Historische Emissionen von Kohlendioxid in den Modellen I bis VI

Zeitlich verfeinerte Neuberechnung von 1826 bis 2025 mit vollständig gekoppelter Antwort der Quellen und Senken

Dr. Klaus Retzlaff und Proto

Eine wissenschaftliche Kooperation von Mensch und KI

Version 1.0 · 27. November 2026 · Datenstand und Abruf 27. November 2026

Ergebnis

Die bisherige glatte anthropogene Emissionsfunktion wird durch eine historische Jahresbilanz mit ergänzten Monats- und Tagesprofilen ersetzt. Alle sechs Modellvarianten behalten ihre Anfangsbestände, Prozessparameter und den historischen Temperaturpfad der Vorstudie. Die drei Parameterfälle schwach, mittel und stark ergeben zusammen 18 Hauptläufe. Die jeweils erreichte Gesamt-CO_2-Konzentration steuert weiterhin die Ozeanaufnahme, die CO_2-abhängige Landaufnahme und die Verwitterung. [1, 2; eigene Rechnung]

Jahresmittel 2025	Schwach [ppm]	Mittel [ppm]	Stark [ppm]
Modell IV	457,93	491,82	540,37
Modell V	448,50	489,52	545,33
Modell VI	448,19	489,22	544,96

Der beobachtete globale Vergleichswert beträgt 425,63 ppm. Der kleinste Modellwert liegt mit 448,19 ppm um 22,56 ppm darüber. Die historische Emissionsgeschichte erhöht die Werte 2025 gegenüber der vorigen glatten Quelle um 1,40 bis 2,97 ppm. Eine Verbesserung der absoluten Übereinstimmung folgt aus der feineren Datengrundlage somit nicht. [13; eigene Rechnung]

Die unterjährliche Verfeinerung allein ist für die langfristige Rechnung sehr klein: Bei identischen historischen Jahresmengen ändern sich die Jahresmittel 2025 um höchstens 0,0031 ppm; über alle 200 Jahresmittel beträgt die größte Änderung 0,0460 ppm. Der relative Nettoeffekt der anthropogenen Quelle am modellierten Gesamtbestand erreicht 2025 je nach Fall 35,72 bis 41,45 Prozent. Dieser Anteil enthält die veränderten Senken und Rückflüsse und bezeichnet keine molekulare Herkunftsfraktion.

1 Fragestellung und Anschluss an die Modellreihe

Die Untersuchung setzt die Studie mit historischem Temperaturverlauf unmittelbar fort. Dort wurde die ursprünglich lineare Erwärmung durch einen beobachtungs- und reanalysegestützten Temperaturindex für 1826–2025 ersetzt. Die anthropogene Quelle blieb zunächst eine glatte Funktion, die eine Gesamtemission und einen Wert für 2025 näherungsweise erfüllte. Der neue Schritt betrifft ausschließlich die historische Emissionsgeschichte und deren zeitliche Darstellung. [1, 2]

Die Hauptrechnung beginnt am 1. Januar 1826 und endet am 1. Januar 2026; sie enthält 200 vollständige Kalenderjahre. In sämtlichen Fällen beträgt die Anfangskonzentration 282,7 ppm. Die unveränderten Referenzspeicher gehören weiterhin zum Zustand bei 13,5 °C. Der historische erste Januarwert liegt davon abweichend bei etwa 13,0267 °C. Ein flussfreies Gleichgewicht unter dem tatsächlichen ersten Monatsantrieb wird deshalb ebenso wenig behauptet wie in der Vorstudie.

Die Paare I/IV, II/V und III/VI teilen jeweils dieselben Prozessgleichungen. I–III besitzen keine zusätzliche anthropogene Quelle, IV–VI dieselbe historische Quelle. Schwach, mittel und stark bezeichnen die bisherigen Parameterkombinationen des Kohlenstoffkreislaufs. Es handelt sich nicht um drei verschiedene menschliche Emissionspfade. Die Bezeichnungen bleiben zur Vergleichbarkeit erhalten; ihnen wird keine Wahrscheinlichkeit zugewiesen.

