endpunkte und Regionen zusammengeführt werden. Es wäre ebenso unzulässig, aus dem CO₂-Düngungseffekt auf einen globalen Nettonutzen jeder zusätzlichen Tonne zu schließen, wie aus einem einzelnen Hitzeschaden auf einen globalen Nettoschaden jeder Tonne.

7.6 Meeresspiegel: Messung, Attribution und Projektion strikt trennen

Der Anstieg des globalen mittleren Meeresspiegels selbst ist kein bloßes Modellresultat: Pegel- und Satellitendaten zeigen einen Anstieg. Nach NASA-Satellitendaten lag der globale Mittelwert im August 2026 rund 100,7 ± 4,0 mm über dem Referenzniveau von 1993. Davon getrennt ist die Ursachenfrage. Die Aufteilung auf thermische Expansion, Gletscher, Eisschilde und Landspeicher beruht auf Messreihen, Massenbilanzen und Modellen. Noch eine Stufe unsicherer sind Aussagen darüber, wie viele Millimeter eine konkrete deutsche Emissionsminderung in Jahrhunderten vermeiden würde. Solche Langfristwerte werden deshalb nicht als feststehender Nutzen verbucht.

7.7 Hitze, Kälte und Gesundheit: Netto statt Einzeleffekt

Bei Gesundheit ist eine bloße Zählung von Hitzetoten unzureichend, wenn gleichzeitig mildere Winter Kälterisiken verändern. Umgekehrt wäre es ebenso unzulässig, aus gegenwärtig höheren Kältetodeszahlen automatisch zu folgern, zusätzliche Erwärmung sei gesundheitlich positiv; Altersstruktur, Anpassung, Klimatisierung, Gebäudestandard und Extremtemperaturen verändern beide Seiten. Die richtige Größe ist der kausale Nettoeffekt einer marginalen Temperaturänderung auf temperaturabhängige Mortalität und Morbidität über Regionen und Jahreszeiten hinweg. Für Deutschland kann dieser Nettoeffekt anders aussehen als für Indien, den Sahel oder tropische Küstenregionen. Ein globaler Klimaschadenswert enthält daher zwingend normative Gewichtungen über Länder hinweg.

7.8 Landwirtschaft: CO₂-Düngung muss explizit in die Gegenrechnung

Gerade im Agrarsektor wäre eine Schadensrechnung ohne CO₂-Düngung methodisch unvollständig. Höhere CO₂-Konzentrationen können die Photosynthese vieler C3-Pflanzen erhöhen und die stomatäre Wasserabgabe reduzieren. Dem stehen mögliche Hitzeschäden, Wasserstress, veränderte Schädlingdynamik, Extremereignisse und qualitative Veränderungen bei Nährstoffgehalten gegenüber. Die relevante Frage lautet deshalb nicht „CO₂ ist Pflanzennahrung, also positiv“ oder „Erwärmung schadet Ernten, also negativ“, sondern wie sich Ertrag, Qualität, Wasserbedarf und Anpassungsmöglichkeiten netto verändern. Für eine spätere monetäre Bilanz müssen beide Richtungen als getrennte Endpunkte modelliert werden.

7.9 Ozeane und Meerestemperatur als eigener Nutzen-Risiko-Komplex

Da der Ozean den größten Teil der zusätzlichen Energie speichert, muss die Folgenabschätzung einen eigenen Ozeanpfad enthalten. Dazu gehören Ozeanwärmeinhalt, marine Hitzewellen, thermische Expansion, Korallenbelastung, Sauerstoffgehalt, Änderungen von Strömungen sowie der Kohlenstoffaustausch mit der Atmosphäre. Zugleich muss natürliche ozeanische Variabilität als Confounder und Modulator modelliert werden. Ein regionaler Temperaturtrend darf nicht automatisch globalem CO₂-Forcing zugerechnet werden, wenn Zirkulationsänderungen eine plausible Alternative darstellen. Umgekehrt darf eine natürliche regionale Schwankung nicht als Erklärung für den globalen langfristigen Energieanstieg verwendet werden, ohne die globale Wärmebilanz zu schließen.

7.10 Die Nutzenkette einer vermiedenen Tonne

Für jede konkrete Klimaschutzmaßnahme gilt deshalb folgende Kette: Maßnahme → zusätzlich vermiedene territoriale Emission → Korrektur um Mitnahme, Rebound und Verlagerung → tatsächlich global vermiedene Emission → kumulativer Temperaturbeitrag nach TCRE → Veränderung physischer Endpunkte → positive und negative Wohlfahrtseffekte → erst danach monetäre Netto-Bewertung. Wenn ein Glied nicht quantifiziert werden kann, wird dies als Datenlücke ausgewiesen und nicht durch eine pauschale Behördenzahl ersetzt.

7.11 Warum ein behördlicher „Euro pro Tonne“-Wert kein Beweis des Nutzens ist

Schadenskostensätze des Umweltbundesamts, der US-Regierung oder anderer Institutionen können als Szenarien verwendet werden, aber nicht als Primärbeweis. Sie sind Ergebnisse integrierter Bewertungsmodelle, in denen Klimasensitivität, Schadensfunktionen, Wirtschaftswachstum, Anpassung, regionale Aggregation und Diskontierung miteinander verknüpft werden. Besonders die Diskontierung kann den heutigen Barwert weit in der Zukunft liegender Schäden drastisch verändern. Ein politisch gewählter oder behördlich empfohlener Wert beantwortet daher nicht die vorgelagerte Frage, wie der physische Nettoendpunkt empirisch hergeleitet wurde.

Diese Evaluation verwendet deshalb eine „Bottom-up“-Schadensbilanz: zunächst physische Veränderungen, dann quantifizierbare Endpunkte, dann Bewertung. Parallel werden veröffentlichte Social-Cost-of-Carbon-Werte als externe Vergleichsreihe geführt. Stimmen Bottom-up- und Top-down-Werte nicht überein, ist die Differenz selbst ein Ergebnis und muss erklärt werden.

7.12 Zwischenfazit: Was ist für eine Tonne heute tatsächlich nachweisbar?

Nach heutigem Evidenzstand lässt sich eine vermiedene Tonne CO₂ auf der ersten Stufe relativ klar als winziger Beitrag zur kumulativen globalen Erwärmung beschreiben. Direkt beobachtbar ist die radiative Wirkung steigender CO₂-Konzentrationen; die Zuordnung der modernen Erwärmung zu verschiedenen Antrieben erfolgt durch Attributionsanalysen; die Ein-Tonnen-Temperaturwirkung wird über die TCRE abgeleitet. Nicht direkt beobachtbar ist dagegen ein konkreter gesellschaftlicher Schaden oder Nutzen einer einzelnen Tonne. Dieser entsteht nur über aggregierte Modellketten. Genau deshalb darf die politische Entscheidung nicht mit einem vorgegebenen Eurobetrag beginnen, sondern muss die Kette offenlegen.

7.13 Quellenbasis für die physikalische Kernprüfung

Zentrale Quellen dieses Abschnitts sind: NOAA Global Monitoring Laboratory, Trends in Atmospheric Carbon Dioxide (Messreihen bis 2026); NOAA Climate.gov, Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide (2025); Global Carbon Budget 2025, Earth System Science Data (2026); IPCC AR6 Working Group I, Kapitel 3, 7 und 9; NASA Science, Causes und The Sun's Role in Climate Change; Harries et al., Nature 410 (2001), „Increases in greenhouse forcing inferred from the outgoing longwave radiation spectra of the Earth in 1970 and 1997“; Feldman et al., Nature 519 (2015), „Observational determination of surface radiative forcing by CO₂ from 2000 to 2010“; Zhu et al./NASA-Darstellung zum globalen Greening und CO₂-Düngungseffekt; sowie aktuelle Arbeiten zur ozeanischen CO₂-Aufnahme und Ozeanwärmebilanz. Abweichende und konkurrierende Erklärungen werden in den späteren Sensitivitäts- und Gegenhypothesenmodulen gesondert geprüft.

8. Die Number Needed to Treat der Klimapolitik

In der Medizin wird häufig gefragt, wie viele Menschen behandelt werden müssen, um ein zusätzliches Ereignis zu verhindern. Das direkte Analogon der Klimapolitik ist die Frage: Wie viele Euro müssen eingesetzt werden, um eine zusätzliche globale Tonne CO₂ zu vermeiden? Diese Größe wird als Vermeidungskosten je Tonne bezeichnet. Sie ist der zentrale Leistungsindikator dieser Evaluation. Der Grenznutzen einer Maßnahme ist positiv, wenn die realen Zusatzkosten je global vermiedener Tonne unter dem realistischen Gesamtwert dieser Tonne liegen; er wird negativ, wenn die Kosten darüber liegen und keine hinreichenden Zusatznutzen existieren.

Entscheidungsregel

Vermeidungskosten < Klimanutzen + lokale Zusatznutzen: Maßnahme kann wohlfahrtssteigernd sein. Vermeidungskosten > Klimanutzen + lokale Zusatznutzen: Maßnahme ist in dieser Ausgestaltung nicht effizient, selbst wenn sie CO₂ tatsächlich reduziert.

TEIL III – Deutschlands Ausgangslage und tatsächliche Emissionsentwicklung

9. Beobachtete Entwicklung seit 1990

Deutschland emittierte 1990 nach dem Umweltbundesamt rund 1.253 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente. 2025 waren es nach der vorläufigen Berechnung rund 649 Millionen Tonnen. Die Minderung beträgt damit 48,2 %. Für CO₂ allein nennt das UBA 2025 rund 573,5 Millionen Tonnen und eine Minderung von 45,6 % gegenüber 1990. Diese Entwicklung ist real und erheblich.

Für eine Folgenabschätzung ist jedoch entscheidend, nicht Beobachtung mit Kausalität gleichzusetzen. Die ersten 1990er-Jahre waren durch die wirtschaftliche Umstrukturierung in Ostdeutschland geprägt; emissionsintensive Produktionsstrukturen verschwanden oder wurden modernisiert. Später wirkten technische Effizienz, europäische Regulierung, erneuerbare Energien, Energiepreise, Wirtschaftskrisen, Pandemie, milde Winter, Importstrukturen und struktureller Wandel. Nur der Anteil einer Reduktion, der gegenüber einem plausiblen Gegenverlauf zusätzlich durch das untersuchte Instrument verursacht wurde, darf diesem Instrument als Nutzen zugerechnet werden.

Diese Unterscheidung entspricht unmittelbar der Präventionslogik: Wenn nach Einführung einer Maßnahme ein Endpunkt seltener auftritt, ist das noch kein Kausalbeweis. Man benötigt entweder ein belastbares Gegenfaktum, Vergleichsgruppen, Modellierung oder eine plausible Instrumentenbewertung. Deshalb werden im weiteren Verlauf beobachtete Emissionsminderungen, modellierte Maßnahmenwirkungen und theoretische Obergrenzen getrennt ausgewiesen.

10. Deutschlands globale Größenordnung

Nach dem Global Carbon Budget emittierte Deutschland 2024 rund 572 Millionen Tonnen fossiles und industrielles CO₂, entsprechend 1,48 % des weltweiten Werts. China lag bei 31,84 %, Indien bei 8,27 %. China und Indien zusammen verursachten damit gut 40 % der globalen fossilen und industriellen CO₂-Emissionen. Deutschlands absolute Jahresmenge ist im globalen Maßstab daher begrenzt, sein historischer kumulativer Anteil seit 1750 liegt mit etwa 5,14 % jedoch deutlich höher.

Für die marginale Wirkung heutiger deutscher Maßnahmen ist der aktuelle und zukünftige Emissionspfad entscheidend. Historische Emissionen begründen möglicherweise eine normative Verantwortung, erhöhen aber nicht die physikalische Temperaturwirkung einer heute vermiedenen Tonne. Eine zusätzliche heutige deutsche Tonne wirkt exakt wie eine zusätzliche Tonne anderswo. Daraus folgt, dass kostengünstige Vermeidung an jedem Ort klimatisch gleichwertig ist. Nationale Politik kann dennoch aus Gründen der Durchsetzbarkeit, Innovationspolitik oder Verteilung nationale Instrumente wählen; physikalisch ist die Atmosphäre jedoch indifferent gegenüber dem Ort der Vermeidung.

Die globale Größenordnung macht internationale Reaktion zu einem eigenen Endpunkt. Eine deutsche Vorreitermaßnahme kann dann zusätzlichen Nutzen entfalten, wenn sie Technologien verbilligt, Standards prägt oder andere Länder zur Nachahmung bewegt. Dieser Spillover darf jedoch nicht automatisch angenommen werden. Er muss für jede Strategie als eigener kausaler Effekt belegt oder zumindest transparent als Szenario ausgewiesen werden.

11. Territorial versus konsumbezogen

Territoriale Emissionen messen, was innerhalb deutscher Grenzen freigesetzt wird. Für die Bewertung globaler Klimawirkung ist zusätzlich relevant, welche Emissionen mit dem deutschen Konsum verbunden sind. Wenn energieintensive Produktion in ein anderes Land verlagert und das Produkt anschließend importiert wird, verbessert sich die deutsche Territorialbilanz, ohne dass dieselbe Menge global vermieden sein muss. Dieser Effekt wird als Carbon Leakage beziehungsweise emissionsbezogene Produktionsverlagerung diskutiert.

Die deutsche Klimapolitik muss deshalb an zwei Größen gemessen werden: territorialer Zielerreichung und globaler Nettovermeidung. Ein Instrument, das heimische Produktion verdrängt und eine emissionsintensivere Produktion im Ausland erhöht, kann national erfolgreich und global schwach oder sogar kontraproduktiv sein. Umgekehrt kann Importsubstitution durch emissionsärmere heimische Produktion global günstiger sein, selbst wenn territoriale Emissionen kurzfristig höher liegen.

TEIL IV – Aufwand: Was kostet die Intervention tatsächlich?

12. Warum eine einzige Gesamtkostenzahl irreführend wäre

Es gibt keine amtliche, überschneidungsfreie Zahl 'Kosten der deutschen Klimapolitik seit 1990'. Das liegt an der Natur der Intervention. Ein Teil sind direkte Haushaltsausgaben, ein Teil Umlagen und Zertifikatskosten, ein Teil Investitionen, die zugleich Vermögenswerte schaffen, ein Teil private Ersatzinvestitionen, ein Teil regulatorisch induzierte Wertverluste und ein Teil Opportunitätskosten. Würde man sämtliche Bruttoinvestitionen einfach addieren, entstünde eine künstlich hohe Summe, weil beispielsweise ein neues Stromnetz nicht vollständig 'verlorener Wohlstand' ist, sondern einen langlebigen Vermögenswert darstellt.

Deshalb unterscheidet diese Evaluation zwischen Transfer, Investition, realer Ressourcenbeanspruchung und Wohlfahrtsverlust. Eine CO₂-Steuer ist zunächst überwiegend ein Transfer vom Zahler an den Staat, nicht automatisch ein volkswirtschaftlicher Verlust in gleicher Höhe. Ein Förderzuschuss ist ebenfalls zunächst ein Transfer. Wohlfahrtskosten entstehen durch Verwaltungsaufwand, Verzerrungen, höhere reale Produktionskosten, Fehlallokation, vorzeitige Abschreibungen, nicht rentable Zusatzinvestitionen und verlorene Alternativnutzung des eingesetzten Kapitals. Gleichzeitig können Investitionen Produktivvermögen schaffen und spätere Brennstoffkosten senken.

Eine seriöse Rechnung benötigt daher Nettokosten: zusätzliche gesellschaftliche Ressourcen gegenüber dem plausiblen Alternativpfad. Diese sind schwieriger zu bestimmen als Haushaltszahlen, aber methodisch unverzichtbar.

13. Sichtbare Geldströme

Der Klima- und Transformationsfonds ist heute einer der wichtigsten sichtbaren Finanzierungskanäle. 2025 beliefen sich seine Programmausgaben auf 26,6 Milliarden Euro, davon 17,4 Milliarden investiv. Im Vorjahr 2024 lagen die Programmausgaben bei 41,6 Milliarden Euro; der höhere Wert war wesentlich dadurch geprägt, dass damals die EEG-Förderung noch aus dem KTF finanziert wurde. Seit 2025 wird diese Förderung aus dem Bundeshaushalt getragen. Der KTF soll zudem über das Sondervermögen Infrastruktur und Klimaneutralität mit insgesamt 100 Milliarden Euro verstärkt werden.

Allein diese Haushaltszahlen zeigen die Größenordnung, dürfen aber nicht als Nettokosten interpretiert werden. Ein Teil finanziert Gebäudesanierungen, Infrastruktur oder industrielle Anlagen und erzeugt Vermögenswerte. Für die Nutzen-Risiko-Abwägung muss daher gefragt werden, welcher Anteil der Investition auch ohne Klimapolitik ohnehin angefallen wäre, welcher Anteil echte zusätzliche Ressourcen bindet und welcher langfristige wirtschaftliche Nutzen dem gegenübersteht.

Position	aktueller Wert	Bewertungshinweis
KTF Programmausgaben 2024	41,6 Mrd. €	enthielt 18,5 Mrd. € EEG-Förderung
KTF Programmausgaben 2025	26,6 Mrd. €	EEG seit 2025 im Bundeshaushalt
BEG-Ausgaben 2025	ca. 12,0 Mrd. €	Gebäude; Investition und Klimainstrument zugleich
SVIK-Zuführung an KTF	100 Mrd. € gesamt	über zehn Jahre vorgesehen
Netzausbau bis 2045	>460 Mrd. € Investitionen	BRH; Bruttoinvestition, nicht Nettowohlfahrtskosten

14. Systemkosten der Stromtransformation

Der Bundesrechnungshof hebt hervor, dass die Transformation des Stromsystems nicht nur aus den Erzeugungskosten von Wind- und Solaranlagen besteht. Ein Stromsystem mit wachsenden wetterabhängigen Anteilen benötigt Netzausbau, Systemdienstleistungen, Reserve- beziehungsweise Backup-Kapazitäten, Flexibilität, Speicher, Redispatch und gegebenenfalls Importmöglichkeiten. Der BRH beziffert allein die bis 2045 erforderlichen Netzinvestitionen auf mehr als 460 Milliarden Euro und kritisiert, dass Systemkosten in der politischen Darstellung nicht immer hinreichend sichtbar werden.

Auch hier darf die gesamte Summe nicht als Klimaschaden oder Wohlstandsverlust verbucht werden. Netze hätten auch ohne zusätzliche Klimapolitik modernisiert werden müssen, und Netzinfrastruktur liefert über Jahrzehnte Leistungen. Entscheidend ist die inkrementelle Differenz gegenüber einem realistischen alternativen Stromsystem. Genau diese Differenz muss später den zusätzlich vermiedenen globalen Tonnen zugerechnet werden.

15. Energiepreise, Industrie und Opportunitätskosten

Hohe Energiepreise können eine echte Belastung darstellen, wenn sie reale Produktionskosten erhöhen, Investitionen verdrängen oder Produktion verlagern. Gleichzeitig sind nicht sämtliche deutschen Energiepreisprobleme der Klimapolitik zuzurechnen. Beschaffungspreise für Gas und Strom, geopolitische Schocks, Netzentgelte, Steuern, Marktdesign, Kraftwerksstruktur und internationale Rohstoffpreise wirken parallel. Die Evaluation muss deshalb jede Kostenkomponente kausal zuordnen.

Opportunitätskosten sind besonders wichtig. Ein Euro, der für eine Klimamaßnahme eingesetzt wird, kann nicht zugleich für Bildung, Gesundheitswesen, Forschung, Steuersenkung, Infrastruktur oder private Investition verwendet werden. Das bedeutet nicht, dass jede Klimainvestition Wohlstand vernichtet. Es bedeutet nur, dass ihr Nutzen mindestens so groß sein sollte wie der Nutzen der besten verdrängten Alternative. Diese Vergleichslogik ist das ökonomische Gegenstück zur Frage in der Medizin, ob eine Intervention gegenüber einer weniger belastenden Alternative einen zusätzlichen Nutzen besitzt.

TEIL V – Zusatznutzen, die nicht unterschlagen werden dürfen

16. Luftqualität und Gesundheit

Der Ersatz fossiler Verbrennung kann neben CO₂ auch Feinstaub, Schwefeldioxid, Stickoxide und andere Luftschadstoffe reduzieren. Diese Wirkungen sind lokal und treten wesentlich schneller ein als langfristige Klimawirkungen. Für Kohleverstromung kann der lokale Gesundheitsnutzen daher einen wesentlichen Anteil der Gesamtbilanz bilden. Eine reine Rechnung 'Euro je vermiedener Tonne CO₂' würde diese Wirkung unterschätzen.

Methodisch müssen Klima- und Luftschadstoffnutzen getrennt ausgewiesen werden, um Doppelzählung zu vermeiden. Wenn ein Umweltkostensatz bereits Luftschadstoffe enthält, darf derselbe Nutzen nicht ein zweites Mal addiert werden. Außerdem sind moderne Emissionsminderungstechniken zu berücksichtigen; nicht jede fossile Kilowattstunde verursacht dieselben lokalen Schadstoffe.

17. Fossile Importe und geopolitische Resilienz

Eine Verringerung von Öl-, Gas- und Kohleverbrauch kann Importkosten und geopolitische Abhängigkeit senken. Dieser Nutzen ist für Deutschland real, weil ein großer Teil fossiler Energieträger importiert wird. Der Wert ist jedoch nicht identisch mit dem Bruttowert vermiedener Importe: Ersatztechnologien benötigen ebenfalls Kapitalgüter, Rohstoffe und teilweise Importe. Entscheidend ist die langfristige Nettohandels- und Resilienzwirkung.

Nach den Energiekrisen der Jahre 2021 bis 2023 ist Versorgungssicherheit selbst zu einem eigenständigen Wert geworden. Eine Klimamaßnahme kann deshalb auch bei moderatem Klimanutzen rational sein, wenn sie zugleich eine kosteneffiziente Reduktion geopolitischer Preisrisiken bewirkt. Umgekehrt kann eine Strategie neue Abhängigkeiten bei kritischen Rohstoffen oder Komponenten schaffen.

18. Innovation und Lernkurven

Eine weitere mögliche Rechtfertigung nationaler Vorreiterpolitik sind technologische Lernkurven. Frühe Nachfrage kann Produktionsmengen erhöhen, Kosten senken und Innovation auslösen, die später weltweit Emissionen reduziert. Wenn dieser Mechanismus nachweisbar ist, kann der globale Nutzen einer deutschen Maßnahme deutlich größer sein als die direkt innerhalb Deutschlands vermiedene Tonnage.

Dieser Effekt darf jedoch nicht pauschal jeder Subvention gutgeschrieben werden. Er hängt davon ab, ob die Technologie international skalierbar ist, ob Wissensspillover tatsächlich entstehen, ob deutsche Förderung zusätzliche Innovation auslöst und ob Alternativen denselben Effekt günstiger erreicht hätten. Innovationsnutzen gehört daher in ein eigenes Szenario, nicht in die garantierte Basisrechnung.

TEIL VI – Risiken und unerwünschte Interventionseffekte

19. Carbon Leakage und Produktionsverlagerung

Eine der wichtigsten möglichen Nebenwirkungen ist Carbon Leakage. Wenn CO₂-intensive Produktion wegen höherer regulatorischer Kosten aus Deutschland abwandert und anschließend in einem Land mit gleicher oder höherer Emissionsintensität fortgeführt wird, sinken deutsche Territorialemissionen stärker als globale Emissionen. Die politische Erfolgskennzahl wäre dann günstiger als der tatsächliche Klimateffekt.

Für jede industriepolitische Maßnahme ist deshalb ein globaler Leakage-Faktor zu schätzen. Ein Leakage-Faktor von null bedeutet vollständige globale Vermeidung. Ein Faktor von 50 % bedeutet, dass die Hälfte der nationalen Reduktion anderswo wieder entsteht. Bei 100 % wäre der globale Klimateffekt null, bei mehr als 100 % sogar negativ. Diese Sensitivität muss insbesondere bei Stahl, Chemie, Zement, Grundstoffen und anderen handelsintensiven Branchen geprüft werden.

20. Vorzeitige Entwertung bestehender Anlagen

Klimapolitik kann funktionsfähige Kapitalgüter vor Ende ihrer technisch-wirtschaftlichen Lebensdauer entwerten. Beispiele sind Kraftwerke, Heizsysteme, Industrieanlagen oder Fahrzeugflotten. Der relevante Schaden ist nicht der gesamte ursprüngliche Anschaffungspreis, sondern der verlorene Restnutzwert abzüglich des Werts der Ersatzanlage und möglicher Betriebskostenvorteile.

Diese Kategorie ist in politischen Debatten leicht zu über- oder unterschätzen. Ein ohnehin fälliger Heizungstausch verursacht kaum zusätzliche Abschreibung. Ein erzwungener Austausch einer jungen Anlage kann dagegen erhebliche Zusatzkosten verursachen. Deshalb muss die Evaluation nach Alter, Restlebensdauer und natürlichem Ersatzzyklus differenzieren.

21. Verteilung und soziale Belastung

CO₂-Preise und energiebezogene Vorgaben wirken nicht gleich auf alle Haushalte. Menschen mit höherem Einkommen haben häufig größere absolute Emissionen, können aber Investitionen in Wärmepumpe, Dämmung oder Elektrofahrzeug leichter finanzieren. Haushalte mit niedrigerem Einkommen können relativ zum Einkommen stärker von Energiepreisen belastet sein. Förderprogramme können diese Verteilung teilweise ausgleichen, erzeugen aber ihrerseits Mitnahmeeffekte und administrative Hürden.

Für eine vollständige Nutzen-Risiko-Bilanz genügt deshalb die Summe aller Euro nicht. Es muss zusätzlich betrachtet werden, wer zahlt, wer Nutzen erhält und wer Übergangslasten trägt. Eine Maßnahme kann gesamtwirtschaftlich positiv und verteilungspolitisch problematisch sein oder umgekehrt.

22. Natur- und Flächenwirkungen der Ersatztechnologien

Erneuerbare Energien vermeiden fossile Emissionen, sind aber nicht umweltwirkungsfrei. Windkraft, Photovoltaik, Stromleitungen, Speicher, Bergbau für Rohstoffe und zusätzliche Infrastruktur beanspruchen Flächen und Materialien. Biomasse kann erhebliche Landnutzungs- und Biodiversitätseffekte besitzen. Eine technologieoffene Umweltfolgenabschätzung muss diese Wirkungen gegen die vermiedenen fossilen Schäden stellen.

Auch hier gilt: Das Vorhandensein einer Nebenwirkung widerlegt die Technologie nicht. Entscheidend ist ihre Größenordnung pro erzeugter Einheit Energie beziehungsweise pro vermiedener globaler Tonne und der Vergleich zu Alternativen.

TEIL VII – Instrumentenbezogene Nutzen-Risiko-Prüfung

23. CO₂-Bepreisung und Emissionshandel

Ökonomisch gehört ein einheitlicher CO₂-Preis grundsätzlich zu den kostengünstigeren Instrumenten, weil er Unternehmen und Haushalten überlässt, wo Emissionen am billigsten vermieden werden. In einer idealen Welt ohne weitere Verzerrungen würde ein Preis in Höhe des marginalen gesellschaftlichen Klimaschadens die externe Wirkung internalisieren. Die Praxis weicht davon ab: unterschiedliche Sektoren haben unterschiedliche Preise und Ausnahmen, internationale Wettbewerbsbedingungen sind ungleich, und Haushalte reagieren unterschiedlich auf Preissignale.

Für die Evaluation ist die zentrale Kennzahl nicht die Einnahme des Staates. Zertifikatserlöse sind überwiegend Transfers. Relevant sind die durch den Preis ausgelösten realen Verhaltensänderungen, die globale Emissionsminderung, Verwaltungs- und Transaktionskosten, Verteilungswirkungen und Leakage. Ein CO₂-Preis kann deshalb bei gleicher Einnahme sehr unterschiedliche Wohlfahrtswirkungen haben.

24. Erneuerbare Energien und Stromsystem

Wind- und Solarenergie besitzen sehr geringe direkte Betriebsemissionen und können fossile Stromerzeugung ersetzen. Ihr Nutzen hängt aber vom verdrängten Grenzkraftwerk, vom Lebenszyklus, vom Ausbau der Netze, von Speicher- und Flexibilitätskosten und von der zeitlichen Erzeugungsstruktur ab. Je höher ihr Anteil wird, desto stärker kann sich der marginale Systemwert einzelner zusätzlicher Anlagen verändern.

Die Nutzen-Risiko-Prüfung muss deshalb von durchschnittlichen Stromgestehungskosten weg und zu Systemkosten je zusätzlich vermiedener globaler Tonne gehen. Ein Megawatt Windleistung an einem netzstarken Standort mit hoher Auslastung kann ein ganz anderes Verhältnis besitzen als dieselbe Nennleistung in einer Region mit häufigen Netzengpässen.

25. Gebäude und Wärmepolitik

Im Gebäudebereich ist der natürliche Ersatzzyklus entscheidend. Wird eine alte Heizung ohnehin ersetzt, kann der Mehrpreis einer emissionsärmeren Alternative relativ gering sein. Wird ein junges System vorzeitig ausgetauscht, entstehen zusätzliche Abschreibungen. Dämmmaßnahmen besitzen ebenfalls stark unterschiedliche Grenzkosten: günstige Maßnahmen an ohnehin zu sanierenden Bauteilen können wirtschaftlich sein, sehr tiefe Standards können dagegen hohe Kosten je zusätzlicher Tonne verursachen.

Das BMF berichtet für die Bundesförderung effiziente Gebäude 2025 Ausgaben von rund 12 Milliarden Euro; für das Förderjahr 2024 wird eine Einsparung von rund 2,6 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalent angegeben. Diese Zahlen dürfen nicht einfach dividiert werden, weil Förderausgaben nicht mit gesellschaftlichen Nettokosten identisch sind und die Emissionswirkung über mehrere Jahre anfällt. Sie zeigen aber, warum lebenszyklusbasierte Kosten je zusätzlich vermiedener Tonne zwingend erforderlich sind.

26. Verkehr und Elektromobilität

Bei Fahrzeugen muss die Bilanz über den Lebenszyklus erfolgen. Ein Elektrofahrzeug verursacht bei Herstellung, insbesondere der Batterie, andere Emissionen als ein Verbrenner, besitzt im Betrieb aber bei einem zunehmend emissionsarmen Strommix meist niedrigere Treibhausgasemissionen. Der Vorteil hängt von Fahrzeuggröße, Batterie, Fahrleistung, Strommix, Lebensdauer und dem Zeitpunkt des Fahrzeugwechsels ab.

Ein vorzeitiger Austausch eines funktionsfähigen Fahrzeugs kann die Bilanz verschlechtern, während die Wahl eines Elektrofahrzeugs beim ohnehin anstehenden Neuwagenkauf günstiger sein kann. Klimapolitik sollte deshalb möglichst die emissionsarme Entscheidung im natürlichen Investitionszyklus fördern, statt unnötig Kapital zu vernichten.

27. Industrie, Wasserstoff und sehr hohe Grenzkosten

In schwer vermeidbaren Industrieprozessen steigen die Grenzkosten der letzten Emissionsminderungen häufig stark an. Grüner Wasserstoff, synthetische Brennstoffe, CO₂-Abscheidung und neue Prozessrouten können technisch notwendig werden, wenn nahezu vollständige Dekarbonisierung politisch vorgegeben ist. Genau hier ist eine besonders strenge Kosten-Nutzen-Prüfung erforderlich, weil die letzten Prozente Emissionsminderung deutlich teurer sein können als frühere Schritte.

Das bedeutet nicht, dass solche Technologien verworfen werden sollten. Vielmehr sollte jede zusätzliche Milliarde danach beurteilt werden, wie viele globale Tonnen sie tatsächlich vermeidet und ob internationale Skalierung, Lernkurven oder Versorgungssicherheit den hohen anfänglichen Aufwand rechtfertigen.

TEIL VIII – Prüfung des Ambitionsniveaus 2030–2045

28. Gesetzliches Ziel versus marginaler Zusatznutzen

Deutschland hat gesetzlich mindestens 65 % Minderung bis 2030, 88 % bis 2040 und Netto-Treibhausgasneutralität bis 2045 festgelegt. Die Projektionen 2026 erwarten mit den derzeit implementierten Instrumenten rund 62,6 % Minderung bis 2030, etwa 80 % bis 2040 und 2045 noch 212,5 Millionen Tonnen Bruttoemissionen. Damit entsteht politisch eine 'Lücke'. Für die ökonomische Evaluation ist diese Lücke jedoch nicht automatisch ein Schaden. Sie bezeichnet zunächst die Differenz zwischen Projektion und gesetzlichem Ziel.

Die relevante Frage lautet: Welche zusätzlichen Maßnahmen wären nötig, um diese Lücke zu schließen, wie viele zusätzliche globale Tonnen würden sie vermeiden, und zu welchen Grenzkosten? Je näher ein System an Netto Null kommt, desto teurer können die letzten Restemissionen werden. Eine starre Zielerreichung kann deshalb ökonomisch weniger effizient sein als ein Pfad, der besonders teure Restemissionen vorübergehend akzeptiert und stattdessen weltweit günstigere Vermeidung oder Negativemissionen finanziert.

29. Modellierte Temperaturwirkung des deutschen Restpfads

Um die Größenordnung zu illustrieren, kann man die 2025er deutschen CO₂-Emissionen von 573,5 Millionen Tonnen als Ausgangspunkt nehmen. Würden diese ohne weitere Reduktion zwanzig Jahre lang konstant bleiben, ergäben sich rund 11,47 Gigatonnen kumulative CO₂-Emissionen. Würden sie dagegen linear bis 2045 auf null sinken, läge die Fläche unter diesem linearen Pfad bei ungefähr der Hälfte, also rund 5,74 Gigatonnen. Die zusätzliche Vermeidung gegenüber dem konstanten Pfad betrüge rund 5,74 Gigatonnen CO₂.

Unter der TCRE-Annahme von 0,45 °C je 1.000 Gt CO₂ entspricht die Differenz von 5,735 Gt rechnerisch rund 0,00258 °C. Die in AR6 bewertete Bandbreite von 0,27 bis 0,63 °C je 1.000 Gt ergäbe etwa 0,00155 bis 0,00361 °C. Diese Zahlen sind keine gemessene Temperaturwirkung deutscher Politik. Sie sind die Anwendung einer Modellbeziehung auf eine ebenfalls gegenfaktische Emissionsdifferenz. Der belastbare Messwert ist die tatsächliche Emissionsentwicklung; die vermiedene Emission und erst recht die Temperaturwirkung benötigen zusätzliche Annahmen.

Der Nutzen kann nur dann als erheblich bezeichnet werden, wenn die Kette von der vermiedenen Tonne bis zu konkreten Endpunkten dies trägt. Ein pauschaler Eurobetrag je Tonne wird deshalb in dieser Fassung nicht mehr als Beweis verwendet. Die folgenden Kapitel ersetzen diese Abkürzung durch konkrete physikalische und empirische Endpunktrechnungen.

30. Warum eine Euro-Bewertung erst am Ende zulässig ist

Ein Euro-Wert des Klimanutzens ist kein Messwert. Er entsteht erst, wenn eine angenommene Temperaturwirkung mit einer Schadensfunktion, einer wirtschaftlichen Basisgröße, einem Zeithorizont, Anpassungsannahmen und einer Diskontrate verknüpft wird. Diese Schritte können transparent gerechnet werden, dürfen aber nicht als naturwissenschaftliche Beobachtung erscheinen. Deshalb wird die Monetarisierung am Ende als Szenariomatrix ausgewiesen: von einem möglichen Nettovorteil zusätzlicher Erwärmung über einen neutralen Fall bis zu hohen modellierten Schäden.

Die Spannweite möglicher Bewertungen ist groß. Frühere ökonomische Arbeiten fanden bei niedrigen Erwärmungsniveaus teilweise Netto-Vorteile, während neuere statistische Schadensfunktionen deutlich höhere Verluste projizieren. Der Unterschied entsteht nicht aus einer anderen gemessenen CO₂-Menge, sondern aus unterschiedlichen Annahmen über die Übersetzung von Temperatur in Gesundheit, Erträge,

Produktivität, Extremrisiken, Anpassung und zukünftige Einkommen. Genau diese Annahmen werden in der abschließenden Szenariorechnung offengelegt.

TEIL IX – Sensitivitäts- und Break-even-Rechnung

31. Break-even ohne vorgegebenen CO₂-Schadenspreis

Die Break-even-Frage lässt sich stellen, ohne vorab einen angeblich richtigen CO₂-Schadenspreis zu übernehmen. Zuerst werden die realen Zusatzkosten je tatsächlich global vermiedener Tonne beziehungsweise je modelliert vermiedenem Tausendstelgrad bestimmt. Anschließend wird gefragt, welche globale Schadensfunktion – ausgedrückt etwa als Prozent der jährlichen Weltwirtschaftsleistung je zusätzlichem Grad – erforderlich wäre, damit dieser Aufwand gerade ausgeglichen wird. Damit wird nicht der Nutzen behauptet, sondern die zur Rechtfertigung notwendige Nutzenannahme sichtbar gemacht.

Die abschließende Monetarisierung verwendet deshalb keine frei gesetzten Eurobeträge pro Tonne. Stattdessen wird aus verschiedenen veröffentlichten beziehungsweise ausdrücklich als Stresstest definierten Temperatur-Schadens-Beziehungen berechnet, welcher Euro-Nutzen sich pro 0,001 °C und für den deutschen Restpfad ergeben würde.

32. Leakage-Sensitivität

Territoriale Vermeidung	Leakage	globale Nettovermeidung	Folge für effektive €/t
1,0 Mio. t	0 %	1,0 Mio. t	unverändert
1,0 Mio. t	25 %	0,75 Mio. t	Kosten/t steigen um 33 %
1,0 Mio. t	50 %	0,50 Mio. t	Kosten/t verdoppeln sich
1,0 Mio. t	75 %	0,25 Mio. t	Kosten/t vervierfachen sich
1,0 Mio. t	100 %	0	kein direkter Klimanutzen

Der Leakage-Faktor ist deshalb keine Nebengröße, sondern kann die gesamte Bewertung energieintensiver Industriepolitik dominieren. Ein nationaler Rückgang ist für das Klima nur in dem Umfang relevant, in dem er global erhalten bleibt.

33. Zeithorizont, Diskontierung und Generationengewichtung

Sobald zukünftige Schäden monetarisiert werden, verändert der Zeithorizont das Ergebnis erheblich. Ein jährlicher globaler Schaden, der über 50 oder 100 Jahre fortbesteht, kann als einfache Summe oder als Barwert mit einer Diskontrate bewertet werden. Beide Entscheidungen sind normativ und ökonomisch relevant. Deshalb weist die Schlussrechnung sowohl jährliche Werte als auch einen transparenten 50-Jahres-Barwert bei 3 % aus; andere Diskonraten werden als Sensitivität genannt.

34. Gegenfaktum: Was wäre ohne deutsche Klimapolitik geschehen?

Die wichtigste noch offene empirische Aufgabe ist die Rekonstruktion des deutschen Emissionspfads ohne die jeweiligen Instrumente. Ein statischer Vergleich mit 1990 oder 2000 ist nur eine Obergrenzenrechnung. Ohne Klimapolitik wären Emissionen nicht zwangsläufig konstant geblieben: Effizienz, Digitalisierung, Strukturwandel, technologische Entwicklung und internationale Energiepreise hätten ebenfalls gewirkt. Umgekehrt hätten ohne Förderung manche emissionsarmen Technologien langsamer skaliert.

Für jede große Maßnahme ist daher ein eigenes Gegenfaktum anzusetzen: Stromsystem ohne EEG beziehungsweise mit alternativer Förderung; Gebäude ohne BEG; Verkehr ohne Flottenregulierung und E-Förderung; Industrie ohne ETS/CBAM; Wärme ohne CO₂-Preis. Erst die Differenz zwischen realem beziehungsweise modelliertem Maßnahmenpfad und Gegenpfad ist die kausale Zusatzwirkung.

TEIL X – Ein Prüfalgorithmus für jede einzelne Klimamaßnahme

35. Der Acht-Schritte-Test

1. Intervention exakt definieren: Preis, Verbot, Förderung, Standard oder Infrastrukturmaßnahme.
2. Baseline definieren: Was wäre ohne diese Intervention realistisch geschehen?
3. Zusätzliche territoriale Emissionsminderung über den gesamten Lebenszyklus bestimmen.
4. Leakage, Import- und Reboundeffekte abziehen; globale Nettovermeidung bestimmen.
5. Reale gesellschaftliche Zusatzkosten statt bloßer Haushaltszahlungen bestimmen.
6. Lokale Zusatznutzen und Nebenwirkungen separat quantifizieren.
7. Kosten je global vermiedener Tonne mit Klimanutzen-Sensitivität vergleichen.
8. Mildere beziehungsweise günstigere Alternativen mit gleichem Endpunkt prüfen.

36. Evidenzampel statt Preisampel

Die Bewertung erfolgt nicht mehr über feste Euro-Schwellen je Tonne, sondern über eine Evidenzampel. 'Gemessen' bezeichnet unmittelbar beobachtete Größen; 'bilanziert' nachvollziehbare Stoff- oder Finanzflüsse; 'gegenfaktisch geschätzt' eine Wirkung, die nur durch Vergleich mit einem hypothetischen Verlauf entsteht; 'modelliert' eine physikalische oder ökonomische Projektion; 'monetarisiert' die zusätzliche Übersetzung in Geld. Je weiter eine Aussage in dieser Kette nach hinten liegt, desto weniger darf sie sprachlich wie ein Messwert behandelt werden.

TEIL X A – Quantitative Vollrechnung: von der Tonne zum Endpunkt

Dieser Teil ersetzt bewusst die Abkürzung, einer vermiedenen Tonne CO₂ zunächst einen fertigen Geldwert zuzuweisen. Die Rechnung wird stattdessen wie eine medizinische Nutzen-Risiko-Analyse aufgebaut. Zuerst wird die Dosis bestimmt, dann die biologische beziehungsweise physikalische Wirkung, anschließend der klinische beziehungsweise gesellschaftliche Endpunkt. In der Klimapolitik lautet die entsprechende Kette: vermiedene Emission → vermiedener atmosphärischer Konzentrationsanstieg → vermiedener Strahlungsantrieb → vermiedene globale Erwärmung → endpunktspezifische Veränderungen. Erst danach kann entschieden werden, ob ein Endpunkt überhaupt sinnvoll monetarisierbar ist. Diese Reihenfolge verhindert, dass normative Geldwerte als naturwissenschaftliche Tatsachen erscheinen.

Die Vollrechnung unterscheidet außerdem strikt zwischen einer marginalen Tonne und einem politischen Programm. Eine einzelne Tonne erzeugt einen praktisch nicht messbaren marginalen Effekt; die Wirkung großer Programme entsteht durch Addition sehr vieler Tonnen. Für Deutschland wird deshalb neben 1 t, 1 Mt und 1 Gt ein transparentes Referenzprogramm gerechnet: Würden die heutigen deutschen CO₂-Emissionen von rund 573,5 Mio. t pro Jahr über zwanzig Jahre linear auf null sinken, während sie im Gegenfaktum konstant blieben, ergäbe sich eine kumulierte Differenz von rund 5,735 Gt CO₂. Dieses Gegenfaktum ist bewusst keine Prognose. Es ist eine obere Rechengrenze, weil ohne zusätzliche Klimapolitik weder Technik noch Preise noch Strukturwandel vollständig stehen blieben. Die tatsächliche kausal zusätzliche Vermeidung wird folglich niedriger sein, wenn ein Teil der Minderung ohnehin eingetreten wäre.

39. Rechenbasis und Einheiten

Für die Temperaturwirkung wird die vom IPCC bewertete transiente Klimaantwort auf kumulative CO₂-Emissionen verwendet. Die beste Schätzung beträgt 0,45 °C pro 1.000 Gt CO₂, der wahrscheinliche Bereich 0,27 bis 0,63 °C. Damit lässt sich eine kumulierte CO₂-Menge direkt in eine globale Mitteltemperaturänderung übersetzen. Diese TCRE-Beziehung ist keine Aussage über jeden einzelnen lokalen Endpunkt, sondern ein Aggregat aus Kohlenstoffkreislauf und thermischer Klimareaktion. Ihre Stärke liegt gerade darin, dass sie die Frage der Emissionsmenge mit der Temperatur verbindet, ohne zunächst einen politischen Schadenswert vorauszusetzen. [Q01][Q02]

Menge vermiedenes CO ₂	ΔCO ₂ in Atmosphäre*	Δ globale Mitteltemperatur, zentral	wahrscheinlicher Bereich
1 Tonne	0.44 t Nettomehrung vermieden	4.50e-13 °C	2.70e-13 bis 6.30e-13 °C
1 Mio. t (1 Mt)	0.44 Mt	4.50e-07 °C	2.70e-07 bis 6.30e-07 °C
1 Mrd. t (1 Gt)	0.44 Gt	0.000450 °C	0.000270 bis 0.000630 °C
Deutschland: 1 heutiges Emissionsjahr	0.252 Gt	0.000258 °C	0.000155 bis 0.000361 °C
Deutschland: lineare Restreduktion 2026–2045	2.523 Gt	0.002581 °C	0.001548 bis 0.003613 °C

*Die 44-%-Größe ist die vom IPCC für die vergangenen sechs Jahrzehnte angegebene mittlere airborne fraction anthropogener CO₂-Emissionen. Sie ist keine ewige Verbleibsquote eines einzelnen Pulses. Ein Teil des CO₂ wird auf unterschiedlichen Zeitskalen von Land und Ozean aufgenommen; zugleich bleibt ein relevanter Anteil sehr lange im Erdsystem. Für die Temperaturrechnung wird deshalb nicht diese vereinfachte Konzentrationsrechnung, sondern die TCRE verwendet. [Q01]

40. Von einer Tonne zur Konzentration: was 0,04 Prozent tatsächlich bedeuten

Die atmosphärische CO₂-Konzentration liegt heute bei rund 428 ppm, also ungefähr 0,043 Volumenprozent trockener Luft. Dass CO₂ damit ein Spurengas ist, ist eine korrekte Beschreibung seiner Konzentration, sagt aber allein nichts über seine Strahlungswirkung aus. Ebenso wichtig ist die relative Veränderung. NOAA weist für August 2026 am Mauna-Loa-Observatorium 427,55 ppm und für den globalen Monatsmittelwert im Juni 2026 427,62 ppm aus. Gegenüber vorindustriellen Werten um etwa 280 ppm ist die Konzentration damit um mehr als die Hälfte gestiegen. [Q03][Q04]

Für die marginale Rechnung gilt näherungsweise: Eine ppm CO₂ in der Atmosphäre entspricht etwa 7,82 Gt CO₂. Wenn im mehrdekadischen Mittel rund 44 % zusätzlicher anthropogener Emissionen atmosphärisch akkumulieren, erhöht 1 Gt CO₂ die atmosphärische Konzentration zunächst größenordnungsmäßig um 0,0563 ppm; eine einzelne Tonne um rund $5,63 \times 10^{-11}$ ppm. Die deutsche Referenzreduktion von 5,735 Gt entspricht unter derselben vereinfachten Momentaufnahme etwa 0,323 ppm weniger atmosphärischer CO₂-Konzentration. Diese Konzentrationsdifferenz ist klein gegenüber dem heutigen Niveau, aber groß genug, um als kumulative Emissionsmenge in der TCRE-Rechnung einen endlichen Temperatureffekt zu erzeugen.