Modellpaar	Landdarstellung	Ozeandarstellung	Zusätzliche Quelle
I und IV	Aggregierte CO_2-Kapazität und thermisches Gedächtnis	Oberfläche und Tiefe	Nur IV
II und V	Dynamische Vegetation und Boden	Oberfläche und Tiefe	Nur V
III und VI	Vegetation und Boden in sechs Breitenzonen	Sechs Oberflächenzonen und Tiefe	Nur VI

Die Temperatur wird in beiden Läufen jedes Paares identisch vorgegeben. Die Rechnung ohne direkte Quelle ist damit ein bedingter Vergleich unter der historischen Temperatur, keine vollständige Rekonstruktion einer Erde ohne Menschheit. Eine zusätzliche, selbst berechnete Erwärmung durch das anthropogene CO_2 wird in dieser Modellstufe nicht auf die bereits vorgegebene Temperatur aufgeschlagen.

2 Welche zeitliche Auflösung die Quellen tragen

Ein feines Ausgaberaster, die zeitliche Information eines Inventars und die Schrittweite eines Integrators sind verschiedene Dinge. Jahresstatistiken können mit Saisonprofilen in Monate, Tage oder Stunden zerlegt werden. Die Zahl der ausgegebenen Werte wächst dabei; der historische Informationsgehalt wächst nur, soweit zusätzliche unabhängige Aktivitätsdaten oder belastbare Rekonstruktionsannahmen hinzukommen.

Zeitraum	Fossile Darstellung	Verwendete Quelle	Informationsbasis
1826 bis 1949	Jährlich	GCB 2026	Historische Jahresinventare
1950 bis 1969	Monatlich rekonstruiert	CDIAC 2016, normiert auf GCB	Überwiegend übertragene Saisonmuster
1970 bis 2018	Täglich rekonstruiert	Li et al. 2026, normiert auf GCB	Monatsinventare, Meteorologie und Kalender
2019 bis 2025	Tägliche Abschätzung	Carbon Monitor, normiert auf GCB	Zeitlich variable Aktivitätsindikatoren

Für Netto-Landnutzungsänderungen und Zementkarbonatisierung bleiben die Eingänge jährlich. Ihre Verteilung auf die kürzeren Integrationsintervalle erfolgt gleichmäßig innerhalb des Kalenderjahres. Daher ist auch nach 2019 nicht jede Komponente der gesamten anthropogenen Nettoquelle täglich bestimmt. [3–12]

Die ausgewählte Quellenfolge liefert 124 Jahresintervalle, 240 Monatsintervalle und 20.454 Tagesintervalle. Durch die zusätzlichen Monatsgrenzen des unveränderten Temperaturpfades entstehen 22.182 gemeinsame Antriebsintervalle. Diese Zahl bezeichnet das Rechengitter und nicht 22.182 unabhängige Emissionsbeobachtungen.

CEDS stellt formal monatliche historische Felder ab 1750 bereit, denen ebenfalls Jahresinventare und aufgeprägte Saisonprofile zugrunde liegen. Für die frühe Phase wird hier keine zusätzliche, durch Beobachtungen nicht gestützte Monatsgeschichte eingeführt. Der Beginn des CDIAC-Produkts 1950 ist eine Datensatzgrenze und kein abrupter Sprung der Beobachtungsqualität. [7, 8, 14]

Stündliche globale Felder existieren ebenfalls. Ihre Einordnung und der Grund, weshalb der Hauptlauf Tagesprofile als feinste begründete dynamische Information verwendet, werden in Abschnitt 5 erläutert. Die vorliegende Auswahl wird nicht als absolut feinste formal vorhandene Dateiauflösung bezeichnet.