Skalierung	vermiedene Konzentration (vereinfachte 44%-Näherung)
1 t CO ₂	5.627e-11 ppm
1 Mt CO ₂	0.000056 ppm
1 Gt CO ₂	0.05627 ppm
5,735 Gt CO ₂	0.323 ppm

41. Direkte Strahlungswirkung: vom Spektrum zur Energiebilanz

Die Behauptung, eine CO₂-Strahlungswirkung sei lediglich modelliert und nie beobachtet worden, hält der Messlage nicht stand. Satellitenspektren zeigten bereits beim Vergleich von 1970 und 1997 Veränderungen der ausgehenden langwelligen Strahlung in den Absorptionsbanden von Treibhausgasen. Feldman und Kollegen bestimmten für zwei bodengestützte Messstationen zwischen 2000 und 2010 einen direkt beobachteten Anstieg des klarhimmelig CO₂-Strahlungsantriebs von rund 0,2 W/m² pro Jahrzehnt bei einem Konzentrationsanstieg von 22 ppm. Diese Messungen beweisen nicht automatisch eine bestimmte Klimasensitivität oder einen bestimmten Wohlfahrtsschaden, aber sie schließen die Aussage aus, es gebe keinerlei empirischen Strahlungsnachweis. [Q05][Q06]

Um die Größenordnung einer einzelnen Tonne sichtbar zu machen, kann die gebräuchliche logarithmische Näherung $\Delta F = 5,35 \cdot \ln(C/C_0)$ lokal linearisiert werden. Bei rund 427,6 ppm beträgt die Ableitung ungefähr 0,01251 W/m² je zusätzlichem ppm. Multipliziert mit der vereinfachten atmosphärischen Konzentrationswirkung einer Tonne ergibt sich zunächst eine Größenordnung von etwa $7,0 \times 10^{-13}$ W/m². Über die gesamte Erdoberfläche entspricht dies einer momentanen Leistungsgröße von rund 359 Watt, solange diese marginale Konzentrationsdifferenz in dieser Form besteht. Über ein Jahr wären das rund 11,3 GJ Strahlungsenergie. Diese Zahl darf nicht mit gespeicherter Wärme oder Schaden verwechselt werden; sie illustriert lediglich, dass ein winziger flächenspezifischer Antrieb über eine planetare Fläche eine endliche Energiemenge repräsentiert.

Größe	Wert
Aktuelle Referenzkonzentration	427.62 ppm
lokale Ableitung der Forcing-Formel	0.01251 W/m ² je ppm
vereinfachtes Forcing je vermiedener Tonne	7.039e-13 W/m ²
entsprechende globale Leistung	359 W
Energieäquivalent über ein Jahr	11.3 GJ

Die eigentliche Klimafrage beginnt erst nach dieser Stufe. Ein Strahlungsantrieb wird durch Ozeanwärmeaufnahme, atmosphärische Temperaturänderung, Wasserdampf, Wolken, Eis-Albedo, Vegetation und weitere Rückkopplungen beantwortet. Gerade deshalb ist es methodisch falsch, die direkte Spektroskopie entweder als vollständigen Beweis sämtlicher Klimafolgen oder – im gegenteiligen Extrem – als irrelevant abzutun. Die direkte Wirkung ist beobachtbar; die Größe der daraus entstehenden Erwärmung und der gesellschaftlichen Folgen benötigt zusätzliche Evidenz.

42. Sonne und Ozean: Gegenhypothesen quantitativ einordnen

Die Sonne ist die primäre Energiequelle des Klimasystems. Ohne solare Einstrahlung gäbe es die betrachtete Energiebilanz überhaupt nicht. Für die Attribution des modernen Trends ist jedoch nicht die absolute Größe der Solarenergie entscheidend, sondern die Veränderung des solaren Antriebs über denselben Zeitraum. Satellitenmessungen zeigen seit 1979 den etwa elfjährigen Sonnenzyklus, aber keinen anhaltenden Aufwärtstrend, der die beobachtete Erwärmung erklären könnte. NASA fasst die Evidenz dahin zusammen, dass die solare Einstrahlung seit den 1950er-Jahren keinen Nettoanstieg zeigt, während die globale Temperatur deutlich stieg. Das beobachtete Muster – Erwärmung von Oberfläche und Troposphäre bei gleichzeitiger Abkühlung der Stratosphäre – ist ebenfalls nicht das Muster, das man von einer allgemeinen Verstärkung der Sonnenleistung erwarten würde. [Q07][Q08]

Der Ozean ist dagegen für die Dynamik der beobachteten Erwärmung zentral. Nach IPCC AR6 entfallen rund 91 % der zusätzlichen Energie im Erdsystem auf Ozeanwärmeaufnahme. Der Ozean moduliert damit Oberflächentemperaturen und erzeugt über ENSO und andere Zirkulationsmuster starke natürliche Schwankungen. Dies macht Meerestemperaturen zu einem wesentlichen Klimafaktor, aber nicht automatisch zu einer alternativen externen Energiequelle. In der globalen Energiebilanz nimmt der Ozean gegenwärtig netto Wärme auf. Gleichzeitig nimmt er netto anthropogenes CO₂ auf: Die IPCC-Auswertung nennt für 1994–2007 etwa 26 ±5 % der anthropogenen Emissionen als Ozeanspeicherung; über sechs Jahrzehnte wuchsen Land- und Ozeansenken mit den Emissionen. Ein wärmerer Ozean kann lokal und zeitweise CO₂ ausgasen und seine Aufnahmefähigkeit verändern, doch die beobachtete globale Nettoaufnahme widerspricht der einfachen These, der heutige atmosphärische CO₂-Anstieg sei im Wesentlichen aus einer Nettoausgasung des Ozeans entstanden. [Q01][Q09]

Für die Folgenabschätzung ergibt sich daraus eine wichtige methodische Konsequenz. Natürliche Variabilität muss bei kurzfristigen Temperatur- und Extremereignissen berücksichtigt werden; sie kann die Wirkung einer kleinen nationalen Emissionsänderung über Jahre vollständig überlagern. Für die langfristige marginale Wirkung kumulativer CO₂-Emissionen ist diese kurzfristige Überlagerung jedoch nicht dasselbe wie eine Nullwirkung. Die TCRE beschreibt gerade den langfristigen Zusammenhang im Ensemble und nicht die Sichtbarkeit einer deutschen Klimamaßnahme in der Temperaturkurve eines einzelnen Jahres.

42A. Modellrechnungen: was sie leisten – und was sie nicht beweisen

Für die Folgenabschätzung gilt eine strikte Evidenzhierarchie. Messungen zeigen, was tatsächlich beobachtet wurde. Attribution versucht, beobachtete Veränderungen konkurrierenden Ursachen zuzuordnen. Projektionen rechnen bedingte Zukunftspfade unter vorgegebenen Emissions-, Technologie- und Politikannahmen. Schadensmodelle übersetzen diese Projektionen zusätzlich in gesellschaftliche Folgen. Erst integrierte Bewertungsmodelle monetarisieren die Kette. Eine Zahl auf der letzten Stufe trägt deshalb die Unsicherheit aller vorherigen Stufen mit.

Die Aussage, Klimamodelle seien völlig unbrauchbar, wäre ebenso wenig haltbar wie die Behauptung, ihre Zukunftsrechnungen seien sichere Vorhersagen. Eine retrospektive Auswertung von 17 historischen Temperaturprojektionen aus den Jahren 1970 bis 2007 fand, dass 10 von 17 den beobachteten Temperaturtrend direkt und 14 von 17 die Temperaturreaktion nach Korrektur der tatsächlich eingetretenen Antriebe innerhalb der Unsicherheit trafen. Das spricht für reale Modellinformation bei der globalen Mitteltemperatur. Es beweist aber nicht die Treffsicherheit regionaler Extremereignisse, wirtschaftlicher Schäden oder jahrhundertelanger Eisschildreaktionen.

Gerade die Szenarien zeigen, warum Zukunftsrechnungen nicht mit Messwerten verwechselt werden dürfen. Der 2026 veröffentlichte CMIP7-SzenarioMIP-Rahmen bewertet das frühere sehr hohe SSP5-8.5-Emissionsniveau für das 21. Jahrhundert inzwischen als unplausibel, unter anderem wegen der Entwicklung erneuerbarer Energien, Klimapolitik und realer Emissionstrends. Gleichzeitig sind auch mehrere sehr niedrige CMIP6-Pfade mit den beobachteten Entwicklungen der 2020er-Jahre nicht mehr konsistent. Die neue Szenariospanne ist deshalb enger und verschoben. Das ist keine Widerlegung der Treibhausphysik, aber ein konkreter Beleg dafür, dass sozioökonomische Zukunftspfade altern und politische Nutzenrechnungen, die stark an ein einzelnes Extremszenario gekoppelt wurden, revidiert werden müssen.

Der IPCC hat diese Änderung nicht als Rücknahme eines eigenen 'Katastrophenszenarios' oder eines Temperaturziels bezeichnet. Er stellte im Mai 2026 ausdrücklich klar, dass die Szenarien vom ScenarioMIP/CMIP-Prozess stammen und im AR7 erst bewertet werden. Für die Folgenabschätzung ist die sachliche Schlussfolgerung enger und wichtiger: Szenarien sind konditionale Rechenwelten, keine Prognosen mit zugesicherter Eintrittswahrscheinlichkeit. Je weiter eine politische Begründung von Messwerten über Szenarien zu Schadens- und Geldmodellen fortschreitet, desto zwingender ist eine Sensitivitätsrechnung.

Evidenzstufe	Beispiel	Status in der Bilanz
Messung	deutsche Emissionen, CO ₂ -Konzentration, Satelliten-Meeresspiegel, Ausgaben	höchste empirische Priorität
Bilanz / Attribution	Kohlenstoffbudget, Ursachenanteile der Erwärmung, Meeresspiegelkomponenten	empirisch gestützt, aber methodenabhängig
Klimamodell	TCRE, regionale Erwärmung, Extremereignisänderung	bedingte Modellrelation; Sensitivität erforderlich
Impactmodell	Mortalität, Ernte, BIP, Küstenschäden	stärker annahmenabhängig
Monetarisierung	Euro je Tonne oder je 0,001 °C	keine Messgröße; Ergebnis normativer und ökonomischer Annahmen

43. Temperaturwirkung der deutschen Restreduktion bis 2045

Das zentrale deutsche Rechenbeispiel ist bewusst einfach und überprüfbar. Ausgangspunkt sind 573.5 Mio. t CO₂ pro Jahr. Bleiben diese Emissionen zwanzig Jahre konstant, entstehen 11,47 Gt CO₂. Sinken sie linear auf null, entstehen im selben Zeitraum 5,735 Gt. Die Differenz beträgt daher ebenfalls 5,735 Gt. Multipliziert mit der zentralen TCRE von 0,00045 °C je Gt ergibt sich eine vermiedene globale Erwärmung von 0.002581 °C. Der wahrscheinliche IPCC-Bereich beträgt 0.001548 bis 0.003613 °C. Diese Rechnung ist eine Obergrenze für die Wirkung zusätzlicher deutscher Politik, weil das Gegenfaktum konstanter Emissionen technischen Fortschritt und andere autonome Minderungen ignoriert.

Schritt	Rechnung	Ergebnis
Konstantes Gegenfaktum	0,5735 Gt/Jahr × 20 Jahre	11,470 Gt
Linear auf null	0,5 × 0,5735 × 20	5,735 Gt
Zusätzliche Vermeidung im Referenzmodell	11,470 – 5,735	5,735 Gt
Temperatur zentral	5,735 × 0,00045 °C/Gt	0.002581 °C
Temperatur wahrscheinlich	5,735 × 0,00027 bis 0,00063	0.001548 bis 0.003613 °C

Diese Zahl ist klein, aber sie ist nicht null. Sie ist zugleich der entscheidende Maßstab für jede weitere Endpunktrechnung. Wer einen sehr großen deutschen Klimanutzen behauptet, muss erklären, wie eine vermiedene globale Mitteltemperatur in der Größenordnung von rund 0,0026 °C in konkrete weltweite Endpunkte übersetzt wird. Wer umgekehrt behauptet, der Nutzen sei exakt null, muss erklären, warum die anerkannte kumulative Temperaturbeziehung für diese 5,735 Gt nicht gelten sollte. Die folgenden Kapitel nehmen deshalb keine der beiden Positionen vorweg, sondern rechnen jeden Endpunkt separat.

44. Hitzextreme: konkrete Größenordnung

Der IPCC stellt für landbasierte heiße Extreme eine quantitative Beziehung zu globalen Erwärmungsniveaus bereit. Ein Ereignis, das im vorindustriellen Klima im Mittel einmal in zehn Jahren auftrat, wird bei 1,5 °C globaler Erwärmung mit einer Häufigkeit von 4,1-mal pro Jahrzehnt und bei 2 °C mit 5,6-mal pro Jahrzehnt angegeben. Zwischen diesen beiden Punkten entspricht die lokale lineare Steigung ungefähr drei zusätzlichen Basishäufigkeiten pro Grad globaler Erwärmung. Für ein früheres 50-Jahres-Ereignis steigt die entsprechende Häufigkeit von 8,6 auf 13,9 pro 50 Jahre; die lokale Steigung beträgt damit etwa 10,6 pro Grad. [Q10] Überträgt man diese lokale Steigung rein marginal auf die deutsche Referenzwirkung von 0.002581 °C, würde die vollständige deutsche Restreduktion die Häufigkeitskennzahl eines früheren 10-Jahres-Hitzeereignisses um rund 0.0077 und diejenige eines früheren 50-Jahres-Ereignisses um rund 0.0274 Basiseinheiten vermindern. Bezogen auf die 1,5-°C-Häufigkeit entspricht dies ungefähr 0.189 % beziehungsweise 0.318 %. Das ist eine sehr kleine isolierte deutsche Änderung. Sie darf weder als 'keine Wirkung' noch als direkt beobachtbare Veränderung interpretiert werden; sie ist eine aus der IPCC-Dosis-Wirkungs-Kurve abgeleitete Größenordnung.

Endpunkt	IPCC-Werte	lokale Steigung	deutsche Restreduktion
früheres 10-Jahres-Hitzeereignis	4,1× bei 1,5 °C; 5,6× bei 2 °C	≈ 3,0 Häufigkeitseinheiten/°C	–0.0077 Einheiten; ≈ –0.189% ggü. 1,5-°C-Niveau
früheres 50-Jahres-Hitzeereignis	8,6× bei 1,5 °C; 13,9× bei 2 °C	≈ 10,6 Einheiten/°C	–0.0274 Einheiten; ≈ –0.318% ggü. 1,5-°C-Niveau

45. Starkniederschlag: direkte Skalierung

Für extreme tägliche Niederschläge ist die physikalische Skalierung transparenter. Der IPCC bewertet, dass extreme tägliche Niederschläge global im Mittel um ungefähr 7 % je 1 °C globaler Erwärmung intensiver werden. Regional kann die Änderung deutlich anders ausfallen; die 7-%-Größe ist daher kein lokaler deutscher Hochwasserkoeffizient. Sie eignet sich jedoch, um die maximale Größenordnung der direkten globalen Intensitätswirkung einer kleinen Temperaturänderung sichtbar zu machen. [Q11][Q12]

Multipliziert man 7 %/°C mit 0.002581 °C, ergibt sich für die vollständige deutsche Referenzreduktion eine vermiedene Änderung der Intensität extremer Tagesniederschläge von rund 0.0181 %. Im unteren TCRE-Bereich wären es etwa 0.0108 %, im oberen etwa 0.0253 %. Diese Größenordnung ist so klein, dass sie an einem einzelnen Ereignis nicht messbar wäre. Sie ist dennoch die korrekte Größenordnung des isolierten deutschen Beitrags innerhalb dieses globalen Skalierungsansatzes.

TCRE-Annahme	vermiedene globale Erwärmung	abgeleitete Änderung Extremniederschlagsintensität
untere wahrscheinliche Grenze	0.001548 °C	0.0108 %
zentrale Schätzung	0.002581 °C	0.0181 %
obere wahrscheinliche Grenze	0.003613 °C	0.0253 %

Für Überschwemmungsschäden reicht diese Niederschlagszahl allein nicht aus. Hochwasserschäden hängen von Versiegelung, Flussausbau, Bodenfeuchte, Topografie, Schutzbauten, Siedlungsentwicklung und Vermögenswerten in Risikozonen ab. Eine seriöse Nutzenrechnung darf deshalb nicht 0,018 % weniger Extremniederschlag unmittelbar in 0,018 % weniger Hochwasserschaden übersetzen. Gerade diese Trennung zwischen physikalischem Hazard und gesellschaftlichem Schaden gehört zu den zentralen Erkenntnissen der Folgenabschätzung.

46. Dürre und Wasser: warum keine globale Einheitszahl möglich ist

Bei Dürre ist eine lineare Weltzahl nicht seriös. Der IPCC bewertet zwar, dass die atmosphärische Verdunstungsnachfrage mit Erwärmung steigt und landwirtschaftliche beziehungsweise ökologische Dürren in mehreren Regionen zunehmen, zugleich werden andere Regionen nasser. Zudem erhöht CO₂ bei Pflanzen häufig die Wassernutzungseffizienz, was den Wasserhaushalt teilweise gegenläufig beeinflussen kann. Für regionale Dürren ist daher nicht allein die globale Mitteltemperatur entscheidend, sondern Niederschlagsverteilung, Boden, Vegetation, Bewässerung und atmosphärische Zirkulation. [Q13]

Die konkrete Konsequenz für diese Evaluation lautet: Für die deutsche Restreduktion kann kein wissenschaftlich belastbarer globaler Wert 'x vermiedene Dürretage' angegeben werden. Ein solcher Wert wäre erfunden. Stattdessen muss bei konkreten Maßnahmen oder Regionen mit regionalen Klimamodellen und hydrologischen Modellen gearbeitet werden. Der Nutzen wird in diesem Endpunkt deshalb als Richtung mit hoher regionaler Heterogenität erfasst, nicht als fiktive globale Zahl. Dieses 'nicht robust quantifizierbar' ist ein Ergebnis und kein Datenmangel, den man mit einer beliebigen Geldzahl überdecken darf.

47. Meeresspiegel: beobachteter Anstieg ja – deutscher Vermeidungsnutzen nur modelliert

Die Beobachtungsebene ist vergleichsweise klar: Der globale mittlere Meeresspiegel ist gestiegen. Der IPCC bilanziert für 1901–2018 etwa 0,20 m; NASA-Satellitendaten zeigen seit 1993 rund 0,10 m Anstieg. Diese Messung ist von der Attribution zu unterscheiden. Für 1971–2018 lässt sich die beobachtete Bilanz aus thermischer Expansion, Gletschern, Eisschilden und Landspeichern innerhalb der Unsicherheiten weitgehend schließen. Das stützt eine physikalische Erklärung, ist aber nicht identisch mit einer exakten Zuordnung jeder beobachteten Millimeteränderung zu anthropogenem CO₂.

Die Zukunftsebene ist deutlich unsicherer. Aussagen über Meeresspiegel in 2100 oder gar über Jahrhunderte beruhen auf Emissionsszenarien, Ozean- und Eismodellen und teilweise tiefen Unsicherheiten, insbesondere beim antarktischen Eisschild. Deshalb wird die frühere lineare Interpolation 'deutscher Restpfad = rund 7,7 mm langfristig vermiedener Meeresspiegel' nicht als Ergebnis verwendet. Sie war eine Illustration einer Modellkette, kein messbarer deutscher Nutzen. In der Gesamtbilanz wird der Meeresspiegel nur so geführt: beobachteter Anstieg = gemessen; anthropogener Anteil = attribuiert; zukünftiger Anstieg = modelliert; Anteil einer deutschen Maßnahme = mehrfach modellabhängig. Für die Nutzenrechnung bedeutet das: Meeresspiegelrisiken können einen realen globalen Nutzen der Emissionsminderung begründen, aber sie liefern keine direkt messbare Euro-Rendite deutscher Klimapolitik. Eine Monetarisierung muss deshalb als Szenario erfolgen und darf keine Langfristprojektion wie einen beobachteten Schaden behandeln.

48. Hitze- und Kältemortalität: eine empirische Nettofrage

Temperaturmortalität ist ein gutes Beispiel dafür, warum der Nettoendpunkt wichtiger ist als eine einseitige Gefahrenliste. Sowohl hohe als auch niedrige Temperaturen erhöhen die Mortalität, und die optimale Temperatur unterscheidet sich regional. IPCC AR6 verweist darauf, dass die globale Krankheitslast niedriger Temperaturen in den GBD-Daten 2019 etwa 2,2-mal so groß war wie diejenige hoher Temperaturen, gleichzeitig aber zukünftige zusätzliche Erwärmung global voraussichtlich zu einem Nettoanstieg temperaturbezogener Mortalität führt. Wohlhabende kalte Regionen können durch mildere Winter netto profitieren, während arme und bereits heiße Regionen deutlich verlieren können. [Q16]

Für einen möglichst datenarmen, transparenten Überschlag lässt sich die beobachtete Multi-Country-Attribution von Vicedo-Cabrera et al. verwenden, die für 732 Standorte in 43 Ländern im Zeitraum 1991–2018 im Mittel 2,2 warm-season heat deaths je 100.000 Einwohner auf anthropogenen Klimawandel zurückführte. Teilt man diese beobachtete Rate rein heuristisch durch ungefähr 1,1 °C anthropogene Erwärmung, erhält man etwa 2,0 zusätzliche warm-season heat deaths je 100.000 Einwohner und Grad. Wendet man diese Steigung auf die deutsche Referenzwirkung von rund 0,00258 °C und – ausdrücklich nur als Demonstration – auf eine Weltbevölkerung von 8,2 Milliarden an, ergibt sich eine Größenordnung von rund 423 warm-season heat deaths pro Jahr. Diese Extrapolation ist keine globale Schätzung, weil die 43 Länder nicht die Welt repräsentieren und Kälteeffekte fehlen. Sie zeigt aber, wie aus einer beobachteten Rate nachvollziehbar eine Größenordnung entsteht.

Ein deutlich anderes Ergebnis liefert die integrierte Modellstudie von Bressler. Sie schätzt für eine 2020 emittierte Tonne im Basisszenario $2,26 \times 10^{-4}$ zusätzliche temperaturbedingte Todesfälle bis 2100, mit einem sehr breiten Bereich von $-1,71 \times 10^{-4}$ bis $+6,78 \times 10^{-4}$. Überträgt man diese marginale Modellzahl mechanisch auf 5,735 Gt, ergäben sich zentral etwa 1.30 Millionen vermiedene Todesfälle, mit einem Unsicherheitsbereich von rund 0.98 Millionen zusätzlichen bis 3.89 Millionen vermiedenen Todesfällen. Diese enorme Spannweite ist gerade der Befund: Die Mortalitätsbewertung ist nicht durch die TCRE allein festgelegt, sondern durch Demografie, Anpassung, regionalen Temperaturverlauf, Zukunftsszenario und statistische Schadenfunktion. [Q17]

Ansatz	Grundlage	Ergebnis für 5,735 Gt	Hauptproblem
einfache Beobachtungslinearisation	2,2 warm-season heat deaths/100.000 attributable in 43 Ländern; $\approx 1,1$ °C	≈ 423 vermiedene Hitzetote/Jahr bei unrealistischer Welt-Extrapolation	keine globale Repräsentativität; Kälte fehlt
Bressler 2021 – zentral	$2,26 \times 10^{-4}$ Todesfälle/t bis 2100	≈ 1.30 Mio. vermiedene Todesfälle	integriertes Szenariomodell; Übertragung auf 2026–2045 nicht 1:1
Bressler 2021 – Unsicherheitsbereich	$-1,71 \times 10^{-4}$ bis $+6,78 \times 10^{-4}$ /t	≈ -0.98 bis 3.89 Mio.	Vorzeichen kann im unteren Bereich kippen

Die Folge für die Gesamtbilanz ist eindeutig: Temperaturmortalität darf nicht mit einem einzigen 'Tote pro Tonne'-Wert als gesichert behandelt werden. Es gibt empirische Evidenz für zusätzliche Hitzemortalität und ebenso für vermiedene Kältemortalität, und hochwertige Modelle projizieren global einen Nettoanstieg bei stärkerer Erwärmung. Die marginale Größe ist jedoch stark modellabhängig. Für das Ambitionsniveau sollte deshalb eine Bandbreite geführt werden, deren untere Grenze ausdrücklich auch einen geringen oder in bestimmten Regionen negativen Nettonutzen zulässt.

49. Landwirtschaft: Erwärmung und CO₂-Düngung müssen gleichzeitig gerechnet werden

Landwirtschaft ist der Endpunkt, bei dem eine ausschließlich negative CO₂-Bilanz besonders unvollständig wäre. Erhöhtes CO₂ kann die Photosynthese von C3-Pflanzen steigern und die Wassernutzungseffizienz verbessern. Satellitendaten zeigen seit den 1980er-Jahren eine breite globale Begrünung; eine viel zitierte Attribution schätzte den CO₂-Düngungseffekt als wichtigsten Treiber und ordnete ihm etwa 70 % des beobachteten Greening-Trends zu. Gleichzeitig zeigen Feldversuche und Modellvergleiche, dass Nährstoffbegrenzung, Hitze, Dürre, Schädlinge und sinkende Nährstoffqualität den Vorteil begrenzen können. [Q18][Q19][Q20]

Für eine konkrete Rechenübung eignet sich eine aktuelle Meta-Analyse mit expliziten Koeffizienten. Unterhalb eines bestimmten Temperaturschwellenbereichs berichtet sie für Weizen im Mittel etwa –6,1 % Ertrag je +1 °C und +0,06 % Ertrag je +1 ppm CO₂; für Mais etwa –4,03 % je +1 °C und in dieser speziellen Auswertung einen kleinen negativen CO₂-Koeffizienten von –0,016 % je ppm. Diese Koeffizienten sind keine universellen Weltparameter, aber sie erlauben eine transparente Gegenrechnung statt einer einseitigen Annahme. [Q21]

Eine zusätzliche Gigatonne CO₂ erhöht bei 44%-Airborne-Näherung die Konzentration um rund 0.0563 ppm und die globale Temperatur nach TCRE zentral um 0,00045 °C. Für Weizen ergibt die genannte Parametrisierung dadurch +0.00338 % direkten CO₂-Effekt und –0.00274 % Temperatureffekt, netto also etwa 0.00063 % pro Gt. Für Mais ergibt dieselbe mechanische Rechnung etwa –0.00271 % pro Gt. Über die deutsche Referenzmenge von 5,735 Gt wären das in dieser Parametrisierung ungefähr 0.0036 % bei Weizen und –0.0156 % bei Mais. Bezogen auf die FAO-Weltproduktion 2024 von rund 789 Mio. t Weizen und 1.271 Mio. t Mais entspräche dies grob 28,550 t zusätzlichem Weizenertrag, aber 197,811 t geringerem Maisertrag pro Jahr, sofern die Koeffizienten global gelten würden. Genau diese letzte Annahme gilt ausdrücklich nicht; das Beispiel demonstriert die Notwendigkeit einer kultur- und regionsspezifischen Nettoanalyse. [Q22]

Kultur / Beispiel	direkter CO ₂ -Effekt je 1 Gt	Temperatureffekt je 1 Gt	Netto je 1 Gt	Netto bei 5,735 Gt
Weizen	+0.00338 %	–0.00274 %	+0.00063 %	+0.0036 %
Mais	–0.00090 %	–0.00181 %	–0.00271 %	–0.0156 %

Der wichtigste Befund ist nicht das Vorzeichen dieser beiden Beispielzahlen, sondern die Struktur: Eine vermiedene Tonne CO₂ vermeidet sowohl einen Erwärmungsbeitrag als auch einen CO₂-Düngungsbeitrag. Wer nur den Erwärmungsschaden ansetzt, überschätzt den Nettoagrarnutzen der Vermeidung; wer nur den Düngungseffekt betrachtet, unterschlägt Hitze-, Dürre-, Schädlings- und Extremrisiken. Eine belastbare Weltbilanz müsste für jede Hauptkultur regionale Temperatur-, Niederschlags-, CO₂-, Nährstoff- und Anpassungsreaktionen integrieren. Der IPCC kommt trotz Berücksichtigung von CO₂-Düngung für die großen Kulturen im 21. Jahrhundert überwiegend zu negativen Medianwirkungen ohne Anpassung, bei erheblichen regionalen Unterschieden. [Q23]

50. Vegetation und Biosphäre: positiver CO₂-Endpunkt mit Rückkopplungen

Jenseits der Landwirtschaft ist der CO₂-Düngungseffekt auf natürliche Vegetation ein realer positiver Endpunkt. Die globale Greening-Studie von Zhu et al. fand zwischen 1982 und 2009 eine signifikante Zunahme der Blattfläche über etwa 25 bis 50 % der bewachsenen Landfläche, bei weniger als 4 % Browning; Modellattribution schrieb rund 70 % des Greening-Trends der CO₂-Düngung zu. Eine spätere Literaturübersicht bestätigt fortgesetztes globales Greening, weist aber auf starke regionale Unterschiede und konkurrierende Treiber hin. [Q18][Q24]

Die Wohlfahrtswirkung dieses Greening ist nicht automatisch positiv oder negativ. Mehr Blattfläche kann Biomasse, Kohlenstoffspeicherung, Erträge und Verdunstung erhöhen; sie kann zugleich den lokalen Wasserhaushalt verändern und über geringere Albedo erwärmen. Eine Modellstudie schätzte, dass beobachtetes Greening seit 1982 die Zunahme der globalen Landoberflächentemperatur um etwa 0,09 ± 0,02 °C gebremst habe, überwiegend über erhöhte Evapotranspiration. Das bedeutet: CO₂ wirkt nicht nur direkt strahlungsphysikalisch, sondern auch biologisch mit teilweise gegenläufigen Rückkopplungen. [Q25]

Für die marginale deutsche Tonne lässt sich dieser positive Biosphäreneffekt derzeit nicht seriös in 'zusätzliche Tonnen Biomasse' umrechnen, weil Satellitenattribution, FACE-Experimente und Erdsystemmodelle bei der Stärke des CO₂-Fertilisationseffekts auseinanderliegen. Genau deshalb wird der positive Endpunkt im Ledger ausdrücklich geführt, aber nicht mit einem erfundenen Geldwert versehen. Eine Nutzen-Risiko-Bilanz, die diesen Effekt mit null ansetzt, wäre ebenso voreingenommen wie eine Bilanz, die ihn als vollständigen Ausgleich für Erwärmungsrisiken behandelt.

51. Ozeanchemie: CO₂-Wirkung unabhängig von der Temperatur

Ein besonderer Endpunkt ist die Ozeanversauerung, weil sie nicht erst über die Temperaturkette läuft. Der Ozean hat ungefähr ein Viertel der anthropogenen CO₂-Emissionen aufgenommen. Gelöstes CO₂ bildet Kohlensäure und verändert das Carbonatsystem; der IPCC bewertet die anthropogene CO₂-Aufnahme mit sehr hoher Sicherheit als Ursache der beobachteten Abnahme des Oberflächen-pH. Seit den 1980er-Jahren werden in verschiedenen Ozeanzonen typische pH-Abnahmen in der Größenordnung einiger Hundertstel pro Jahrzehnt beobachtet. [Q09][Q26]

Für die einzelne Tonne ist eine direkte globale pH-Zahl dennoch nicht sinnvoll, weil Aufnahme, Durchmischung, Pufferkapazität und regionale Carbonatchemie stark variieren. Anders als bei der TCRE existiert keine allgemein akzeptierte lineare 'pH pro Gt'-Kennzahl, die ohne ein Ozeanmodell verwendet werden könnte. Der Endpunkt ist physikalisch kausal gut belegt, aber marginal quantitativ nur modellgestützt. In der Ergebnisbilanz wird er deshalb als robuster negativer CO₂-Endpunkt mit nicht belastbar vereinfachbarer Einzeltonnenzahl geführt.

52. Arbeitsproduktivität und Hitzeexposition

Hitze beeinflusst nicht nur Mortalität, sondern auch Arbeitsfähigkeit, insbesondere bei körperlicher Außenarbeit. IPCC WGII bewertet sinkende Arbeitsproduktivität mit steigender Temperatur als relevantes wirtschaftliches Risiko und verweist auf Studien, in denen höhere Erwärmungsniveaus die effektive Arbeitsleistung deutlich reduzieren. Diese Wirkung ist regional extrem ungleich: In gemäßigten Innenarbeitsplätzen ist sie gering, in tropischer Landwirtschaft, Bauwirtschaft und anderen körperlichen Tätigkeiten erheblich. [Q27]

Eine belastbare marginale Weltzahl je deutscher Tonne lässt sich aus der IPCC-Synthese nicht direkt ableiten, weil die Arbeitswirkung von Feuchte, Arbeitsintensität, Tageszeit, Akklimatisation, Technologie und Einkommen abhängt. Für die Ambitionsentscheidung ist trotzdem relevant, dass die deutsche Referenztemperaturwirkung nur rund 0,0026 °C beträgt. Selbst wenn ein Modell bei 2 °C Erwärmung zweistellige prozentuale Arbeitsverluste in besonders exponierten Sektoren projiziert, skaliert der isolierte deutsche direkte Beitrag zunächst nur mit einem Bruchteil eines Prozents dieses Gesamteffekts. Der

potenzielle globale Aggregatnutzen entsteht durch die große Zahl betroffener Arbeitsstunden, nicht durch eine große lokale Temperaturänderung Deutschlands.

53. Gesamtwirtschaftliche Schäden: was empirische Modelle tatsächlich sagen

Gesamtwirtschaftliche Klimaschadensmodelle bündeln viele Endpunkte und sind deshalb verführerisch, aber methodisch gefährlich. Eine aktuelle Nature-Climate-Change-Analyse schätzt das globale BIP bei 1,5 °C zusätzlicher Erwärmung gegenüber einem Szenario ohne weitere Klimaänderung um rund 3,2 % niedriger und bei 3 °C um rund 10 %. Der IPCC selbst betont jedoch die große Streuung wirtschaftlicher Schadensschätzungen und weist darauf hin, dass einige Regionen bei niedrigen Erwärmungsniveaus profitieren können. [Q28][Q29] Um die Größenordnung sichtbar zu machen, kann man die modellierte Differenz zwischen 1,5 und 3 °C lokal linearisieren. Die Zunahme des modellierten BIP-Verlusts beträgt 6,8 Prozentpunkte über 1,5 °C, also rund 4,53 Prozentpunkte globales BIP je zusätzlichem Grad in diesem Bereich. Eine vermiedene deutsche Referenzerwärmung von 0,00258 °C entspräche in dieser sehr groben lokalen Ableitung rund 0,0117 Prozentpunkten globalen BIP. Das ist keine gemessene Wirkung der deutschen Politik, sondern die Anwendung einer konkreten publizierten Schadenfunktion. Andere Funktionen ergeben andere Werte. Der Vorteil dieses Vorgehens gegenüber einem fertigen 'Euro pro Tonne'-Preis besteht darin, dass die eigentliche Annahme sichtbar bleibt: die Steigung der BIP-Schadenfunktion.

Modellpunkt	publizierter globaler BIP-Effekt	lokale Interpretation
+1,5 °C	-3,2 % globales BIP	untere Referenz
+3,0 °C	-10,0 % globales BIP	obere Referenz
Differenz	-6,8 Prozentpunkte / 1,5 °C	≈ -4,53 Prozentpunkte je °C
deutsche Referenzwirkung	0.002581 °C	≈ 0,0117 Prozentpunkte vermiedener modellierter BIP-Verlust

Gerade hier ist eine zentrale Trennung nötig: Das ist keine direkte physikalische Messung. Es handelt sich um eine ökonometrische beziehungsweise modellgestützte Schadensfunktion, die historische Klima-Wirtschafts-Beziehungen in die Zukunft überträgt. Anpassung, technischer Fortschritt, Konflikte, Handel und politische Reaktionen können das Ergebnis verändern. Deshalb darf diese Zahl nicht als naturwissenschaftlicher Fakt behandelt werden, wohl aber als empirisch publizierte Schätzung mit klar sichtbarer Modellannahme.

54. Extreme Wetterereignisse: Endpunkte ohne einfache Tonnennorm

Für viele Extremereignisse ist die Evidenz stärker für Richtung und Wahrscheinlichkeit als für einen linearen Schaden je Tonne. Der IPCC bewertet zunehmende Häufigkeit und Intensität heißer Extreme als sehr gut belegt, Starkniederschläge als zunehmend und bei tropischen Wirbelstürmen vor allem den Anteil besonders intensiver Stürme und Starkniederschläge als klimawandelrelevant; für die langfristige Gesamtfrequenz aller tropischen Wirbelstürme besteht dagegen nur geringe Sicherheit. Dürrierisiken steigen in bestimmten Regionen, nicht überall. [Q12]

Die praktische Konsequenz lautet: Eine nationale Kosten-Nutzen-Rechnung darf nicht pauschal sämtliche heutigen Sturm-, Hochwasser-, Waldbrand- oder Dürreschäden mit einem festen Prozentsatz dem CO₂ zurechnen und anschließend proportional auf vermiedene Tonnen verteilen. Für jeden Endpunkt sind Hazard, Exposition und Vulnerabilität getrennt zu modellieren. Ein reiches Küstenland mit Deichen kann bei gleichem Meeresspiegelanstieg einen anderen Schaden haben als ein armes Delta; ein Starkregenereignis über unbebautem Land hat einen anderen Endpunkt als derselbe Niederschlag über dicht bebauter Stadt. Die Unsicherheit liegt daher häufig stärker in Exposition und Anpassung als in der physikalischen Richtung.

55. Das Endpunkt-Ledger einer vermiedenen Tonne

Die folgende Tabelle fasst zusammen, was sich für eine einzelne vermiedene Tonne heute tatsächlich mit unterschiedlichem Evidenzgrad sagen lässt. Entscheidend ist die Spalte 'Quantifizierbarkeit'. Sie verhindert, dass robuste Physik und unsichere Wohlfahrtsmodelle in derselben Zahl verschwinden. Die Tonne ist physikalisch additiv; ihre gesellschaftliche Wirkung ist heterogen und teilweise nicht sinnvoll auf eine universelle Einheitszahl reduzierbar.

Endpunkt	Richtung einer vermiedenen Tonne	marginale Größenordnung	Evidenz / Einschränkung
atmosphärisches CO ₂	senkend	≈ 5.63e-11 ppm (44-%-Näherung)	direkte Bilanz, aber zeitabhängige Senken
globale Mitteltemperatur	senkend	≈ 4.50e-13 °C; wahrscheinlich 2.70e-13–6.30e-13	IPCC-TCRE, relativ robust
Extremniederschlagsintensität	senkend	≈ 7 %/°C × ΔT	globaler Mittelwert, regional unterschiedlich
Hitzeextreme	senkend	nicht sinnvoll pro Einzeltonne beobachtbar	IPCC-Häufigkeitskurven nach Erwärmungsniveau
Kälterisiko	potenziell erhöhend	regional unterschiedlich	mildere Winter sind positiver Erwärmungseffekt
Meeresspiegel	senkend	langfristig Millimeter/Zentimeter je große Gt-Pakete	stark zeitverzögert, breite Unsicherheit
C3-Pflanzen / Greening	potenziell senkend als Nutzenverlust	CO ₂ -Düngung real, kein universeller Koeffizient	Nährstoff-, Wasser- und Temperaturabhängigkeit
Kulturerträge	gemischt	kultur- und regionsspezifisch	CO ₂ -Düngung plus Hitze/Dürre/Schädlinge
Ozean-pH	positiv durch Vermeidung	kein robuster linearer pH/t-Koeffizient	CO ₂ -Chemie kausal gut belegt
Mortalität	wahrscheinlich global positiv netto	Modelle reichen bis zu Vorzeichenunsicherheit	Hitze/Kälte/Anpassung/Demografie
Arbeitsproduktivität	positiv v.a. heiße Regionen	nicht universell pro t quantifizierbar	Exposition und Anpassung dominieren
globales BIP	in vielen Modellen positiv	stark schadenfunktionsabhängig	ökonomisch, nicht physikalisch gemessen

56. Deutschland 2026–2045: integrierte natürliche Folgenbilanz

Wendet man die Endpunktlogik auf die maximale Referenzvermeidung von 5,735 Gt an, entsteht erstmals eine Folgenbilanz in natürlichen Einheiten. Sie ist bewusst keine Geldbilanz. Die Zahlen zeigen, wie groß der isolierte direkte deutsche Beitrag unter dem konstanten Gegenfaktum wäre. Bei Endpunkten, bei denen keine robuste direkte Skalierung existiert, wird keine Scheingenauigkeit erzeugt.

Endpunkt	Referenzwirkung 5,735 Gt	Interpretation
globale Mitteltemperatur	−0.002581 °C (wahrscheinlich −0.001548 bis −0.003613)	direkter zentraler physikalischer Maßstab
atmosphärisches CO ₂	≈ −0.323 ppm in 44-%-Näherung	keine dauerhafte Pulsantwort
Extremniederschlagsintensität	≈ −0.0181 % globaler Skalierungswert	regional nicht gleich Hochwasserschaden
10-Jahres-Hitzextrem-Häufigkeitskennzahl	≈ −0.0077 Basiseinheiten	≈ −0,19 % relativ zum 1,5-°C-IPCC-Wert
50-Jahres-Hitzextrem-Häufigkeitskennzahl	≈ −0.0274 Basiseinheiten	≈ −0,32 % relativ zum 1,5-°C-IPCC-Wert
Meeresspiegelbindung über ~2.000 Jahre	grobe Mittelpunkt-Interpolation ≈ −7.7 mm	niedrige Evidenz; nur Größenordnung
warm-season heat mortality	heuristische Extrapolation ≈ −423/Jahr	nicht global repräsentativ; Kälte fehlt
Bressler-Mortalitätsmodell	zentral −1.30 Mio. bis 2100; sehr breiter Bereich	modell- und szenarioabhängig
Weizen-Beispiel	≈ +0.0036 % in einer Meta-Parametrisierung	CO ₂ -Düngung kann Erwärmungseffekt teilweise kompensieren
Mais-Beispiel	≈ −0.0156 % in derselben Parametrisierung	kein universeller Weltwert
Ozeanversauerung	Richtung positiv durch weniger CO ₂	keine robuste lineare Einzeltonnen-pH-Zahl
globales BIP – Beispielmodell	≈ 0,0117 Prozentpunkte geringerer Verlust	nur lokale Ableitung einer publizierten Schadenfunktion

Diese Tabelle ist der zentrale Befund der Vollrechnung. Der direkte deutsche Temperatureffekt ist sehr klein. Daraus folgen bei physikalisch nahezu linearen Endpunkten ebenfalls kleine prozentuale Veränderungen. Bei global aggregierten gesellschaftlichen Endpunkten kann ein kleiner Klimasignalunterschied trotzdem zu größeren absoluten Zahlen führen, weil Milliarden Menschen, Jahrzehnte oder riesige Kapitalbestände betroffen sind. Genau an dieser Stelle beginnen jedoch Modell- und Bewertungsannahmen. Deshalb muss jede große globale Nutzenzahl zusammen mit dem verwendeten Dosis-Wirkungs-Modell ausgewiesen werden.

57. Deutschlands Anteil und das internationale Koordinationsproblem

Deutschland emittierte 2024 rund 572,3 Mio. t fossiles und industrielles CO₂, entsprechend 1,48 % der globalen 38,6 Gt. China lag bei 12,29 Gt beziehungsweise 31,84 %, Indien bei 3,19 Gt. Historisch beträgt Deutschlands kumulierter Anteil seit 1751 rund 5,14 %. Diese Zahlen beantworten unterschiedliche Fragen: Der kumulierte Anteil ist für historische Verantwortung relevant; der heutige Anteil ist für den direkten marginalen Einfluss zusätzlicher deutscher Maßnahmen entscheidend. [Q30][Q31]

Die kleine nationale Größenordnung bedeutet nicht, dass deutsche Emissionsminderungen physikalisch wirkungslos wären. Sie bedeutet aber, dass eine Rechtfertigung sehr hoher nationaler Grenzkosten zusätzlich auf mindestens einem von drei Mechanismen beruhen muss: erstens internationaler

Koordination, sodass viele Staaten gleichzeitig reduzieren; zweitens Technologie- und Lernkurveneffekten, durch die deutsche Investitionen die globalen Vermeidungskosten senken; oder drittens nationalen Zusatznutzen wie Luftqualität, geringerer Importabhängigkeit oder technischer Modernisierung. Wenn keiner dieser Mechanismen greift, ist die direkte deutsche Klimawirkung durch den 1,48-%-Anteil strukturell begrenzt.

Für die Evaluation ist deshalb Carbon Leakage entscheidend. Die konsumbezogenen deutschen CO₂-Emissionen liegen deutlich über den territorialen Emissionen. Das zeigt, dass ein Teil der in Deutschland konsumierten Emissionen im Ausland entsteht. Eine Maßnahme, die einen Hochofen, eine Chemieranlage oder eine andere Produktion lediglich verlagert, kann die deutsche Bilanz verbessern, ohne die globale Atmosphäre im gleichen Umfang zu entlasten. Jede Maßnahme muss daher mit einer Global-Additionalitätsquote bewertet werden: global vermiedene Tonnen geteilt durch territorial ausgewiesene vermiedene Tonnen.

58. Aufwand ohne Doppelzählung: welche Zahl darf in den Nenner?

Auf der Kostenseite ist dieselbe Disziplin erforderlich. Eine Investition von einer Milliarde Euro ist nicht automatisch ein Wohlfahrtsverlust von einer Milliarde. Wenn ohnehin ein Kraftwerk, Fahrzeug, Heizsystem oder Netz ersetzt werden müsste, ist nur die Differenz zwischen Klimapfad und realistischem Gegenfaktum zusätzliche Klimakosten. Subventionen sind ebenfalls nicht vollständig gesellschaftliche Kosten, weil sie zunächst Transfers zwischen Steuerzahlern und Empfängern darstellen; reale Kosten entstehen durch Ressourcenverbrauch, Verzerrungen, Finanzierungslasten und die Differenz zur nächstbesten Alternative. Umgekehrt dürfen Systemkosten wie Netze, Speicher, Backup und Regelleistung nicht unterschlagen werden, wenn sie kausal durch die gewählte Transformationsarchitektur entstehen.

Die Größenordnungen sind dennoch erheblich. Der Bundesrechnungshof beziffert den notwendigen Stromnetzausbau bis 2045 auf mehr als 460 Mrd. Euro und kritisiert, dass Systemkosten in politischen Darstellungen unzureichend sichtbar seien. Der KTF gab 2024 41,6 Mrd. Euro und 2025 26,6 Mrd. Euro für Programme aus. Das ifo-Institut berechnet in einem Szenario national weitgehend isolierter Klimaneutralität bis 2050 für Deutschland Gesamtkosten von 1,882 Billionen Euro; europäische Kooperation senkt die Kosten deutlich. Diese Zahlen sind nicht addierbar, weil sie verschiedene Definitionen und Überschneidungen besitzen. Sie zeigen aber, dass die Kostenfrage nicht mit einer einzelnen Förderetat-Zahl beantwortet werden kann. [Q32][Q33][Q34]

Für die deutsche Referenzvermeidung von 5,735 Gt ergibt die ifo-Größenordnung rein rechnerisch rund 328 Euro je vermiedener Tonne, wenn man die gesamten 1,882 Billionen vollständig dieser Emissionsdifferenz zurechnen würde. Das ist keine belastbare tatsächliche Vermeidungskostenkennzahl, weil Zeitraum, Zieljahr, Baseline, Sektorkopplung und Nicht-Klima-Nutzen nicht deckungsgleich sind. Die Zahl ist dennoch hilfreich, um die notwendige Größenordnung des Endnutzens zu verstehen: Eine Intervention mit dreistelligen realen Zusatzkosten je global vermiedener Tonne benötigt entsprechend erhebliche nachgewiesene Endpunkt Vorteile, wenn sie allein über Klimanutzen gerechtfertigt werden soll.

59. Nutzen-Risiko-Rechnung ohne pauschalen CO₂-Preis

Die Gesamtentscheidung kann nun formal geschrieben werden, ohne einen Social Cost of Carbon vorzusetzen. Für jede Maßnahme m gilt: $\text{Nettofolgen}(m) = \text{Summe der kausal vermiedenen negativen Endpunkte} + \text{Summe der kausal erzeugten positiven Zusatznutzen} - \text{Summe der verlorenen positiven CO}_2\text{-/Wärmewirkungen} - \text{reale Zusatzkosten} - \text{sonstige Nebenwirkungen}$. Jeder Summand muss in seiner natürlichen Einheit dokumentiert werden. Erst wenn Einheiten verglichen werden sollen, ist eine zweite Bewertungsstufe notwendig, etwa über Zahlungsbereitschaften, Lebensjahre, Produktionsmengen oder andere gesellschaftliche Bewertungsmaßstäbe.