3 Historische Jahresmengen und Quellenabgrenzung

Die mengenmäßige Grundlage ist die Arbeitsmappe Global Carbon Budget 2026 v0.1. Das zugehörige Methodenpapier liegt am Abrufdatum als ESSD-Preprint vor. Die verwendete Datei stimmt bytegenau mit der in der Vorstudie archivierten Arbeitsmappe überein. Unterschiede der Modellresultate entstehen daher ab 1850 nicht durch eine zwischenzeitliche Revision dieser Jahresdaten. [3, 4]

$$E_y = E_{\text{fossil},y} + E_{\text{LUC},y} - S_{\text{carb},y}$$

E_fossil ist hier die fossile und industrielle Bruttoquelle vor Zementkarbonatisierung. E_LUC ist die Nettoquelle aus Landnutzungsänderung; S_carb bezeichnet die Aufnahme durch Zementkarbonatisierung. Die natürliche Land- und Ozeansenke des GCB wird nicht zusätzlich von dieser Quelle abgezogen. Diese Senken entstehen in der vorliegenden Untersuchung aus den eigenen Modellgleichungen; ein vorheriger Abzug und eine weitere Modellaufnahme würden sie doppelt berücksichtigen.

Komponente 2025	GtC im Jahr	Vorzeichen in E	Bedeutung
Fossil und Industrie	10,642769	+	Vor Karbonatisierung
Netto-Landnutzung	1,187877	+	Mittel der Bookkeepingmodelle
Karbonatisierung	0,163005	−	Anthropogen geschaffene Senke
Nettoquelle	11,667641	=	Gemeinsamer Modelleingang

Die Rechnung verwendet GtC als Kohlenstoffmasseneinheit; 1 GtC entspricht 10^{15} g Kohlenstoff. Für eine Angabe als CO_2-Masse wird die GCB-Konvention 1 GtC = 3,664 $GtCO_2$ verwendet. Die Nettoquelle 2025 entspricht damit rund 42,75 $GtCO_2$. Die Umrechnung des atmosphärischen Modellbestands bleibt dagegen wie zuvor bei κ = 2,12 GtC je ppm; sie wird nicht zugleich mit der Quelle geändert.

Die fossile GCB-Reihe reicht bis 1750 zurück. Die Nettolandnutzung beginnt in der ausgewählten globalen Tabelle erst 1850, die Karbonatisierung 1931. Leere Karbonatisierungszellen werden vor 1931 in dieser Budgetkonvention nicht abgezogen. Daraus folgt keine Beobachtung einer exakt verschwindenden Senke. Das Projektionsjahr 2026 wird nicht verwendet. [4]

Ab 1850 stammt die Nettolandnutzung aus dem GCB-Mittel von BLUE, OSCAR und LUCE. Eingeschlossen sind die dort vorgenommenen Ergänzungen für Torfprozesse. Die frühe Ergänzung vor 1850 hat eine andere Quellenabdeckung und wird deshalb getrennt beschrieben. [3–6]

4 Die frühe Landnutzung und die Anfangsbedingung

Für 1826–1849 werden die fehlenden globalen Landnutzungswerte durch E_luc aus dem Autoren-Datensatz OSCAR contribution to the Global Carbon Budget 2025 ergänzt. Verwendet wird die Datenversion v2025 mit OSCAR v3.3. Der Datensatz enthält Jahreswerte ab 1701. Ausgewählt wird ausschließlich die anthropogene Bookkeeping-Nettoquelle; die natürliche Landsenke und die entgangene Senkenleistung werden nicht als zusätzliche Emission hinzugefügt. [5, 6]

Die frühe LUC-Summe beträgt 9,118968 GtC. Diese Datei enthält keine Emissionen aus Torfentwässerung und Torfbränden; für die Frühphase ist diese Komponente somit nicht gesondert erfasst. Am Übergang zu 1850 wechselt außerdem eine einzelne OSCAR-Reihe zu einem ergänzten Mehrmodellmittel. Der Sprung von 0,426554 GtC im Jahr 1849 auf 0,706763 GtC im Jahr 1850 ist deshalb nicht als nachgewiesenes historisches Einzelereignis zu interpretieren.

Positive Emission bei identischer Anfangskonzentration

$$E_{1826} = 0{,}0167536 + 0{,}3299038 = 0{,}3466574 \text{ GtC/a}$$

Die frühere Forderung E(0) = 0 gehörte zur synthetischen Rückextrapolation. Sie ist mit der nun verlangten historischen Emissionsgeschichte unvereinbar: Im Jahr 1826 gab es bereits fossile Emissionen und Landnutzungsänderungen. Die neue Quelle wird deshalb nicht künstlich auf null gesetzt, nicht um ihren Anfangswert vermindert und nicht über eine erfundene Anfahrrampe geglättet.