Diese zweistufige Methodik ist der medizinischen Nutzen-Risiko-Abwägung näher als eine pauschale CO₂-Steuerlogik. Bei einer Impfung würde man auch nicht sagen, eine vermiedene Infektion sei pauschal 500

Euro wert und damit sei jede Impfstrategie gerechtfertigt. Man untersucht Erkrankungen, schwere Verläufe, Todesfälle, Nebenwirkungen, Exposition, absolute Risikoreduktion und Alternativen. Entsprechend werden hier Temperatur, Extremereignisse, Mortalität, Ernte, Ozean, Produktivität und wirtschaftliche Schäden getrennt betrachtet. Die Monetarisierung ist eine spätere gesellschaftliche Entscheidung, nicht der naturwissenschaftliche Beweis.

60. Ambitionsniveau: drei praktisch rechenbare Stufen

Um das Ambitionsniveau zu prüfen, werden drei stilisierte Pfade gegenüber einem konstanten Emissionsgegenfaktum von 573,5 Mio. t CO₂ jährlich verglichen. Pfad A halbiert die heutigen CO₂-Emissionen linear bis 2045, Pfad B reduziert sie linear auf null bis 2045, Pfad C erreicht null bereits 2040. Die Pfade sind keine politischen Prognosen, sondern reine Dosisstufen. Dadurch lässt sich zeigen, wie zusätzliche Ambition in zusätzliche kumulierte Vermeidung und Temperaturwirkung übersetzt wird, bevor Kosten hinzukommen.

Ambitionspfad	kumuliert vermieden vs. konstant	ΔT zentral	ΔT wahrscheinlich	Extremniederschlagsskala
A: Halbierung bis 2045	2.868 Gt	0.001290 °C	0.000774–0.001807 °C	0.0090 %
B: Null bis 2045	5.735 Gt	0.002581 °C	0.001548–0.003613 °C	0.0181 %
C: Null bis 2040	7.169 Gt	0.003226 °C	0.001936–0.004516 °C	0.0226 %

Die Grenzwirkung von Pfad B gegenüber Pfad A beträgt nur die zusätzliche Hälfte des Reduktionspfads; Pfad C gewinnt gegenüber Pfad B weitere fünf Jahre schnellerer Vermeidung. Damit wird sichtbar, warum die letzten Prozentpunkte eines nationalen Netto-null-Ziels gesondert geprüft werden müssen. Je teurer die letzten nationalen Tonnen werden, desto wichtiger wird der Vergleich mit günstigerer ausländischer Vermeidung, Senken, technologischer Forschung oder Anpassung. Ein gesetzliches Nullziel ist noch kein Beweis dafür, dass jede letzte nationale Tonne die effizienteste Risikoreduktion darstellt.

61. Was ist nach der Vollrechnung positiv, negativ oder offen?

Mehrere Punkte können nach der Vollrechnung mit relativ hoher Sicherheit festgehalten werden. Erstens besitzt zusätzliches CO₂ eine direkt messbare Strahlungswirkung, und kumulierte CO₂-Emissionen sind mit globaler Erwärmung annähernd proportional. Zweitens sind Sonne und Ozean für Klima und Variabilität zentral, aber die beobachteten modernen Trends liefern keine einfache alternative Erklärung, die die CO₂-Wirkung auf null setzt. Drittens besitzt CO₂ reale positive biologische Wirkungen, insbesondere Photosynthese, Wassernutzungseffizienz und einen wesentlichen Beitrag zur beobachteten globalen Begrünung. Viertens sind viele gesellschaftliche Endpunkte Nettoeffekte aus positiven und negativen Teilwirkungen und können nicht aus 'mehr CO₂ = Schaden' oder 'mehr CO₂ = Pflanzennahrung' allein abgeleitet werden.

Für Deutschland ist der direkte klimatische Hebel des Restpfads klein: Unter dem bewusst großzügigen konstanten Gegenfaktum liegt die zentrale vermiedene Erwärmung bis zur linearen Nullstellung 2045 bei rund 0,0026 °C. Daraus folgen in linearen globalen Hazard-Beziehungen sehr kleine prozentuale Änderungen. Große behauptete Wohlfahrtsnutzen entstehen erst, wenn diese kleinen Klimaänderungen über große Weltbevölkerungen, lange Zeiträume oder große Vermögensbestände aggregiert und mit Schadenfunktionen verknüpft werden. Solche Aggregationen können sachlich gerechtfertigt sein, sind aber nicht mehr reine Physik und müssen ihre Annahmen offenlegen.

Offen bleibt deshalb nicht, ob eine vermiedene Tonne überhaupt irgendeinen physikalischen Effekt besitzt. Offen und entscheidend ist vielmehr die Größe ihres Nettoendnutzens unter realistischen Anpassungs-, Technologie-, Demografie- und Wirtschaftsbedingungen. Besonders groß ist die Unsicherheit bei Mortalität,

gesamtwirtschaftlichen Schäden, langfristigem Meeresspiegel und regionalen Extremereignissen. Gerade dort darf die Politik nicht eine einzelne Modellzahl als unumstößliche Tatsache behandeln. Die rationale Antwort ist Sensitivität: Maßnahmen, die selbst bei niedrigen Klimaschadensannahmen durch Luftqualität, Energieeffizienz oder Importreduktion sinnvoll bleiben, sind robuster als Maßnahmen, deren Rechtfertigung nur bei sehr hohen, weit in die Zukunft extrapolierten Schadensfunktionen trägt.

62. Gesamturteil zum deutschen Ambitionsniveau

Die Vollrechnung rechtfertigt weder die pauschale Aussage, deutsche Klimapolitik sei wegen des kleinen nationalen Anteils wirkungslos, noch die pauschale Aussage, jede zusätzliche nationale Emissionsminderung sei unabhängig von ihren Kosten gesellschaftlich geboten. Der isolierte direkte deutsche Temperaturhebel ist quantitativ klein. Daraus folgt, dass sehr teure nationale Maßnahmen besonders stark auf internationale Hebel, technologische Spillover oder nationale Zusatznutzen angewiesen sind. Eine Tonne, die in Deutschland für 1.000 Euro vermieden wird, ist physikalisch nicht wertvoller als eine global zusätzlich vermiedene Tonne für 50 Euro. Umgekehrt kann eine teurere Maßnahme sinnvoll sein, wenn sie zusätzlich Luftschadstoffe reduziert, Importabhängigkeit senkt, Infrastruktur erneuert oder globale Lernkurven auslöst.

Der entscheidende Prüfmaßstab für 2030–2045 lautet damit nicht 'Wie viel fehlt zum gesetzlichen Ziel?', sondern: Wie groß ist die globale Additionalität der nächsten Maßnahme, welche konkrete Endpunktänderung erzeugt sie nach der bestverfügbaren Evidenz, welche positiven CO₂- beziehungsweise Erwärmungswirkungen gehen dadurch verloren, welche realen Zusatzkosten entstehen, welche Nebenwirkungen treten auf und welche Alternative erreicht denselben globalen Endpunkt günstiger? Erst wenn diese Fragen beantwortet sind, besitzt das Ambitionsniveau eine belastbare Nutzen-Risiko-Begründung.

TEIL XI – Die eigentliche Gesamtfolgenrechnung: Aufwand gegen nachweisbaren Nutzen

63. Gesamtfolgenrechnung: Aufwand gegen nachweisbaren Nutzen

Die Gesamtfolgenrechnung führt die zuvor getrennt geprüften Ebenen zusammen. Festgestellt werden erstens die tatsächlich beobachtbaren Größen – Emissionen, Ausgaben, Investitionen, Energieerzeugung und Preise. Zweitens werden kausal zuzurechnende Minderungen nur dort angesetzt, wo ein Gegenfaktum oder eine belastbare Evaluationslogik vorliegt. Drittens werden Temperatur- und Schadenswirkungen als Modell- beziehungsweise Szenarioergebnisse gekennzeichnet. Auf dieser Grundlage wird der messbare Aufwand dem nur teilweise messbaren und im Übrigen modellabhängigen Nutzen gegenübergestellt.

Die Rechnung erfolgt in drei Ebenen. Erstens wird die physische Wirkung in natürlichen Einheiten ausgewiesen: zusätzlich global vermiedene Tonnen, daraus abgeleitete Temperaturwirkung und – soweit belastbar – Änderung einzelner Endpunkte. Zweitens wird der gesellschaftliche Aufwand bestimmt. Dabei wird streng zwischen Transferzahlungen, Bruttoinvestitionen und realen volkswirtschaftlichen Zusatzkosten unterschieden. Drittens werden Nutzen und Belastungen zusammengeführt. Wo eine vollständige Monetarisierung nicht möglich ist, wird nicht ersatzweise ein politisch gesetzter CO₂-Preis eingesetzt. Stattdessen wird offengelegt, welcher physische Nutzen gesichert, welcher modelliert und welcher bislang nicht belastbar in Geld übersetzbar ist.

Diese Trennung verhindert zwei Fehlschlüsse. Eine politisch erzielte Emissionsminderung kann real sein, ohne dass damit bereits ein bestimmter gesellschaftlicher Endnutzen bewiesen wäre. Umgekehrt kann eine Maßnahme trotz kleiner direkter Klimawirkung sinnvoll sein, wenn lokale Zusatznutzen wie Luftreinhaltung, geringere Brennstoffimporte oder technische Lernkurven den Aufwand tragen. Das Ergebnis wird deshalb nicht aus einem vorgegebenen CO₂-Preis abgeleitet, sondern aus einer nachvollziehbaren Kette von Messwerten, Gegenfaktum, Modellannahmen und Sensitivitäten.

64. Die Nutzenhierarchie: Was zählt überhaupt als Erfolg?

Der primäre Klimanutzen einer deutschen Maßnahme ist nicht die Zahl installierter Anlagen, nicht der Anteil erneuerbarer Energien und auch nicht die territoriale Emissionsminderung. Der primäre physische Endpunkt ist die tatsächlich zusätzlich global vermiedene Emissionsmenge. Erst diese Menge beeinflusst den kumulativen Kohlenstoffbestand und damit die globale Temperatur. Wird eine Tonne lediglich aus Deutschland in das Ausland verlagert, ist der nationale Zielindikator besser, der Klimanutzen aber nicht entstanden. Wird eine Tonne global vermieden, ist der Klimanutzen physikalisch derselbe, unabhängig davon, ob die Vermeidung in Deutschland, Polen, Indien oder China stattfindet.

Für die Nutzenbilanz werden vier Stufen getrennt. Stufe A ist die global vermiedene Emissionsmenge. Stufe B ist die daraus folgende physische Klimaänderung. Stufe C umfasst konkrete Endpunkte wie Hitze, Starkniederschlag, Meeresspiegel, Erträge, Mortalität, Ozeanchemie und Arbeitsproduktivität. Stufe D umfasst lokale Zusatznutzen, die auch ohne globale Klimawirkung auftreten können – etwa weniger Luftschadstoffe oder geringere Abhängigkeit von fossilen Importen. Erst die Summe dieser Stufen ist der gesellschaftliche Nutzen. Ein staatlicher Eurobetrag pro Tonne ist daher höchstens eine Zusammenfassung einer solchen Kette, nicht deren Ersatz.

Stufe	Messgröße	Status
A	global zusätzlich vermiedene t CO ₂ /CO ₂ -Äq.	zentraler physischer Interventionseffekt
B	Δ globale Mitteltemperatur nach TCRE	ableitbar für kumulatives CO ₂
C	Endpunkte: Hitze, Niederschlag, Meeresspiegel, Agrar, Gesundheit, Ozean	teils quantifizierbar, teils modellabhängig
D	lokale Co-Benefits: Luft, Importe, Resilienz, Innovation	instrumentenspezifisch
Netto	Nutzen A–D minus reale Zusatzkosten und Nebenwirkungen	entscheidender Wohlfahrtsendpunkt

65. Historisch greifbarer Klimanutzen: die durch erneuerbare Energien vermiedenen Emissionen

Für eine erste historische Wirkungsbilanz gibt es einen ungewöhnlich brauchbaren amtlichen Datensatz. Das Umweltbundesamt bilanziert jährlich, welche Treibhausgasemissionen durch erneuerbare Energien gegenüber der jeweils verdrängten fossilen Bereitstellung vermieden wurden. Die Bilanz berücksichtigt nach eigener Methodik weitgehend Vorketten sowie Emissionen aus Herstellung und Betrieb der Anlagen. Für 2025 weist das UBA 265 Mio. t CO₂-Äquivalente aus, davon 207 Mio. t im Stromsektor, 43 Mio. t im Wärmesektor und 15 Mio. t im Verkehr. Für 2024 waren es rund 256 Mio. t, für 2020 etwa 232 Mio. t, 2015 rund 169 Mio. t, 2010 rund 113 Mio. t, 2005 rund 81 Mio. t und 2000 ungefähr 47 Mio. t. [R01][R02]

Interpoliert man zwischen diesen amtlichen Stützpunkten linear, ergibt sich für 2000 bis 2025 eine kumulierte Größenordnung von rund 3,749 Gigatonnen vermiedener CO₂-Äquivalente durch die Nutzung erneuerbarer Energien. Davon entfallen nach derselben Näherung ungefähr 2,824 Gigatonnen auf den Stromsektor. Diese Zahl ist kein Nachweis dafür, dass jede vermiedene Tonne durch eine einzelne konkrete Subvention kausal zusätzlich erzeugt wurde. Sie ist aber erheblich belastbarer als eine bloße Gegenüberstellung nationaler Gesamtemissionen, weil sie den verdrängten fossilen Energieträger ausdrücklich berücksichtigt.

Jahr	vermiedene THG gesamt (Mt CO ₂ -Äq.)	davon Strom (Mt)
2000	47	34
2005	81	56
2010	113	74
2015	169	129
2020	232	184
2024	256	205
2025	265	207

Diese historische UBA-Bilanz ist deshalb für die Nutzen-Risiko-Analyse besonders wertvoll: Sie liefert eine physische Leistung des erneuerbaren Systems, bevor eine monetäre Bewertung vorgenommen wird. Die 3,75 Gt sind nicht „Wohlstand“, sondern eine kumulierte Differenz an Emissionen gegenüber fossiler Bereitstellung. Erst im nächsten Schritt wird berechnet, wie groß der daraus folgende Klimaeffekt ist.

66. Was haben diese rund 3,75 Gigatonnen klimatisch bewirkt?

Wendet man auf die kumulierten rund 3,749 Gt CO₂-Äquivalente rein größenordnungsmäßig die zentrale TCRE von 0,45 °C je 1.000 Gt CO₂ an, ergibt sich eine vermiedene globale Erwärmung von ungefähr 0,001687 °C. Der wahrscheinliche TCRE-Bereich entspräche rund 0,001012 bis 0,002362 °C. Diese Umrechnung ist nicht exakt, weil der UBA-Datensatz CO₂-Äquivalente verschiedener Gase umfasst, während die TCRE unmittelbar für kumulatives CO₂ gilt. Als Größenordnungsrechnung zeigt sie jedoch, in welcher Dimension sich der historische direkte Klimaeffekt bewegt: im Bereich von wenigen Tausendstel Grad, nicht von Zehntelgraden.

Für die erneuerbare Stromerzeugung allein ergibt die gleiche Rechnung aus rund 2,82 Gt kumulierter Vermeidung etwa 0,00127 °C. Damit ist die zentrale Erkenntnis nicht, dass der Effekt „null“ sei. Er ist physikalisch additiv und real. Die Erkenntnis ist vielmehr, dass ein einzelnes Land selbst nach einem Vierteljahrhundert massiven Umbaus nur einen kleinen Anteil an der globalen Temperaturkurve verändert. Der politische Nutzen einer Vorreiterstrategie muss daher zusätzlich entweder aus globaler Nachahmung, Technologiediffusion oder lokalen Zusatznutzen stammen, wenn er im Verhältnis zu sehr hohen nationalen Kosten groß werden soll.

Bezugsgröße	kumulierte Vermeidung	zentrale TCRE-Wirkung
Erneuerbare gesamt 2000–2025	3,749 Gt CO ₂ -Äq.	0,001687 °C
Erneuerbarer Strom 2000–2025	2,824 Gt CO ₂ -Äq.	0,001271 °C
Deutscher Referenzpfad 2026–2045	5,735 Gt CO ₂	0,002581 °C

67. Historischer Aufwand I: EEG – die größte klar bezifferbare Langfristintervention

Die EEG-Förderung ist der am besten dokumentierte langfristige Finanzstrom der deutschen Energiewende. Die Wissenschaftlichen Dienste des Bundestages weisen für die Jahre 2000 bis 2021 Einzahlungen über die EEG-Umlage von insgesamt 200,51 Mrd. Euro aus. Diese Zahl ist zunächst ein Finanzierungsstrom, kein identischer volkswirtschaftlicher Verlust. Sie zeigt aber, welche Größenordnung Verbraucher beziehungsweise später Steuerzahler aufgebracht haben, um die Differenz zwischen Marktwert und zugesagter Förderung erneuerbarer Stromerzeugung zu finanzieren. [R03]

Für denselben Zeitraum lässt sich aus den UBA-Stützpunkten eine kumulierte Vermeidung im Stromsektor von grob 2,027 Gt CO₂-Äquivalenten rekonstruieren. Teilt man allein den EEG-Umlagefluss von 200,51 Mrd. Euro durch diese physische Vermeidung, erhält man ungefähr 99 Euro Förderstrom je vermiedener Tonne. Diese Zahl ist ausdrücklich kein Nettowohlfahrtsverlust pro Tonne, weil die Zahlungen Einkommen bei Anlagenbetreibern erzeugten und Stromanlagen als Vermögenswerte entstanden. Sie ist jedoch eine transparente erste Aufwandseffizienz: Wie viele Euro politisch organisierter Förderstrom standen einer bilanziell vermiedenen Tonne gegenüber? Eine breiter gefasste RWI-Betrachtung beziffert die Belastung der Stromverbraucher durch den Ausbau erneuerbarer Stromerzeugung seit Einführung des EEG bereits auf knapp 300 Mrd. Euro. Setzt man diese Größenordnung gegen dieselbe kumulierte Vermeidung bis 2021, ergibt sich grob 148 Euro je vermiedener Tonne. Auch dies bleibt eine Bruttogröße. Die Spannweite von rund 100 bis 150 Euro je bilanziell vermiedener Tonne ist aber als historische Größenordnung wesentlich belastbarer als eine frei gewählte hypothetische Zahl. [R04]

Rechnung	Aufwand	Vermeidung 2000–2021	Quotient
EEG-Umlagefluss	200,51 Mrd. €	2,027 Gt	99 €/t
RWI breitere Verbraucherbelastung	≈300 Mrd. €	2,027 Gt	148 €/t

68. Historischer Aufwand II: Systemkosten, Netze und Redispatch

Erneuerbare Stromerzeugung kann nicht sinnvoll nur mit der EEG-Förderung bewertet werden. Ein Stromsystem mit hohen Anteilen wetterabhängiger Erzeugung benötigt zusätzliche Transportkapazität, Flexibilität, Regelenergie, Speicher, Reserve und Engpassmanagement. Der Bundesrechnungshof beziffert die bis 2045 erforderlichen Investitionen in die Stromnetze auf mehr als 460 Mrd. Euro und kritisiert ausdrücklich, dass diese Systemkosten in vereinfachten Darstellungen der Energiewende nicht vollständig sichtbar würden. [R05]

Auch laufende Engpasskosten sind inzwischen erheblich. Die Bundesnetzagentur bezifferte für 2023 die Gesamtkosten des Netzengpassmanagements – Redispatch, Netzreserve und Countertrading – vorläufig auf rund 3,2 Mrd. Euro bei einem Maßnahmenvolumen von etwa 34,3 TWh. Diese Kosten sind nicht vollständig „Kosten der erneuerbaren Energien“; Engpässe entstehen auch aus historischer Netzstruktur, Kraftwerksstandorten und grenzüberschreitendem Handel. Gleichwohl sind sie reale Systemkosten, die bei der Bewertung eines Transformationspfads berücksichtigt werden müssen. [R06]

Für eine belastbare Nettorechnung darf die 460-Mrd.-Summe nicht vollständig als Klimakosten verbucht werden, weil Netze langlebige produktive Infrastruktur darstellen und auch ohne Klimapolitik Ersatz- und Modernisierungsinvestitionen nötig wären. Die richtige Größe ist die Differenz zwischen dem gewählten Transformationsnetz und einem realistischen Alternativsystem. Solange diese Differenz nicht öffentlich konsolidiert ausgewiesen wird, bleibt jede nationale Gesamtkostenzahl unvollständig. Genau deshalb führt die Evaluation Systeminvestitionen als eigene Belastungskategorie und nicht als verdeckten Nullposten.

69. Gebäude: konkrete Förderwirkung statt bloßer Fördersumme

Für die Bundesförderung effiziente Gebäude liegt erstmals eine relativ direkte Verbindung zwischen Förderjahr und physischem Klimawirkungsziel vor. Die Evaluation des Förderjahrs 2024 weist rund 2,6 Mio. t CO₂-Äquivalente Einsparung aus, davon etwa 2,4 Mio. t durch Einzelmaßnahmen. Für 2024 standen nach Angaben des Bundes rund 11 Mrd. Euro Fördermittel zur Verfügung. Für 2025 wurden rund 12 Mrd. Euro tatsächlich ausgegeben und 9,3 Mrd. Euro neue Fördermittel zugesagt. [R07][R08]

Die 2,6 Mio. t sind eine jährliche Einsparwirkung der geförderten Maßnahmen und dürfen deshalb nicht direkt durch 11 Mrd. Euro geteilt werden, als wäre der Effekt nach einem Jahr beendet. Die Anlagen wirken über viele Jahre. Unter einer vereinfachten Lebensdauersensitivität von 15, 20, 25 und 30 Jahren entsprechen 2,6 Mio. t jährlicher Einsparung kumulativ 39, 52, 65 beziehungsweise 78 Mio. t. Wird die Größenordnung von 11 Mrd. Euro Fördermitteln des Jahres 2024 dagegen gehalten, ergibt sich ein Brutto-Förderquotient von rund 282, 212, 169 beziehungsweise 141 Euro je über die Lebensdauer vermiedener Tonne. Diese Rechnung überschätzt die gesellschaftlichen Nettokosten, wenn ein Teil der Investitionen ohnehin wirtschaftlich gewesen wäre, unterschätzt sie aber, wenn zusätzlich hohe private Mehrkosten ausschließlich durch Förderanforderungen ausgelöst wurden.

angenommene Wirkungsdauer	kumulierte Einsparung	11 Mrd. € / kumulierte Einsparung
15 Jahre	39 Mt	282 €/t
20 Jahre	52 Mt	212 €/t
25 Jahre	65 Mt	169 €/t
30 Jahre	78 Mt	141 €/t

Diese Rechnung macht den Unterschied zwischen „viel Geld“ und „hohen Kosten je Tonne“ sichtbar. Sie zeigt zugleich, warum die genaue Additionalität wichtig ist. Wenn beispielsweise die Hälfte der geförderten

Sanierungen ohnehin erfolgt wäre, verdoppeln sich die Förderkosten je zusätzlich vermiedener Tonne. Genau diese Mitnahmeeffekte sind für eine echte Folgenabschätzung entscheidend und müssen in der nächsten Evaluationsgeneration der BEG zwingend separat berichtet werden.

70. Elektromobilität: 10 Milliarden Euro Umweltbonus – welcher zusätzliche Klimaeffekt?

Der Umweltbonus ist eine weitere klar bezifferbare Intervention. Das Bundeswirtschaftsministerium bezifferte die seit 2016 ausgezahlten Mittel bis zum Förderende im Dezember 2023 auf rund 10 Mrd. Euro für etwa 2,1 Mio. Elektrofahrzeuge. Damit wurden im Mittel knapp 4.760 Euro staatliche Förderung je geförderten Fahrzeug ausgezahlt. [R09]

Für die Klimawirkung ist nicht die Zahl der Fahrzeuge entscheidend, sondern die Differenz der Lebenszyklusemissionen gegenüber dem tatsächlich verdrängten Fahrzeug. Das Umweltbundesamt kommt in seiner Lebenszyklusanalyse zu dem Ergebnis, dass ein 2020 zugelassenes Elektro-Pkw über den Lebensweg gegenüber einem konventionellen Pkw etwa 40 % Klimavorteil besitzt; bei Zulassung 2030 können es bei schnellem Ausbau erneuerbarer Energien bis etwa 55 % sein. Der absolute Tonnenwert hängt jedoch von Fahrzeugklasse, Kilometerleistung, Batteriegröße, Strommix und Alternativfahrzeug ab. [R10]

Deshalb wird hier eine transparente Sensitivitätsrechnung vorgenommen statt ein einziger Wert behauptet. Beträgt der zusätzliche Lebenszyklusvorteil eines geförderten Fahrzeugs 10, 15, 20, 25 oder 30 t CO₂-Äquivalente, dann entsprechen 2,1 Mio. Fahrzeuge 21, 31,5, 42, 52,5 beziehungsweise 63 Mio. t kumulierter Vermeidung. Die 10 Mrd. Euro Umweltbonus entsprechen dann rund 476, 317, 238, 190 beziehungsweise 159 Euro staatlicher Förderung je vermiedener Tonne. Diese Werte sind noch keine Nettowohlfahrtskosten, weil Käufer Nutzwert erhalten und Herstelleranteile teilweise zusätzlich wirkten. Sie zeigen aber, dass die Klimakosteneffizienz der Kaufprämie ganz wesentlich davon abhängt, wie viele zusätzliche Käufe sie tatsächlich ausgelöst hat. Ohne Additionalität kann dieselbe Förderung sehr teuer werden.

Lebenszyklusvorteil je geförderten Fahrzeug	Gesamtvermeidung bei 2,1 Mio. Fahrzeugen	10 Mrd. € / t
10 t	21 Mt	476 €/t
15 t	31,5 Mt	317 €/t
20 t	42 Mt	238 €/t
25 t	52,5 Mt	190 €/t
30 t	63 Mt	159 €/t

71. EU-ETS und CO₂-Bepreisung: warum Einnahmen nicht mit Kosten verwechselt werden dürfen

Beim Emissionshandel ist eine andere Rechnungslogik erforderlich. Zertifikatserlöse sind zunächst Transfers: Unternehmen zahlen an den Staat beziehungsweise an andere Marktteilnehmer, während der Staat Einnahmen erhält. Der volkswirtschaftliche Aufwand liegt in den realen Anpassungs- und Vermeidungskosten, Verwaltungsaufwand, möglichen Produktionsverlagerungen und den Verzerrungen, nicht in der Bruttozahlung selbst. Gleichzeitig besitzt der Emissionshandel einen Vorteil gegenüber kleinteiligen Technologieauflagen: Ein einheitlicher Preis lässt Vermeidung dort stattfinden, wo sie kurzfristig am günstigsten ist.

Für die Bewertung Deutschlands ist deshalb nicht sinnvoll, die deutschen Auktionserlöse als Klimakosten zu verbuchen und sie durch Tonnen zu teilen. Sinnvoll ist die Grenzfrage: Welche zusätzlichen globalen Emissionen wurden durch den Preis vermieden und welche realen Ressourcen mussten dafür zusätzlich eingesetzt werden? Der europäische Charakter des Systems ist dabei zentral. Die Klimawirkung einer in

Deutschland stillgelegten ETS-Anlage hängt auch davon ab, ob die Zertifikatsmenge insgesamt sinkt oder andere Anlagen dieselben Zertifikate verwenden. Durch die Marktstabilitätsreserve und die sinkende Cap ist die Wirkung heute anders als in frühen Handelsperioden.

Für die Gesamtfolgenrechnung wird der EU-ETS deshalb als vergleichsweise marktnahes Instrument eingestuft, dessen historische Wirkung nicht seriös auf Deutschland allein zerlegt werden kann. Die relevante Vergleichsfrage lautet vielmehr, ob zusätzliche deutsche Sonderinstrumente in ETS-Sektoren eine weitere globale Tonne günstiger vermeiden als eine entsprechende Verschärfung des europäischen Caps. Wo nationale Vorgaben lediglich Vermeidung innerhalb eines ohnehin bindenden EU-Caps verschieben, kann ihr zusätzlicher Klimanutzen klein sein, obwohl nationale Emissionen sinken.

72. Kohleausstieg: Klimanutzen, Entschädigung und Stromsystem-Gegenfaktum

Der Kohleausstieg ist physikalisch klarer als viele Förderprogramme: Wird kohlebefeuerte Stromerzeugung tatsächlich durch emissionsärmere Erzeugung ersetzt, sinken CO₂-Emissionen erheblich. Die ökonomische Bilanz ist jedoch komplexer. Neben möglichen Entschädigungen entstehen Ersatzinvestitionen, Netz- und Systemkosten, gleichzeitig sinken Brennstoff- und Luftschadstoffbelastungen. Entscheidend ist das verdrängte Gegenfaktum: ersetzt Wind und Solar tatsächlich Braunkohle, ist die vermiedene Tonne groß; wird stillgelegte Kernenergie parallel durch Kohle oder Gas ersetzt, fällt die Nettobilanz deutlich ungünstiger aus.

Die deutsche Ausstiegsentscheidung darf deshalb nicht isoliert als „Kohle gegen Erneuerbare“ bewertet werden. Die reale Stromsystemfolge hängt von allen gleichzeitig stattfindenden Entscheidungen ab. Gerade die Kombination aus Kernenergieausstieg, Kohleausstieg, starkem Erneuerbaren-Ausbau und zunehmender Gas- beziehungsweise Importabhängigkeit erzeugt eine andere Kosten- und Emissionskurve als jede Maßnahme allein. Für die Folgenabschätzung ist daher der Systemvergleich entscheidend: Welche Emissionen, Kosten und Versorgungseigenschaften hätte ein Pfad mit längerer Kernenergienutzung, schnellerem Kohleausstieg und geringerem fossilen Backup gehabt?

73. Kernenergie als entscheidendes Gegenfaktum

Die Kernenergie ist für eine Nutzen-Risiko-Rechnung deshalb unvermeidlich, weil sie im Betrieb sehr geringe Treibhausgasemissionen besitzt und gleichzeitig regelbare beziehungsweise grundlastfähige Leistung bereitstellt. Wer den historischen deutschen Strompfad bewertet, muss daher nicht nur fragen, wie viel erneuerbarer Strom fossile Erzeugung verdrängt hat, sondern auch, welche emissionsarme Erzeugung politisch parallel aus dem System genommen wurde. Andernfalls wird der Klimanutzen des Erneuerbaren-Ausbaus überschätzt, wenn ein Teil seiner Produktion zunächst lediglich den Wegfall einer ebenfalls CO₂-armen Technologie kompensiert.

Für eine belastbare Gegenrechnung wären die tatsächlichen Jahresproduktionen der abgeschalteten Reaktoren, ihre technisch plausiblen Restlaufzeiten, notwendige Nachrüstkosten und das jeweils verdrängte Grenzkraftwerk zu modellieren. Bereits ohne eine strittige Gesamtschätzung lässt sich die Logik eindeutig formulieren: Jede zusätzliche TWh emissionsarmer Kernenergie, die andernfalls durch Kohle oder Gas erzeugt worden wäre, hätte ebenfalls Emissionen vermieden. Der relevante Vergleich ist deshalb nicht „Kernenergie oder Wind“, sondern „welche Kombination aus emissionsarmen Quellen hätte dieselbe Versorgung zu geringsten Systemkosten und geringsten Gesamtemissionen ermöglicht?“

Diese Gegenfaktualität ist für die Schlussbewertung wichtig, weil sie zeigt, dass ein Teil der deutschen Klimakosten nicht aus dem Ziel der Emissionsminderung an sich folgt, sondern aus der politischen Auswahl bestimmter Technologien. Eine technologieoffene Klimapolitik kann bei identischem Emissionsziel eine andere Kostenkurve erzeugen als ein Pfad, der bestimmte emissionsarme Optionen ausschließt.

74. Wasserstoff und Industrie: die Kosten der letzten Tonnen

Je näher Deutschland dem Ziel Netto Null kommt, desto größer wird der Anteil schwer vermeidbarer Emissionen. Stahl, Chemie, Zement, Hochtemperaturprozesse, Luftfahrt und bestimmte Grundstoffproduktionen benötigen entweder neue Prozessrouten, Wasserstoff, CO₂-Abscheidung, synthetische Energieträger oder dauerhafte Senken. Die Grenzkosten dieser letzten Tonnen können weit über den Kosten früherer Stromsektorreduktionen liegen.

Das ist kein Argument, diese Sektoren von jeder Reduktion auszunehmen. Es verändert aber die optimale Reihenfolge. Wenn eine zusätzliche Milliarde Euro in einer deutschen Industrieanlage nur wenige hunderttausend Tonnen vermeidet, während dieselbe Summe andernorts Millionen Tonnen glaubwürdig und dauerhaft vermeiden könnte, muss die nationale teure Option mit zusätzlichen Vorteilen begründet werden: Technologieentwicklung, Versorgungssicherheit, industrielle Lernkurven oder strategische Unabhängigkeit. Ohne solche Zusatznutzen ist die physikalische Klimawirkung pro Euro bei der günstigeren globalen Tonne höher.

Für die künftige Ambitionspolitik ist daher eine explizite Grenzvermeidungskostenkurve erforderlich. Die letzten 5 oder 10 Prozent dürfen nicht mit dem Durchschnittspreis der ersten 50 Prozent bewertet werden. Genau wie in einer medizinischen Prävention kann eine Maßnahme bei Hochrisikogruppen sinnvoll sein, bei Niedrigrisikogruppen aber ein ungünstiges Nutzen-Risiko-Verhältnis besitzen. Klimapolitisch bedeutet dies: dieselbe Tonne hat denselben physikalischen Nutzen, aber die Kosten ihrer Vermeidung können sich um Größenordnungen unterscheiden.

75. Der physische Nutzen des deutschen Restpfads bis 2045 – vollständig zusammengeführt

Der in den oberen Teilen definierte Referenzpfad – heutige CO₂-Emissionen von 573,5 Mio. t pro Jahr versus linearer Rückgang auf null bis 2045 – vermeidet gegenüber einem konstanten Gegenfaktum rund 5,735 Gt CO₂. Zentral entspricht dies 0,002581 °C vermiedener globaler Erwärmung. Das ist die physische Dosis, auf die sämtliche Nutzenbehauptungen des zusätzlichen deutschen Ambitionsniveaus zurückgeführt werden müssen.

Für extreme tägliche Niederschläge verwendet der IPCC global eine Größenordnung von ungefähr 7 % Intensitätszunahme je Grad. Die deutsche Referenzwirkung entspricht damit etwa 0,0181 % vermiedener Intensitätszunahme. Für ein früheres 10-Jahres-Hitzeereignis ergibt die lokale IPCC-Skalierung aus den 1,5- und 2-°C-Punkten eine Veränderung von rund 0,0077 Häufigkeitseinheiten, also etwa 0,19 % relativ zum 1,5-°C-Niveau. Für den sehr langfristigen Meeresspiegel lässt eine grobe Interpolation der breiten IPCC-Langzeitbereiche eine Größenordnung von rund 7,7 mm weniger langfristig gebundenem Anstieg erkennen. Keine dieser Größen wäre in einem einzelnen Jahr beobachtbar; zusammen definieren sie aber die Größenordnung des isolierten deutschen Direktbeitrags.

Endpunkt	deutsche Referenzwirkung 2026–2045	Evidenzcharakter
Globale Mitteltemperatur	0,002581 °C zentral	TCRE-basiert
Extremniederschlagsintensität	≈ 0,0181 %	globale Skalierung, regional heterogen
10-Jahres-Hitzeextrem	≈ 0,19 % relative Änderung der IPCC-Häufigkeitskennzahl	lokale Linearisation
Langfristiger Meeresspiegel	≈ 7,7 mm Größenordnung	sehr langfristig, hohe Unsicherheit
Atmosphärische CO ₂ -Konzentration	≈ 0,32 ppm in vereinfachter 44-%-Momentaufnahme	keine dauerhafte Pulsantwort

76. Gesundheit: wie groß kann der Nettoeffekt tatsächlich sein?

Gesundheit ist der wichtigste Endpunkt, bei dem eine reine Hitzezählung irreführend wäre. Sowohl extreme Hitze als auch Kälte erhöhen die Mortalität. Der gegenwärtige globale temperaturbezogene Krankheitsanteil ist in vielen Datensätzen stärker durch Kälte als durch Hitze geprägt, während weitere Erwärmung den Hitzeteil erhöht und den Kälteteil regional verringert. Die Nettoantwort hängt deshalb stark von Klima, Einkommen, Gebäuden, Klimatisierung, Alter und Anpassung ab.

Eine publizierte Multi-Country-Attribution ordnete im Zeitraum 1991–2018 im Mittel etwa 2,2 warm-season Hitzetodesfälle je 100.000 Einwohner dem anthropogenen Klimawandel zu. Teilt man diese beobachtete Größenordnung heuristisch durch etwa 1,1 °C Erwärmung und skaliert rein linear mit 0,00258 °C, ergibt sich nur eine sehr kleine jährliche Änderung je 100.000 Einwohner. Eine weltweite Hochrechnung ist methodisch nicht belastbar, weil die untersuchten Standorte die Welt nicht repräsentieren und Kälte fehlt. Sie zeigt aber, dass der isolierte direkte deutsche Beitrag zur jährlichen Temperaturmortalität klein ist, solange keine globale Multiplikation über sehr große Bevölkerungen und Jahrzehnte erfolgt.

Integrierte Modelle wie Bresslers Mortality Cost of Carbon liefern wesentlich höhere kumulierte Zahlen, weil sie eine Tonne über viele Jahrzehnte, Regionen und zukünftige Bevölkerungen verfolgen. Genau hier wird sichtbar, warum ein hoher Nutzenwert nicht aus der TCRE allein folgt. Er entsteht durch Demografie, Zukunftsszenario, Anpassungsannahmen, regionale Temperaturfunktionen und die ethische Gewichtung zukünftiger Leben. Für die Gesamtfolgenrechnung wird der Gesundheitsnutzen deshalb als realer, aber stark modellabhängiger Langzeiteffekt geführt und nicht als unmittelbar gemessene Zahl pro deutscher Tonne.

77. Landwirtschaft und CO₂-Düngung: der Nutzen ist nicht einseitig negativ

Eine CO₂-Vermeidungsmaßnahme vermindert nicht nur Erwärmung, sondern zugleich den direkten Düngeeffekt zusätzlicher CO₂-Konzentration. Für C3-Pflanzen wie Weizen, Reis oder Soja kann höheres CO₂ unter geeigneten Bedingungen Photosynthese und Wassernutzungseffizienz erhöhen. Dem stehen Hitzestress, Dürre, Extremereignisse, Schädlingdynamik und teilweise sinkende Nährstoffkonzentrationen gegenüber. Eine ehrliche Nutzenrechnung muss deshalb beide Richtungen gleichzeitig berücksichtigen.

Die bereits im oberen Teil verwendete Beispielparametrisierung zeigt die Größenordnung: Für Weizen ergab die kombinierte Rechnung aus CO₂-Düngung und Temperaturwirkung einen kleinen positiven Nettoeffekt pro zusätzlicher Gigatonne, für Mais einen negativen. Über 5,735 Gt ergab diese spezifische Parametrisierung etwa +0,0036 % für Weizen und -0,0156 % für Mais. Die Zahlen sind nicht global verallgemeinerbar. Ihr Wert liegt darin, zu zeigen, dass der Agrarnutzen einer Emissionsvermeidung kultur- und regionsspezifisch sein kann und das Vorzeichen nicht aus dem Wort „CO₂“ folgt.

Für die politische Gesamtbilanz bedeutet das: Landwirtschaft kann nicht seriös durch einen einzigen globalen Schaden pro Tonne repräsentiert werden. Wo CO₂-Düngung und längere Vegetationsperioden überwiegen, kann die Vermeidung einer Tonne einen kleinen entgangenen Nutzen bedeuten; wo Hitze und Wasserstress dominieren, erzeugt Vermeidung einen Nutzen. Der globale Saldo ist eine gewichtete Summe über Kulturen und Regionen, nicht eine naturwissenschaftliche Konstante.

78. Ozean und Meeresspiegel: beobachtete Veränderungen und modellierter Vermeidungsnutzen

Beim Ozean ist die Messlage von der Wirkungszurechnung zu trennen. Gemessen werden steigender Ozeanwärmehalt, Meeresspiegel und Veränderungen der Carbonatchemie. Dass der Ozean Wärme speichert, ist Beobachtung; welche Anteile auf einzelne Antriebe entfallen, ist Attribution; wie sich diese Größen unter künftigen Emissionspfaden entwickeln, ist Projektion. Für die isolierte deutsche Reduktion gibt es keinen direkt beobachtbaren Meeresspiegel- oder Ozeanendpunkt. Ihr Beitrag kann nur über eine Kette von Emissions-, Klima-, Ozean- und Eismodellen abgeschätzt werden.

Diese Endpunkte werden deshalb nicht als fester deutscher Nutzenbetrag verbucht. Sie gehen erst in die abschließende Szenariomatrix ein, wenn eine angenommene globale Schadensfunktion gewählt wird. Das verhindert, dass aus einer realen Beobachtung – etwa einem globalen Meeresspiegelanstieg – automatisch eine scheinbar exakt messbare Rendite einer deutschen Einzelmaßnahme abgeleitet wird.

Für das Ambitionsniveau ist außerdem Anpassung ein konkurrierendes Mittel. Ein Millimeter weniger langfristiger Meeresspiegel hat einen Nutzen, aber Küstenschutz, Raumplanung und Bauverbote können dieselben Schäden teilweise direkt reduzieren. Die optimale Ressourcenzuteilung hängt davon ab, ob eine zusätzliche Milliarde in Emissionsminderung oder in konkrete Anpassung mehr erwarteten Schaden vermeidet. Diese Vergleichsfrage gehört zwingend in die Angemessenheitsprüfung.

79. Luftqualität: ein großer lokaler Zusatznutzen – aber nicht jeder Klimamaßnahme

Der Ersatz fossiler Verbrennung reduziert häufig gleichzeitig Feinstaub, Schwefeldioxid, Stickoxide und weitere Schadstoffe. Dieser Zusatznutzen ist lokaler, unmittelbarer und empirisch leichter zu beobachten als der globale Klimateffekt. Insbesondere beim Ersatz alter Kohlekraftwerke oder ineffizienter Feuerungen kann der Gesundheitsnutzen erheblich sein. Er darf in einer Kosten-Nutzen-Rechnung nicht unterschlagen werden.

Gleichzeitig darf er nicht pauschal jeder CO₂-Reduktion zugeschrieben werden. Ein CO₂-armer Strommix kann Luftschadstoffe stark senken; eine teure Gebäudedämmung an einem bereits emissionsarmen System erzeugt dagegen kaum zusätzlichen Luftreinhalteeffekt. Ebenso können moderne Filteranlagen die lokalen Schadstoffemissionen fossiler Anlagen deutlich reduzieren, ohne das CO₂ zu verändern. Deshalb wird Luftqualität instrumentenspezifisch bilanziert und nicht über einen pauschalen Tonnenwert versteckt.

80. Fossile Importe und Resilienz: realer deutscher Eigennutzen

Ein erheblicher Teil des deutschen fossilen Energiebedarfs wird importiert. Jede dauerhaft vermiedene Einheit Öl, Gas oder Kohle kann deshalb Importausgaben und geopolitische Abhängigkeit reduzieren. Dieser Nutzen ist anders als der Klimanutzen überwiegend national und unmittelbar. Er wurde nach dem europäischen Gaspreisschock 2021–2023 besonders sichtbar.

Auch hier ist jedoch eine Nettorechnung nötig. Windräder, Solarmodule, Batterien, Elektrofahrzeuge und Netze benötigen Investitionsgüter und Rohstoffe, die teilweise ebenfalls importiert werden. Die relevante Größe ist nicht der Bruttowert vermiedener fossiler Importe, sondern die Veränderung der gesamten langfristigen Handels- und Risikobilanz. Eine Technologie, die 100 Euro fossile Importkosten vermeidet, aber 90 Euro zusätzliche importierte Komponenten benötigt, erzeugt keinen Importnutzen von 100 Euro.

Für die Gesamtbewertung ist Resilienz deshalb als eigenständiger Nutzenposten zu führen. Er kann bestimmte Maßnahmen rechtfertigen, deren reine Klimavermeidungskosten hoch wirken, wenn sie zugleich Abhängigkeiten von volatilen fossilen Lieferanten deutlich reduzieren. Umgekehrt darf „Energiesouveränität“ nicht benutzt werden, um neue einseitige Rohstoff- oder Technologielieferabhängigkeiten auszublenden.

81. Vermögens- und Wohlstandsverluste: was tatsächlich als Schaden zählt

Nicht jede Klimainvestition ist ein Wohlstandsverlust. Ein neues Stromnetz, eine sanierte Fassade oder eine Wärmepumpe sind reale Vermögenswerte. Ebenso wenig ist jede CO₂-Steuer volkswirtschaftlich vollständig „verloren“, weil die Einnahmen beim Staat verbleiben. Wohlstandsverluste entstehen dort, wo Ressourcen gegenüber der besten Alternative geringer produktiv eingesetzt werden, funktionsfähige Anlagen vorzeitig abgeschrieben werden, Produktion mit höherer Effizienz aus dem Inland verdrängt wird oder zusätzliche Verwaltung und Transaktionskosten entstehen.

Für die Folgenabschätzung werden daher vier Kostenklassen getrennt: erstens reine Transfers, zweitens produktive Investitionen, drittens inkrementelle Mehrkosten gegenüber dem realistischen Alternativpfad und viertens echte Wohlfahrtsverluste durch Fehlallokation oder Verdrängung. Nur die letzten beiden Klassen dürfen direkt dem Nettonutzen gegengerechnet werden. Diese Trennung verhindert sowohl eine

Übertreibung der Klimakosten durch Addieren aller Förderbudgets als auch eine Verharmlosung, bei der jede Transformationsausgabe als bloße Investition behandelt wird.

82. Eine belastbare historische Untergrenze des politisch organisierten Aufwands

Eine überschneidungsfreie Gesamtsumme seit 2000 ist mit öffentlich verfügbaren Daten nicht vollständig herstellbar. Dennoch lässt sich eine konservative Untergrenze sichtbarer klimapolitischer Finanzströme bilden, wenn nur klar identifizierbare große Programme betrachtet und offensichtliche Doppelzählungen vermieden werden. Dazu gehören mindestens die EEG-Umlageflüsse 2000–2021 von 200,51 Mrd. Euro, der Umweltbonus von rund 10 Mrd. Euro, die großen BEG-Fördervolumina seit 2021 und zusätzliche KTF-Programme. Bereits diese Größen bewegen sich deutlich im Bereich mehrerer hundert Milliarden Euro. [R03][R09][R11]

Die BEG allein zeigt die Dimension: 2021 standen beziehungsweise flossen je nach Programmabgrenzung Milliardenbeträge; 2022 wurden nach Angaben des Bundes Fördermittel von rund 33 Mrd. Euro bereitgestellt, verbunden mit rund 180 Mrd. Euro angestoßenem Investitionsvolumen und geschätzten 6,5 Mt jährlicher THG-Minderung. Für 2023 waren im KTF rund 16,9 Mrd. Euro BEG-Mittel vorgesehen, 2024 rund 11 Mrd. Euro, 2025 wurden 12 Mrd. Euro ausgegeben. Diese Beträge dürfen nicht einfach addiert werden, weil Zusagen, Kredite, Zuschüsse und Auszahlungen unterschiedliche Kategorien sind. Sie zeigen aber, dass die Gebäudetransformation inzwischen eine Größenordnung erreicht hat, die in jeder Gesamtrechnung neben dem EEG stehen muss. [R11][R12][R13]

Hinzu kommen Netzinvestitionen, Redispatch, Wasserstoffprogramme, Ladeinfrastruktur, Industrie-Klimaschutzverträge, Kohleausstiegskosten, Forschung und zahlreiche steuerliche Instrumente. Deshalb ist die Aussage „deutsche Klimapolitik kostet seit 2000 X Milliarden“ nur dann seriös, wenn X ausdrücklich als Bruttofinanzstrom, Bruttoinvestition oder Nettowohlfahrtskosten bezeichnet wird. Diese Evaluation verwendet für die Schlussrechnung mehrere Ebenen statt einer scheinexakten Gesamtsumme.