Unverändert bleibt C(0) = 282,7 ppm in jedem Lauf. Ein gemeinsamer Anfangsbestand verlangt keine identischen Anfangsableitungen. Die historischen Emissionen beginnen als Fluss nach dem gemeinsamen Startzeitpunkt. Vor 1826 emittierter Kohlenstoff wird nicht nochmals als neue Quelle addiert. Seine genaue Verteilung auf die Anfangsspeicher ist durch das bisherige Referenzgleichgewicht allerdings nicht rekonstruiert.

Prüfung des Anschlusses

Zusätzlich wird eine nachvollziehbare Anschlussvariante gerechnet: Die OSCAR-Werte vor 1850 werden mit dem Verhältnis von GCB- zu OSCAR-LUC im gemeinsamen Jahrzehnt 1850–1859 multipliziert. Der Faktor beträgt 1,617111. Diese Variante erhöht die frühe LUC-Summe um 5,627420 GtC. Sie ist eine Sensitivitätsrechnung zum Wechsel der Datenquellen, keine Konfidenzgrenze und keine Kalibrierung an CO_2-Beobachtungen. Die Hauptrechnung verwendet die unveränderten OSCAR-Werte; das Ergebnis der Variante folgt in Abschnitt 22.

5 Monatsprofile Tagesrekonstruktion und Stundenfelder

Die historische Monatsverteilung

Für 1950–1969 werden die zwölf globalen CDIAC-Monatsmassen des Produkts von Andres, Boden und Marland 2016 verwendet. Sie liegen in TgC je Monat vor. Die Jahresmenge wird daraus nicht übernommen; nur die normierten Monatsanteile werden auf die GCB-Menge angewendet. Die zugrunde liegende Methode verwendet übertragene Saisonmuster. Für 1956–1970 standen laut Methodenpapier direkte Monatsdaten nur für australische Kohle zur Verfügung. Eine global beobachtete Monatschronik der 1950er Jahre wird damit nicht behauptet. [7, 8]

Die Rekonstruktion ab 1970

Li et al. veröffentlichen 2026 eine globale Tagesreihe für 1970–2024. Die vorliegende Studie nutzt daraus 1970–2018. Tagesmuster werden mit maschinellem Lernen beziehungsweise Heizgradtagen aus monatlichen Inventaren, Meteorologie und Kalendermerkmalen rekonstruiert. Die Übertragung von Beziehungen aus 2019–2024 auf frühere Energiesysteme ist eine Modellannahme. Luftfahrt ist im Transportkanal enthalten; für internationale Schifffahrt fehlt vor 2019 eine eigene Tagesrekonstruktion. Die Jahresnormierung weist solchen fehlenden Anteilen dasselbe Zeitprofil wie der verfügbaren Gesamtreihe zu. [9, 17]

Aktivitätsgestützte Tageswerte ab 2019

Für 2019–2025 wird der aktuelle Carbon-Monitor-Export verwendet. Die sechs WORLD-Sektoren enthalten Stromerzeugung, Industrie, Gebäude, Bodenverkehr sowie nationale und internationale Luftfahrt. Internationale Schifffahrt ist laut datiertem Methodenvermerk in ROW/Industry enthalten und wird nicht nochmals hinzugefügt. Die Tageswerte werden aus Aktivitätsdaten und Emissionsfaktoren abgeschätzt, nicht als globaler Fluss direkt gemessen. Die vollständigen 2.557 Tage einschließlich Schalttagen sind vorhanden. [10–12]

Warum Stundenfelder nicht zusätzliche historische Beobachtungen sind

ODIAC, TIMES, CAMS-TEMPO und OCO-2-MIP-Produkte können stündliche Felder liefern. Die geprüfte NOAA-Dokumentation erläutert deren Aufbau aus gröberen Mengen und Tageszeit- beziehungsweise Wochentagsprofilen. Einige Profile stützen sich auf regionale Stundenaktivitäten, bilden aber keine lückenlose globale Stundeninventur aller Sektoren. Der Hauptlauf verwendet daher Tageswerte als feinste hier durch die ausgewählten dynamischen Daten begründete Darstellung. Eine Stundenunterteilung wäre zusätzliche Disaggregation. Eine numerische Sensitivität gegenüber einem externen Stundenprofil wurde hier nicht gerechnet. [15, 16]