83. Aufwand-Nutzen-Matrix der großen Instrumente

Instrument	physisch nachweisbarer Nutzen	sichtbarer Aufwand	vorläufige Einordnung
EEG / erneuerbarer Strom	≈ 2,82 Gt vermieden 2000–2025; ≈ 0,001271 °C	200,51 Mrd. € Umlage bis 2021; breitere Verbraucherbelastung ≈300 Mrd. €	großer physischer Beitrag; historische Förderkosten grob 100–150 €/t vor Systemkosten
BEG Gebäude	2024 ≈2,6 Mt/Jahr Einsparung	2024 ≈11 Mrd. € Förderrahmen; 2025 12 Mrd. € Ausgaben	Lebensdauer entscheidend; grob 140–280 €/t Förderung bei 15–30 Jahren
Umweltbonus E-Pkw	Lebenszyklusvorteil abhängig von Fahrzeug und Strommix	≈10 Mrd. € für 2,1 Mio. Fahrzeuge	bei 10–30 t/Fahrzeug grob 159–476 €/t vor Additionalitätskorrektur
Netze / Redispatch	ermöglicht Integration und Versorgungssicherheit	>460 Mrd. € Netzinvestitionen bis 2045; 2023 3,2 Mrd. € Engpasskosten	notwendige Systemkosten, aber nicht vollständig Klimamehrkosten
EU-ETS	Cap-basierte europaweite Minderung	Zertifikatspreis überwiegend Transfer; reale Vermeidungskosten relevant	prinzipiell kosteneffizienter als kleinteilige Vorgaben
Kohleausstieg	hohe spezifische Emissionsminderung bei echter fossiler Verdrängung	Entschädigung + Ersatzkapazität + Systemkosten	stark abhängig vom Kernenergie-/Gas-/Import-Gegenfaktum

84. Was ist der globale Nutzen der deutschen Reduktion in physischer Sprache?

Die zentrale Rechnung lässt sich jetzt ohne monetäre Abkürzung formulieren. Die historisch durch erneuerbare Energien vermiedene Menge von grob 3,75 Gt CO₂-Äquivalenten entspricht größenordnungsmäßig einer vermiedenen globalen Mitteltemperatur im Bereich von etwa 0,0017 °C. Der zusätzliche deutsche Referenzpfad 2026–2045 gegenüber konstanten heutigen CO₂-Emissionen entspräche noch einmal etwa 0,0026 °C. Zusammengenommen bewegen sich diese beiden bewusst großzügigen Referenzrechnungen damit in einer Größenordnung von ungefähr 0,004 °C vermiedener globaler Erwärmung.

Diese Zahl ist klein im Verhältnis zu natürlichen jährlichen Temperaturschwankungen und kann nicht direkt beobachtet werden. Sie ist aber nicht bedeutungslos, weil Klimaschäden aus der Summe globaler Emissionen entstehen. Der konkrete deutsche Beitrag besteht darin, die globale Kurve um einige Tausendstel Grad zu verschieben. Wer den Nutzen größer darstellen will, muss einen zusätzlichen Multiplikator belegen – etwa internationale Technologiediffusion oder Nachahmung. Wer den Nutzen auf null setzen will, müsste dagegen die TCRE beziehungsweise die tatsächliche globale Vermeidung bestreiten.

Die politische Verhältnisfrage wird damit schärfer: Wie viele reale gesellschaftliche Ressourcen ist Deutschland bereit einzusetzen, um diese Tausendstelgrade selbst zu erzeugen, und welche kostengünstigeren globalen oder adaptiven Alternativen existieren? Genau diese Frage ist unabhängig davon legitim, ob man hohe oder niedrige Klimaschäden erwartet.

85. Von Tausendstelgraden zu wirtschaftlichem Nutzen: die einzige zulässige Ableitung

Eine Monetarisierung darf erst nach einem expliziten Endpunktmodell erfolgen. Der richtige Weg lautet: ΔT verändert eine physische Schadenshäufigkeit; diese verändert eine beobachtbare Zahl von Todesfällen, Ernteerträgen, beschädigten Gebäuden, verlorenen Arbeitsstunden oder Anpassungsausgaben; erst diese reale Größe erhält einen Geldwert. Dadurch wird sichtbar, welche Annahme den Nutzen treibt.

Bei Starkniederschlag lässt sich beispielsweise aus 0,00258 °C und 7 %/°C zunächst nur rund 0,018 % vermiedene Intensitätsänderung ableiten. Erst ein regionales Hochwassermodell könnte daraus eine Schadenänderung ableiten. Bei Meeresspiegel ergibt die Langzeitinterpolation nur eine Millimetergrößenordnung, deren wirtschaftlicher Wert vollständig von Küstenexposition und Anpassung abhängt. Bei Landwirtschaft kann das Vorzeichen je Kultur sogar wechseln. Ein universeller Eurobetrag pro Tonne verdeckt all diese Unterschiede.

Gesamtwirtschaftliche Modelle können trotzdem als zusammenfassende Szenarien dienen. Wenn eine publizierte Schadenfunktion beispielsweise rund 4,53 Prozentpunkte globales BIP je zusätzlichem Grad in einem bestimmten Bereich impliziert, dann entspräche 0,00258 °C mechanisch rund 0,0117 Prozentpunkten globalen BIP. Bei einer globalen Wirtschaftsleistung von grob 100–120 Billionen Geldeinheiten läge die statische Größenordnung bei etwa 12–14 Mrd. pro Jahr. Das ist jedoch keine gemessene deutsche Rendite, sondern das Ergebnis einer konkreten Schadenfunktion, die sich mit Anpassung und Modellwahl stark ändern kann. Genau deshalb wird diese Zahl als Szenario und nicht als Fakt geführt.

86. Integriertes Gesamtergebnis – ohne vorgegebenen CO₂-Preis

Aus der Gesamtfolgenrechnung lässt sich der Nutzen nicht seriös auf eine einzige „wahre“ Eurozahl verdichten. Es lässt sich aber sehr wohl ein konkretes Gesamturteil formulieren.

Erstens: Die deutsche Klimapolitik hat physisch erhebliche Emissionsmengen vermieden; allein die Nutzung erneuerbarer Energien summiert sich seit 2000 größenordnungsmäßig auf rund 3,75 Gt CO₂-Äquivalente.

Zweitens: Der daraus folgende direkte globale Temperatureffekt ist klein und liegt in der Größenordnung von etwa 0,0017 °C.

Drittens: Der zusätzliche Weg von heute bis 2045 kann im bewusst großzügigen Referenzmodell weitere rund 0,0026 °C vermeiden.

Viertens: Die gesellschaftlichen Kosten reichen je nach Instrument von relativ günstigen Emissionsminderungen bis zu sehr teuren letzten Tonnen und umfassen bereits heute mehrere hundert Milliarden Euro sichtbarer Finanzströme sowie sehr große zukünftige Systeminvestitionen.

Fünftens: Die physische Klimawirkung allein reicht nicht aus, um jede Maßnahme zu rechtfertigen. Bei erneuerbarem Strom liegen historische Brutto-Förderströme je bilanziell vermiedener Tonne grob in einer Größenordnung um 100–150 Euro vor zusätzlichen Systemkosten. Bei Gebäudeförderung ergeben einfache Lebensdauerrechnungen etwa 140–280 Euro Fördermittel je Tonne; bei der früheren E-Auto-Kaufprämie kann die Größenordnung abhängig vom tatsächlichen Lebenszyklusvorteil und der Additionalität bei etwa 160–480 Euro je Tonne liegen. Diese Unterschiede sind groß genug, dass eine pauschale Politik „jede Tonne um jeden Preis“ ökonomisch nicht plausibel ist.

Sechstens: Zusatznutzen können die Bilanz deutlich verbessern. Luftreinhaltung, fossile Importreduktion und technologische Lernkurven sind reale mögliche Vorteile. Sie sind jedoch nicht automatisch proportional zur CO₂-Minderung und müssen instrumentenspezifisch belegt werden. Siebtens: Nebenwirkungen können die Bilanz verschlechtern. Carbon Leakage, vorzeitige Kapitalentwertung, hohe Stromsystemkosten und Verteilungswirkungen sind reale Belastungen. Ein nationales Reduktionsziel ist deshalb kein Wohlfahrtsendpunkt, sondern lediglich ein Zwischenindikator.

87. Das Ambitionsniveau 2045 als Grenznutzenproblem

Die wichtigste politische Konsequenz betrifft nicht die bereits versunkenen historischen Kosten, sondern die nächste eingesetzte Milliarde. Je weiter die Emissionen sinken, desto mehr verschiebt sich die Reduktion von relativ einfachen Stromsektormaßnahmen zu schwer vermeidbaren Industrie-, Gebäude- und Verkehrsrestemissionen. Die Grenzkosten steigen. Gleichzeitig bleibt der physikalische Nutzen einer vermiedenen Tonne konstant beziehungsweise annähernd linear in der TCRE. Daraus folgt zwingend eine Grenznutzenprüfung.

Wenn eine zusätzliche nationale Tonne für 100 Euro glaubwürdig global vermieden werden kann, ist sie unter sonst gleichen Bedingungen viermal kosteneffizienter als eine Tonne für 400 Euro. Wenn dieselbe globale Tonne in einem anderen Land für 50 Euro dauerhaft und zusätzlich vermieden werden kann, ist die globale Klimawirkung identisch. Eine teurere deutsche Lösung kann dennoch rational sein, wenn sie zusätzliche Innovations-, Sicherheits- oder Verteilungsnutzen erzeugt. Diese müssen aber als Zusatznutzen belegt und dürfen nicht stillschweigend vorausgesetzt werden.

Das Netto-Null-Ziel 2045 besitzt daher keinen eigenständigen naturwissenschaftlichen Grenznutzen an exakt diesem Datum. Es ist eine politische Festlegung. Naturwissenschaftlich relevant ist die globale kumulierte Emissionsmenge. Ökonomisch relevant sind die Grenzkosten und der Grenznutzen der nächsten vermiedenen Tonne. Daraus folgt, dass ein flexibler Pfad aus nationaler Vermeidung, europäischer Kooperation, glaubwürdiger internationaler Vermeidung, Senken und Anpassung theoretisch denselben oder höheren Nutzen zu geringeren Kosten erzeugen kann als eine starre territoriale Nullvorgabe.

88. Welche Maßnahmen bestehen den nüchternen Nutzen-Aufwand-Test am ehesten?

Auf Basis der bisher verfügbaren Daten lässt sich eine vorsichtige Rangfolge formulieren, ohne einen pauschalen CO₂-Schadenswert vorauszusetzen. Maßnahmen sind besonders robust, wenn sie erstens tatsächlich global Emissionen vermeiden, zweitens geringe reale Zusatzkosten besitzen, drittens starke lokale Zusatznutzen erzeugen und viertens keine hohen Verlagerungs- oder Systemkosten verursachen. Dazu gehören typischerweise Effizienzmaßnahmen mit kurzer Amortisation, der Ersatz besonders emissions- und schadstoffintensiver Erzeugung, kostengünstige erneuerbare Projekte an geeigneten Standorten sowie marktbasierende CO₂-Preise mit breiter Abdeckung.

Weniger robust sind Maßnahmen, deren Klimawirkung zwar real ist, deren Vermeidungskosten aber hoch und deren Additionalität gering ist. Kaufprämien für ohnehin nachgefragte Fahrzeuge, die Förderung bereits marktüblicher Gebäudestandards oder sehr teure letzte Industrieprozesse können in diese Kategorie fallen. Besonders kritisch sind Maßnahmen, die vor allem nationale Territorialemissionen verlagern, ohne die globalen Emissionen entsprechend zu senken.

Diese Rangfolge ist kein endgültiges Urteil über einzelne Technologien. Sie ist das Ergebnis der gleichen Logik, die in einer medizinischen Nutzen-Risiko-Prüfung selbstverständlich wäre: Zuerst dort intervenieren, wo bei gleichem Aufwand der größte zusätzliche Endnutzen entsteht. Das Ambitionsniveau wird dadurch nicht moralisch bestimmt, sondern anhand der nächsten tatsächlich erreichbaren Einheit Nutzen.

89. Welche Behauptungen die vorliegende Rechnung stützt – und welche nicht

- Gestützt: Deutschland hat seine Emissionen erheblich gesenkt, und erneuerbare Energien vermeiden nach amtlicher Netto-Bilanz heute hunderte Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr.
- Gestützt: Die daraus resultierende isolierte deutsche globale Temperaturwirkung liegt trotz großer nationaler Anstrengungen nur im Bereich von Tausendstelgraden.
- Gestützt: Die sichtbaren klimapolitischen Finanzströme und Transformationsinvestitionen liegen in der Größenordnung von mehreren hundert Milliarden Euro; zukünftige Netzinvestitionen allein werden auf mehr als 460 Mrd. Euro beziffert.

- Gestützt: Die Kosten je vermiedener Tonne unterscheiden sich zwischen Instrumenten erheblich; es gibt keine ökonomische Rechtfertigung dafür, jede Tonne mit beliebig hohen nationalen Kosten zu vermeiden.
- Nicht gestützt: Die Behauptung, aus heutigen Messungen lasse sich ein exakter deutscher Temperatur- oder Schadensnutzen direkt ablesen. Emissionsmengen und viele Kosten sind beobachtbar; 'vermiedene' Emissionen benötigen ein Gegenfaktum, die Temperaturwirkung benötigt eine Klimarelation und der gesellschaftliche Schaden weitere Modelle.
- Nicht gestützt: Die Behauptung, jede deutsche Klimamaßnahme sei durch ihren CO₂-Effekt automatisch wirtschaftlich gerechtfertigt. Dafür müssen Kosten, Additionalität, Leakage, Zusatznutzen und Alternativen geprüft werden.
- Nicht gestützt: Eine einzige amtliche Zahl in Euro pro Tonne als naturwissenschaftlicher Beweis des Nutzens. Monetarisierung bleibt eine nachgelagerte Modell- und Bewertungsstufe.

Gestützt: Sehr hohe Emissionsszenarien sind keine zeitlosen Tatsachen. Der CMIP7-Prozess bewertet SSP5-8.5 für das 21. Jahrhundert inzwischen als unplausibel; politische Begründungen, die dieses Szenario wie einen wahrscheinlichen Referenzpfad behandelt haben, müssen deshalb neu bewertet werden.

Nicht gestützt: Die pauschale Behauptung, Klimamodelle seien generell unbrauchbar. Retrospektive Tests zeigen für die globale Mitteltemperatur erhebliche Prognosefähigkeit, während Unsicherheiten bei regionalen Folgen, Extremereignissen, Eisschilden und ökonomischen Schäden deutlich größer werden. Die korrekte Schlussfolgerung lautet daher: Modelle sind bedingte Werkzeuge, keine Messungen und keine sicheren Zukunftsprognosen.

90. Gesamturteil

Die Gesamtfolgenrechnung erlaubt am Ende eine eigene Bewertungsentscheidung. Einen naturwissenschaftlich gemessenen 'richtigen' Europreis einer Tonne CO₂ gibt es nicht; die Monetarisierung entsteht erst aus Temperatur-, Schadens-, Anpassungs-, Zeit- und Diskontierungsannahmen. Für eine belastbare politische Prüfung ist deshalb sinnvoll, nicht den höchsten noch vertretbaren, sondern einen bewusst niedrigen positiven Arbeitswert zu wählen. Auf Basis der in diesem Bericht untersuchten physischen Endpunkte, der realen positiven CO₂-Wirkungen, der Anpassungsmöglichkeiten, der großen ökonomischen Schadensstreuung und der Tatsache, dass in der Literatur je nach Modell und Diskontierung auch sehr niedrige bis teilweise negative Werte vorkommen, setzt diese Evaluation den globalen Klimanutzen einer tatsächlich zusätzlich vermiedenen Tonne CO₂ auf 5 Euro. Der Wert ist eine konservative Untergrenzenbewertung, kein Messwert. Ein Sensitivitätsbereich von 0 bis 5 Euro je Tonne bildet die für diese konservative Prüfung relevante Unsicherheit ab.

Der Wert lässt sich transparent rückwärts lesen. Bei der verwendeten TCRE von 0,45 °C je 1.000 Gt CO₂ bewirkt eine Tonne rechnerisch rund $4,5 \times 10^{-13}$ °C. Bei einer Weltwirtschaftsleistung von etwa 104,7 Billionen Euro, 50 Jahren Betrachtungsdauer und 3 % Diskontierung entspricht ein Wert von 5 EUR/t ungefähr der Annahme, dass ein zusätzliches Grad globaler Erwärmung marginal rund 0,42 % des jährlichen Welt-BIP an Netto-Schaden verursacht. Das ist eine ausgesprochen niedrige Schadenssteigung und liegt weit unter der im Bericht betrachteten hohen Schadensfunktion von rund 4,53 % je Grad. Sie lässt damit großen Raum für Anpassung, CO₂-Düngung, geringere Kältebelastung und mögliche regionale Vorteile. Pro 1 Gt global zusätzlich vermiedenem CO₂ ergibt sich so ein Klimanutzen von 5 Mrd. Euro; pro modelliert vermiedenem 0,001 °C rund 11,1 Mrd. Euro.

Für Deutschland wird dadurch die Nutzen-Aufwand-Relation besonders deutlich. Die als großzügige Obergrenze gerechnete zusätzliche Restvermeidung 2026-2045 von 5,735 Gt CO₂ besitzt beim konservativen Bewertungswert einen globalen Klimanutzen von rund 28,7 Mrd. Euro. Die historische erneuerbare Vermeidung von größenordnungsmäßig 3,75 Gt entspräche rund 18,8 Mrd. Euro; der enger betrachtete Strom-/EEG-Komplex mit rund 2,03 Gt etwa 10,2 Mrd. Euro. Dem stehen allein beim EEG mehr als 200 Mrd. Euro Umlagezahlungen bis 2021 beziehungsweise knapp 300 Mrd. Euro in breiteren historischen Kostenbetrachtungen gegenüber. Diese Bruttoströme sind nicht mit Nettowohlfahrtsverlust

gleichzusetzen. Sie zeigen aber: In der konservativen 5-EUR/t-Bewertung kann die reine Klimawirkung die beobachteten historischen Kostenströme des EEG nur zu einem kleinen Teil erklären. Die verbleibende Rechtfertigung müsste aus Luftreinhaltung, vermiedenen Brennstoffimporten, geschaffenen Vermögenswerten, technologischem Lernen und weiteren nachweisbaren Zusatznutzen kommen.

Dasselbe gilt noch stärker für teure Grenzmaßnahmen. Historische Förderquotienten von etwa 100-150 EUR/t beim erneuerbaren Strom, 140-280 EUR/t in einfachen BEG-Lebensdauerrechnungen und 160-480 EUR/t beim früheren Umweltbonus liegen sämtlich um ein Vielfaches über dem konservativen reinen Klimanutzen von 5 EUR/t. Sie können trotzdem gesellschaftlich sinnvoll sein, wenn belastbare Zusatznutzen die Differenz schließen. Wo diese fehlen, spricht die Rechnung gegen die konkrete Instrumentenausgestaltung - nicht gegen die physikalische Existenz eines CO₂-Effekts.

Das abschließende Urteil lautet deshalb: Eine global zusätzlich vermiedene Tonne CO₂ wird in dieser Folgenabschätzung für die konservative Untergrenzenprüfung mit 5 Euro Klimanutzen bewertet. Unter 5 Euro realen gesellschaftlichen Vermeidungskosten ist eine Maßnahme bereits aus der reinen Klimawirkung heraus plausibel. Oberhalb von 5 Euro benötigt sie zusätzliche, konkret quantifizierte Nutzenargumente. Bei 100, 200, 500 oder 1.000 Euro je Tonne ist der Abstand so groß, dass pauschale Hinweise auf 'Klimaschutz' als Begründung nicht genügen. Der Wert von 5 Euro ist bewusst revisionsoffen und konservativ gewählt: Neue belastbare Evidenz über Klimasensitivität, Netto-Mortalität, Agrarwirkungen, Ozeanschäden, Anpassung oder globale Schadensfunktionen kann ihn erhöhen oder senken.

Die Sensitivität bleibt ausdrücklich sichtbar: Bei 0 EUR/t wird der direkte monetarisierte Klimanutzen im Nullschadens-Stresstest auf null gesetzt; bei 25 EUR/t verfünffacht er sich gegenüber der konservativen Untergrenze. Diese Spannweite verändert nicht die gemessenen Emissionen oder Kosten, sondern ausschließlich die Bewertung des abstrakten globalen Klimanutzens. Gerade deshalb müssen politische Entscheidungen zusätzlich auf real beobachtbare Co-Benefits und reale Nettokosten gestützt werden.

91. Rechenblatt EEG / erneuerbarer Strom

Datenbasis: UBA-Vermeidungsbilanz und Bundestagsangaben zur EEG-Umlage. Der Stromsektor vermied nach den amtlichen Stützpunkten 2000 etwa 34 Mt, 2005 rund 56 Mt, 2010 rund 74 Mt, 2015 rund 129 Mt, 2020 rund 184 Mt und 2025 rund 207 Mt CO₂-Äquivalente. Die lineare Zwischeninterpolation ergibt für 2000–2025 rund 2,82 Gt kumulierte Vermeidung. Bis 2021 sind es grob 2,03 Gt. Den 200,51 Mrd. Euro EEG-Umlageeinzahlungen 2000–2021 steht damit ein Brutto-Förderfluss von ungefähr 99 Euro je bilanziell vermiedener Tonne gegenüber. Nimmt man die breitere RWI-Kostengröße von rund 300 Mrd. Euro, steigt der Quotient auf ungefähr 148 Euro je Tonne.

Interpretation: Der Quotient ist eine historische Fördereffizienz, keine vollständige Nettowohlfahrtsrechnung. Er enthält weder den Restwert der Anlagen noch sämtliche Systemkosten. Zugleich enthält die UBA-Vermeidungsbilanz auch erneuerbaren Strom, der nicht ausschließlich durch das EEG verursacht wurde. Die kausale Förderwirkung ist daher geringer als die gesamte Vermeidung, wenn ein Teil des Ausbaus auch ohne EEG erfolgt wäre. Beide Effekte wirken in entgegengesetzte Richtungen und müssen in einer mikroökonomischen Evaluierung getrennt werden.

92. Rechenblatt BEG / Gebädeförderung

Datenbasis: BEG-Evaluation 2024 mit rund 2,6 Mt jährlicher THG-Einsparung und rund 11 Mrd. Euro verfügbarem Förderrahmen. Bei 15 Jahren Wirkung entstehen 39 Mt kumulierte Einsparung und ein Förderquotient von etwa 282 Euro je Tonne; bei 20 Jahren 52 Mt und 212 Euro je Tonne; bei 25 Jahren 65 Mt und 169 Euro je Tonne; bei 30 Jahren 78 Mt und 141 Euro je Tonne. Diese Bandbreite ist transparent und zeigt, warum die Lebensdauerfrage die Bewertung dominiert.

Die tatsächliche Nettowohlfahrtsrechnung kann günstiger ausfallen, wenn die Maßnahmen Brennstoffkosten sparen und Immobilienwerte erhöhen. Sie kann ungünstiger ausfallen, wenn hohe Förderquoten überwiegend Mitnahmeeffekte erzeugen oder technisch unnötig tiefe Sanierungsstandards

gewählt werden. Für die politische Steuerung folgt daraus, dass die BEG nicht als einheitliches Programm bewertet werden sollte. Jede Maßnahmenengruppe benötigt einen eigenen Quotienten aus kausal zusätzlicher Lebenszyklusvermeidung und realen Zusatzkosten.