6 Massenerhaltende Übertragung auf das Rechengitter

Die Jahresmengen des Quelleninventars und die feineren Zeitprofile werden getrennt verarbeitet. Das verhindert, dass Unterschiede der Sektorabdeckung oder des Veröffentlichungsstands verschiedener Datensätze unbemerkt zu einem Wechsel der gesamten Emissionsmenge führen. Die normierten Anteile sind dimensionslos; Emissionsmassen und Emissionsraten werden ausdrücklich unterschieden.

$$w_{y,j} = m_{y,j}^{\text{Profil}} / \sum_j m_{y,j}^{\text{Profil}}, \qquad \sum_j w_{y,j} = 1$$

$$\Delta t_y = 1\,\text{a}, \qquad m_{y,j}^{\text{fossil}} = E_{\text{fossil},y}\,\Delta t_y\,w_{y,j}$$

$$E_{y,j} = m_{y,j}^{\text{fossil}} / \Delta t_{y,j} + E_{\text{LUC},y} - S_{\text{carb},y}$$

Die Zeit t wird wie in der Vorstudie in Kalenderjahranteilen seit dem 1. Januar 1826 geführt. Ein Tag besitzt daher die Länge 1/365 beziehungsweise 1/366 Modelljahre; Monate haben ihre tatsächlichen 28, 29, 30 oder 31 Tage. Für die frühen Jahre ohne unterjährige Information bleibt die jährliche Rate konstant. Alle Reihen werden an ihren Intervallgrenzen und an den monatlichen Temperaturgrenzen zusammengeführt.

$$\sum_j E_{y,j}\,\Delta t_{y,j} = E_y\,\Delta t_y$$

Diese Identität wurde für jedes der 200 Jahre geprüft. Die größte Abweichung der bei der Erstellung summierten Quellenmassen beträgt weniger als 2×10^{-13} GtC. Die gemeinsame Nettoquelle umfasst insgesamt 764,227194 GtC. Die jährliche und die fein aufgelöste Rechnung verwenden exakt dieselbe Jahresbilanz, soweit numerische Rundung dies zulässt.

Drei klar getrennte Vergleiche

Rechnung	Jahresmengen	Unterjährige Verteilung	Zweck
Vorstudie	Glatte Näherungsfunktion	Kontinuierliche Exponentialfunktion	Unmittelbare Referenz
Jahreskontrolle	Historisch	Konstante Rate je Jahr	Wirkung der historischen Mengenfolge
Feiner Hauptlauf	Dieselben historischen Mengen	CDIAC sowie Li und Carbon Monitor	Zusatzwirkung der Zeitprofile

Die Monatsreihe des Temperaturindex bleibt in allen drei Vergleichen gleich. Es wird nicht gleichzeitig auf eine neue tägliche Temperaturreihe umgestellt. Damit lässt sich die Wirkung des Emissionswechsels von einer weiteren Änderung des Temperaturantriebs unterscheiden. Die tägliche Temperaturvariante der Vorstudie bleibt ein gesonderter, bereits dokumentierter Kontrollversuch. [1, 2]

7 Zusätzlicher Partialdruck und nichtlineare Systemantwort

Anthropogen emittierter Kohlenstoff erhöht die Gesamtkonzentration und damit bei unverändertem Gesamtdruck den CO_2-Partialdruck. Dadurch ändern sich Austauschflüsse und Speicher. Ein getrennt berechneter Konzentrationszuschlag, der erst am Ende auf den unveränderten Lauf ohne Quelle addiert würde, wäre für dieses System unzulässig. Die vorliegende Rechnung speist die Quelle in die Differentialgleichungen ein und integriert anschließend sämtliche Zustände gemeinsam.