93. Rechenblatt Umweltbonus / Elektromobilität

Datenbasis: rund 10 Mrd. Euro Bundesmittel und etwa 2,1 Mio. geförderte Fahrzeuge. Ohne Annahme eines konkreten Lebenszyklusvorteils lässt sich keine Tonne berechnen. Deshalb wird eine Spannweite von 10 bis 30 t zusätzlicher Lebenszyklusvermeidung je Fahrzeug geführt. Daraus ergeben sich Förderquotienten von 476 bis 159 Euro je Tonne. Der entscheidende zusätzliche Parameter ist die Additionalität des Kaufs. Wenn nur die Hälfte der geförderten Käufe durch die Prämie verursacht wurde, verdoppelt sich der Förderquotient. Bei 20 t Klimavorteil je Fahrzeug wären es dann statt 238 rund 476 Euro je zusätzlich vermiedener Tonne.

Damit wird sichtbar, warum Marktanreizprogramme besonders evaluationsbedürftig sind. Eine physisch effiziente Technologie kann durch eine schlecht zielende Kaufprämie eine ungünstige Förderbilanz besitzen. Der gesellschaftliche Klimanutzen der Elektromobilität und der Nutzen des konkreten Umweltbonus sind zwei verschiedene Fragen.

94. Rechenblatt Netze und Engpassmanagement

Für Netze existiert kein seriöser Quotient „Euro je Tonne“, solange nicht bestimmt wird, welcher Anteil des Netzausbaus ausschließlich durch den Transformationspfad zusätzlich erforderlich ist. Die >460 Mrd. Euro bis 2045 sind Bruttoinvestitionen in langlebige Infrastruktur. Ein Teil ersetzt ohnehin alternde Netze, ein Teil ermöglicht Lastwachstum und Versorgungssicherheit, ein Teil ist spezifisch durch die räumliche Trennung von Erzeugung und Verbrauch sowie hohe erneuerbare Einspeisung bedingt.

Der richtige Rechenweg lautet daher: alternative Netzinvestition ohne zusätzlichen Transformationspfad abziehen; Restwert nach 2045 berücksichtigen; zusätzliche Betriebskosten beziehungsweise vermiedene Engpasskosten einbeziehen; den resultierenden Nettoaufwand den tatsächlich zusätzlich integrierten und dadurch global vermiedenen Emissionen zurechnen. Solange diese Größen nicht in einer gemeinsamen amtlichen Rechnung veröffentlicht werden, ist jede exakte €/t-Zahl für den Netzausbau scheinpräzise. Die 3,2 Mrd. Euro Engpasskosten 2023 zeigen jedoch, dass der fehlende Netzausbau bereits heute reale jährliche Systemkosten verursacht.

95. Rechenblatt Grenzkosten 2045

Die durchschnittlichen historischen Kosten sind für die Zukunft nur begrenzt aussagekräftig. Die letzten Tonnen in Industrie, Luftfahrt, Landwirtschaft und Prozesswärme können deutlich teurer sein als die bisherige Stromverdrängung. Für jede zusätzliche Maßnahme ab 2026 muss deshalb ein Grenzkostenquotient verwendet werden. Ein Programm von 1 Mrd. Euro realen Zusatzkosten, das 10 Mio. t global zusätzlich vermeidet, kostet 100 Euro je Tonne; bei 2 Mio. t sind es 500 Euro; bei nur 0,5 Mio. t bereits 2.000 Euro. Diese einfache Division ist keine vollständige Wohlfahrtsbewertung, aber sie zwingt die Politik, die tatsächliche Additionalität sichtbar zu machen.

reale Zusatzkosten	globale zusätzliche Vermeidung	Grenzkosten
1 Mrd. €	10 Mt	100 €/t
1 Mrd. €	5 Mt	200 €/t
1 Mrd. €	2 Mt	500 €/t
1 Mrd. €	1 Mt	1.000 €/t
1 Mrd. €	0,5 Mt	2.000 €/t

96. Was ist ein vermiedenes Tausendstelgrad in Euro wert?

Die physische Größenordnung lässt sich in Geld übersetzen, ohne einen behördlichen CO₂-Preis zu übernehmen. Dafür wird offen gelegt, welche zusätzliche Annahme erforderlich ist: Wie stark verändert ein zusätzliches Grad globaler Erwärmung die jährliche weltweite Wohlfahrt beziehungsweise Wirtschaftsleistung netto? Diese Schadenssteigung wird anschließend mit der Weltwirtschaftsleistung und der betrachteten Temperaturänderung multipliziert. Das Ergebnis ist keine Messung, sondern ein transparenter Umrechnungssatz für ein ausdrücklich benanntes Szenario.

Als gemeinsame Basis dient die von der Weltbank für 2025 ausgewiesene Weltwirtschaftsleistung von 118,35 Billionen US-Dollar. Mit dem durchschnittlichen ECB-Referenzkurs 2025 von 1,13 US-Dollar je Euro entspricht dies grob 104,7 Billionen Euro. Die Tabelle zeigt deshalb unmittelbar, was ein vermiedenes Tausendstelgrad – 0,001 °C – wert wäre, wenn die Netto-Schadensfunktion zwischen –0,5 % und +4,53 % der jährlichen Weltwirtschaftsleistung je zusätzlichem Grad liegt. Der negative Fall ist bewusst enthalten, weil ältere Literatur und auch der IPCC für niedrige Erwärmungsniveaus regionale und teilweise globale Netto-Vorteile nicht ausschließen; der höchste Wert orientiert sich an der lokalen Steigung einer neueren statistischen globalen BIP-Schadensfunktion zwischen 1,5 und 3 °C.

Szenario	angenommene Netto-Schadenssteigung	jährlicher Wert von 0,001 °C	50-Jahres-Barwert, 3 %
Nettonutzen niedriger Erwärmung / CO ₂ -Effekte dominieren	-0.50 % Welt-BIP je °C	-0.5 Mrd. €	-13.5 Mrd. €
neutraler Nettoeffekt	+0.00 % Welt-BIP je °C	0.0 Mrd. €	0.0 Mrd. €
geringer Nettoschaden	+0.50 % Welt-BIP je °C	0.5 Mrd. €	13.5 Mrd. €
moderater Nettoschaden	+1.00 % Welt-BIP je °C	1.0 Mrd. €	26.9 Mrd. €
hoher Nettoschaden	+2.00 % Welt-BIP je °C	2.1 Mrd. €	53.9 Mrd. €
sehr hoher statistischer Schadensanstieg; lokale Steigung aus Kotz et al.	+4.53 % Welt-BIP je °C	4.7 Mrd. €	122.1 Mrd. €

Die Tabelle beantwortet damit genau die bisher offene Preisfrage. Unter einer neutralen Schadensannahme ist 0,001 °C vermiedene Erwärmung monetär null wert. Bei 0,5 % Welt-BIP-Schaden je Grad wären es rund 0,52 Mrd. Euro pro Jahr oder rund 13,5 Mrd. Euro Barwert über 50 Jahre bei 3 %. Bei 1 % wären es rund 1,05 Mrd. Euro pro Jahr beziehungsweise 26,9 Mrd. Euro Barwert. Selbst beim sehr hohen 4,53%-Szenario ergeben sich rund 4,74 Mrd. Euro pro Jahr und rund 122 Mrd. Euro 50-Jahres-Barwert je vermiedenem Tausendstelgrad. Diese Werte sind global, nicht deutsch; sie hängen vollständig an der angenommenen Schadenssteigung und am Zeithorizont.

97. Was bedeutet das für den deutschen Restpfad bis 2045?

Wird die zentrale TCRE-Rechnung von rund 0,00258 °C für den großzügigen deutschen Referenzpfad 2026–2045 akzeptiert, lässt sich derselbe Szenarioansatz auf das Gesamtprogramm anwenden. Dabei ist zu betonen: Bereits die 0,00258 °C sind nicht gemessen, sondern das Produkt aus einem Gegenfaktum von 5,735 Gt vermiedenem CO₂ und einer modellierten TCRE. Die folgende Monetarisierung liegt damit zwei Modellstufen hinter der Messung.

Szenario	modellierte deutsche Temperaturwirkung	jährlicher globaler Nutzen	50-Jahres-Barwert, 3 %
Nettonutzen niedriger Erwärmung / CO ₂ -Effekte dominieren	0,00258 °C	–1.4 Mrd. €	–34.8 Mrd. €
neutraler Nettoeffekt	0,00258 °C	0.0 Mrd. €	0.0 Mrd. €
geringer Nettoschaden	0,00258 °C	1.4 Mrd. €	34.8 Mrd. €
moderater Nettoschaden	0,00258 °C	2.7 Mrd. €	69.6 Mrd. €
hoher Nettoschaden	0,00258 °C	5.4 Mrd. €	139.1 Mrd. €
sehr hoher statistischer Schadensanstieg; lokale Steigung aus Kotz et al.	0,00258 °C	12.2 Mrd. €	315.1 Mrd. €

Im moderaten 1-%-Szenario entspräche der globale Nutzen des gesamten deutschen Referenzpfads etwa 2,7 Mrd. Euro pro Jahr beziehungsweise rund 69,6 Mrd. Euro Barwert über 50 Jahre bei 3 %. Im hohen 2-%-Szenario wären es rund 139 Mrd. Euro Barwert; im sehr hohen 4,53-%-Szenario rund 315 Mrd. Euro. Im neutralen Szenario beträgt der monetarisierte Klimanutzen null; im –0,5-%-Szenario wäre Emissionsvermeidung unter reiner Klimawohlfahrtsbetrachtung sogar mit einem entgangenen Nutzen verbunden. Diese Spannweite ist kein Mangel der Rechnung, sondern ihr zentrales Ergebnis: Der Euro-Nutzen wird nicht gemessen, sondern durch die Schadensfunktion erzeugt.

98. Was hat Deutschland für ein modelliert vermiedenes Tausendstelgrad aufgewendet?

Auf der Aufwandseite sind die Größen wesentlich greifbarer. Für den EEG-Zeitraum 2000–2021 stehen rund 200,51 Mrd. Euro Umlageeinzahlungen einer im Dokument bilanzierten Stromsektor-Vermeidung von rund 2,03 Gt CO₂ gegenüber. Unter der zentralen TCRE entspräche diese Menge rund 0,000914 °C. Teilt man den sichtbaren Förderstrom durch diesen modellierten Temperatureffekt, ergeben sich rund 219 Mrd. Euro je 0,001 °C. Verwendet man die breitere RWI-Kostengröße von knapp 300 Mrd. Euro, steigt die Größenordnung auf rund 328 Mrd. Euro je 0,001 °C. Beides sind keine vollständigen Nettowohlfahrtskosten: Förderströme enthalten Transfers und finanzieren reale Anlagen; zugleich fehlen zusätzliche System- und Opportunitätskosten. Die Kennzahl zeigt aber die Größenordnung des politisch mobilisierten Aufwands relativ zum modellierten Temperatureffekt.

Aufwandsansatz	Bezugswirkung	Aufwand je 0,001 °C	erforderliche Schadenssteigung für Break-even*
EEG-Umlage 2000–2021: 200,51 Mrd. €	≈ 0,000914 °C	≈ 219 Mrd. €	≈ 8,1 % Welt-BIP je °C
breitere RWI-Größe: ≈ 300 Mrd. €	≈ 0,000914 °C	≈ 328 Mrd. €	≈ 12,2 % Welt-BIP je °C
zukünftige Nettokosten 100 Mrd. € bei 0,00258 °C	0,00258 °C	≈ 38,7 Mrd. €	≈ 1,4 % Welt-BIP je °C
zukünftige Nettokosten 250 Mrd. €	0,00258 °C	≈ 96,9 Mrd. €	≈ 3,6 % Welt-BIP je °C

zukünftige Nettokosten 500 Mrd. €	0,00258 °C	≈ 193,7 Mrd. €	≈ 7,2 % Welt-BIP je °C
zukünftige Nettokosten 1 Billion €	0,00258 °C	≈ 387,5 Mrd. €	≈ 14,4 % Welt-BIP je °C

*Break-even berechnet als konstante jährliche Netto-Schadenssteigerung über 50 Jahre mit 3 % Diskontierung, Welt-BIP 2025 konstant gehalten. Damit wird gerade keine künftige Wirtschafts- oder Schadensentwicklung behauptet; ausgewiesen wird nur, welche Annahme erforderlich wäre, um den jeweiligen Aufwand rechnerisch zu rechtfertigen.

Diese Gegenrechnung ist der zentrale politische Befund. Der historische EEG-Förderstrom allein läge – unter den genannten Annahmen – erst dann auf Break-even-Niveau, wenn ein zusätzliches Grad globaler Erwärmung über 50 Jahre jedes Jahr einen Nettoverlust von grob acht Prozent der heutigen Weltwirtschaftsleistung verursachen würde; bei der breiteren 300-Mrd.-Euro-Größe wären es rund zwölf Prozent. Lokale Zusatznutzen, technologische Lernkurven und vermiedene Importkosten können die Bilanz verbessern, während Systemkosten, Mitnahme, Leakage und Opportunitätskosten sie verschlechtern. Deshalb ist diese Kennzahl kein endgültiges Urteil über das EEG, aber erstmals eine transparente Größenordnung dafür, welche globale Schadensannahme der Aufwand benötigt.

99. Die 2026 revidierten Emissionsszenarien ändern die Beweislast

Der CMIP7-Szenariorahmen von 2026 ist für die Bewertung früherer Dringlichkeitsargumente unmittelbar relevant. Das CMIP6-Hochszenario SSP5-8.5 wird für das 21. Jahrhundert inzwischen ausdrücklich als unplausibel bewertet. Der neue hohe CMIP7-Pfad liegt darunter; zugleich sind auch mehrere sehr niedrige frühere Pfade mit den tatsächlichen Entwicklungen der 2020er-Jahre nicht mehr konsistent. Der neue Szenariosatz erwartet für 2100 – vor Berücksichtigung der vollen Klimasensitivitätsunsicherheit – grob eine Spanne von etwa 1,5 bis knapp 3,5 °C gegenüber 1850–1900. Das World Climate Research Programme betont zugleich, dass Plausibilität eine subjektive Beurteilung bleibt und keine Eintrittswahrscheinlichkeiten vergeben werden.

Für diese Folgenabschätzung folgt daraus weder 'die Klimawissenschaft ist widerlegt' noch 'die früheren Rechnungen bleiben unverändert gültig'. Die richtige Konsequenz ist eine Revision jeder Politikbegründung, die ein bestimmtes Hochszenario wie eine wahrscheinlich eintretende Zukunft behandelt hat. Je stärker ein Nutzen nur unter einem inzwischen als unplausibel angesehenen Emissionspfad entsteht, desto schwächer wird die damalige Nutzenbegründung. Umgekehrt bleiben gemessene CO₂-Zunahme, gemessene spektrale Strahlungswirkung und beobachtete Erwärmung davon unberührt.

100. Abschließende Nutzen-Aufwand-Aussage

Damit lässt sich das Ergebnis schärfer formulieren als zuvor. Am sichersten messbar sind die Emissionsentwicklung und ein großer Teil des finanziellen Aufwands. Schon die Aussage, wie viele Tonnen 'vermieden' wurden, ist bei einer konkreten Politikmaßnahme gegenfaktisch und nicht direkt messbar. Die Übersetzung dieser Tonnen in Tausendstelgrade ist modelliert; die Übersetzung der Tausendstelgrade in Meeresspiegel, Mortalität, Ernte oder BIP ist noch stärker modell- und anpassungsabhängig; die Übersetzung in Euro fügt schließlich Schadensfunktion, Zeithorizont und Diskontierung hinzu.

Der Vorteil der Schlussrechnung besteht darin, dass diese Unsicherheit nicht mehr hinter einem amtlichen Europreis pro Tonne verborgen wird. Stattdessen steht sichtbar nebeneinander: Ein modelliert vermiedenes Tausendstelgrad kann – je nach angenommener Netto-Schadensfunktion – einen globalen Barwert von negativ bis deutlich über 100 Mrd. Euro besitzen. Gleichzeitig liegen klar bezifferbare deutsche Klimapolitik-Aufwendungen für ein modelliertes Tausendstelgrad teilweise im Bereich von mehreren hundert Milliarden Euro. Ob die Bilanz positiv ist, entscheidet daher nicht die bloße Existenz des Treibhauseffekts, sondern die empirisch viel schwierigere Frage nach der Netto-Schadensfunktion und nach den tatsächlichen Zusatzkosten der jeweiligen Maßnahme.

Einordnung des konservativen 5-EUR/t-Werts:

Die veröffentlichte Literatur weist eine außerordentlich große Spannweite der Social-Cost-of-Carbon-Schätzungen auf. Eine Meta-Analyse von Wang et al. (Journal of Cleaner Production, 2019) fand über die ausgewerteten Studien Werte von etwa -13 bis weit über 2.000 US-Dollar je t CO₂; der Mittelwert lag deutlich höher. Der hier verwendete Wert von 5 EUR/t ist daher keine Literaturmitte, sondern eine bewusst niedrige positive Untergrenzenbewertung. Er soll prüfen, ob eine Maßnahme selbst unter sehr zurückhaltender Bewertung des globalen Klimaschadens noch durch ihre Klimawirkung oder nur durch zusätzliche Co-Benefits gerechtfertigt werden kann.

TEIL XIII – Quellenregister der abschließenden Gesamtfolgenrechnung

- R01. Umweltbundesamt, Erneuerbare Energien – Vermiedene Treibhausgase, Stand 15.05.2026.
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltzustand-trends/energie/erneuerbare-energien-vermiedene-treibhausgase>
- R02. Umweltbundesamt, Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger 2024, Climate Change 11/2026.
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/emissionsbilanz-erneuerbarer-energetraeger-2024>
- R03. Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages, Förderung erneuerbarer Energien in Deutschland und Europa, WD 5-3000-039/23. <https://www.bundestag.de/resource/blob/951272/WD-5-039-23-pdf.pdf>
- R04. RWI, Ökologischer Umbau von Wirtschaft und Gesellschaft – Kosten der Förderung erneuerbarer Energien / Energiewende. <https://www.rwi-essen.de/publikationen/wissenschaftlich/rwi-materialien/detail/oekologischer-umbau-von-wirtschaft-und-gesellschaft-kosten-6808>
- R05. Bundesrechnungshof, Energiewende nicht auf Kurs, 2024.
<https://www.bundesrechnungshof.de/SharedDocs/Kurzmeldungen/DE/2024/energiewende/kurzmeldung.html>
- R06. Bundesnetzagentur, Monitoringbericht 2024 / Engpassmanagement 2023.
https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/EN/Areas/ElectricityGas/Monitoring/key_monitoringreport2024.pdf
- R07. BEG-Evaluation 2024, Kurzfassung, Prognos/ifeu/FIW/ITG.
<https://www.energiewechsel.de/KAENEF/Redaktion/DE/PDF-Anlagen/BEG/beg-evaluation-2024-kurzfassung.pdf>
- R08. Bundesfinanzministerium, Klima- und Transformationsfonds – BEG-Zahlen 2025.
https://www.bundesfinanzministerium.de/Web/DE/Themen/Oeffentliche_Finzen/SVIK/KTF/klima-und-transformationsfonds.html
- R09. Bundeswirtschaftsministerium, Umweltbonus endet mit Ablauf des 17. Dezember 2023.
<https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2023/12/20231216-umweltbonus-endet-mit-ablauf-des-17-dezember-2023.html>
- R10. Umweltbundesamt, Klimavorteil für E-Autos bestätigt / Lebenszyklusanalyse, 2024.
<https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/klimavorteil-fuer-e-autos-bestaetigt>
- R11. Bundeswirtschaftsministerium, Haushalt 2021 / BEG und Wasserstoffmittel.
<https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Ministerium/haushalt-2021.html>
- R12. Bundeswirtschaftsministerium, BEG-Reform 2022 – Fördervolumina.
<https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2022/07/20220726-bundeswirtschaftsministerium-legt-reform-der-gebaeudefoerderung-vor.html>
- R13. Bundesfinanzministerium, KTF-Wirtschaftsplan 2023–2026.
<https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Pressemitteilungen/Finanzpolitik/2022/07/2022-07-27-klima-und-transformationsfonds.html>
- R14. IPCC AR6 WG1, Chapter 5 – Global Carbon and Other Biogeochemical Cycles and Feedbacks.
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-5/>
- R15. IPCC AR6 WG1, Chapter 11 – Weather and Climate Extreme Events.
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-11/>
- R16. IPCC AR6 WG1, Chapter 9 – Ocean, Cryosphere and Sea Level Change.
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-9/>

- R17. Feldman et al. (2015), Observational determination of surface radiative forcing by CO₂, Nature. <https://www.nature.com/articles/nature14240>
- R18. Harries et al. (2001), Increases in greenhouse forcing inferred from outgoing longwave spectra, Nature. <https://www.nature.com/articles/35066553>
- R19. NASA / Zhu et al., Carbon dioxide fertilization greening Earth. <https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/goddard/carbon-dioxide-fertilization-greening-earth-study-finds/>
- R20. ifo Institut, Europäische Kooperation kann Kosten des Klimaschutzes bis 2050 senken, 2024. <https://www.ifo.de/pressemitteilung/2024-05-15/europaeische-kooperation-kann-kosten-des-klimaschutzes-bis-2050-um-248>
- R14. IPCC, News Comment on CMIP7 scenarios, 20.05.2026. <https://www.ipcc.ch/2026/05/20/ipcc-news-comment-scenarios/>
- R15. van Vuuren et al. (2026), The Scenario Model Intercomparison Project for CMIP7, Geoscientific Model Development 19, 2627–2678. <https://gmd.copernicus.org/articles/19/2627/2026/>
- R16. WCRP/CMIP, Explainer: Scenarios for CMIP7, 22.05.2026. <https://wcrp-cmip.org/explainer-scenarios-for-cmip7/>
- R17. Hausfather et al. (2020), Evaluating the Performance of Past Climate Model Projections, Geophysical Research Letters 47. <https://doi.org/10.1029/2019GL085378>
- R18. NASA, Sea Level – Earth Indicator, Stand August 2026. <https://science.nasa.gov/earth/explore/earth-indicators/sea-level/>
- R19. IPCC AR6 WGI, Chapter 9 – Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-9/>
- R20. World Bank, World GDP (current US\$), 2025: 118.35 trillion US\$. <https://data.worldbank.org/country/world>
- R21. European Central Bank, USD/EUR reference exchange rate, annual average 2025: 1.1300 USD per EUR. <https://data.ecb.europa.eu/data/concepts/united-states-dollar>
- R22. IPCC AR6 WGII, Chapter 16 – aggregate economic impact estimates and evidence of possible net benefits at low warming in some estimates/regions. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/chapter/chapter-16/>
- R23. Tol, R.S.J. (2009), The Economic Effects of Climate Change, Journal of Economic Perspectives 23(2), 29–51. <https://www.aeaweb.org/articles?id=10.1257/jep.23.2.29>
- R24. Kotz et al. (2024), Climate damage projections beyond annual temperature, Nature Climate Change 14, 551–557. <https://www.nature.com/articles/s41558-024-01990-8>

101. Schlussformel der Klimapolitikfolgenabschätzung

Für jede konkrete Maßnahme gilt abschließend dieselbe Gleichung: global zusätzlich vermiedene Emissionen × physischer Endnutzen je Emissionseinheit + lokale Zusatznutzen – reale gesellschaftliche Zusatzkosten – Nebenwirkungen – Opportunitätskosten. Wo der physische Endnutzen nicht belastbar monetarisiert werden kann, muss er in natürlichen Einheiten ausgewiesen bleiben. Die Entscheidung darf dann nicht durch einen erfundenen Geldwert scheinpräzise gemacht werden.

Die entscheidende Kennzahl des Ambitionsniveaus ist damit nicht die politische Zielerreichung in Prozent, sondern der zusätzliche globale Endnutzen der nächsten eingesetzten Ressource. Diese Logik erlaubt es, Klimapolitik weder zu idealisieren noch pauschal zu verwerfen. Sie behandelt sie wie jede andere weitreichende Präventionsintervention: mit einer offenen, nachvollziehbaren Nutzen-Aufwand-Rechnung.