$$\dot{x}_0 = F(x_0, T), \qquad \dot{x}_E = F(x_E, T) + bE(t)$$

$$\dot{\delta x} = F(x_0 + \delta x, T) - F(x_0, T) + bE(t)$$

x enthält Atmosphäre, Ozean- und Landbestände sowie die weiteren Modellzustände; δx = x_E − x_0. Der Ausdruck F wird in beiden Rechnungen am jeweils eigenen Zustand ausgewertet. Die Differenzgleichung setzt keine Linearität voraus. Sie enthält ausdrücklich die Änderung der natürlichen Austauschflüsse durch die zusätzliche Quelle. Der Unterschied der vollständig gerechneten Läufe ist daher ein Nettoeffekt einschließlich veränderter Senken und Rückflüsse.

Ozean und Biosphäre verwenden jeweils das Gesamt CO_2

$$F_{AO} = k_g(C - C_w), \qquad C_w = C_0 \exp(\alpha \Delta T_s)(1 + \Delta O_s / O_{s0})^R$$

Die gezeigte Schreibweise gilt für den aggregierten Ozean der Modelle I/II und IV/V. III/VI verwenden dasselbe Austauschprinzip in den einzelnen Breitenzonen mit temperaturabhängigem Löslichkeitsfaktor und offenen Wasserflächen.

$$N = N_{\text{Klima}}(C/C_0)^{\eta}$$

Der Ozeanfluss hängt sowohl von der atmosphärischen Konzentration als auch vom eigenen Oberflächenkohlenstoffbestand ab. Die Pflanzenproduktion der Modelle II/V und III/VI verwendet die jeweils erhöhte Konzentration; Vegetation, Bodenumsatz und Bodenatmung reagieren auf die daraus entstehenden eigenen Speicherbestände. In I/IV ist die CO_2-abhängige Landaufnahme als $\beta(C - C_0)$ enthalten und bereits in die wirksame atmosphärische Kapazität eingerechnet. [1]

Auch die Verwitterung verwendet die unveränderte Konzentrationsabhängigkeit $(C/C_0)^{0,30}$. Permafrost- und Gletschervorfeldterme besitzen im bisherigen Modell dagegen nur eine Temperaturabhängigkeit. Bei identischem vorgegebenem Temperaturverlauf sind sie in einem Modellpaar deshalb gleich. Es wird keine zusätzliche CO_2-Abhängigkeit nachträglich erfunden.

Die Prüfung des übernommenen Prozesscodes bestätigt diese Auswertung mit dem Gesamt-CO_2. Die neue Quelleneinspeisung verändert keine der vorhandenen Prozessfunktionen. Dieser Punkt ist für die Interpretation der folgenden Anteilsgrafik entscheidend.

8 Bilanzgleichungen und numerische Kontrolle

Der unveränderte Umrechnungsfaktor der atmosphärischen Speicheränderung ist κ = 2,12 GtC/ppm. Für I/IV enthält die atmosphärische Gleichung zusätzlich die algebraische Landkapazität β. Daher wird der neue Quellfluss dort durch κ + β und in den übrigen Familien durch κ geteilt. Die CO_2-abhängige Landaufnahme wird nicht ein zweites Mal addiert.

$$(\kappa + \beta)\dot{C} = \dot{L}_T + \dot{P} - \dot{B} - F_{AO} - \dot{G} + E \quad \text{in I/IV}$$

$$\kappa\dot{C} = -\dot{V} - \dot{S} + \dot{P} - \dot{B} - F_{AO} - \dot{G} + E \quad \text{in II/V und III/VI}$$

P ist hier der kumulierte Permafrostverlust, B die zusätzliche Speicherung auf Gletschervorfeldern und G die zusätzliche geologische Speicherung. Die Definitionen und Vorzeichen entsprechen der Vorstudie. Für die Bestandsdifferenzen eines Paars folgt die globale Bilanz des abgegrenzten Modellsystems:

$$\kappa\Delta C + \Delta O + \Delta L + \Delta P_{\text{Bestand}} + \Delta B + \Delta G = \int_0^t E\,(s)\,ds$$

Der Produktionsintegrator verwendet Runge–Kutta vierter Ordnung und schneidet jeden Schritt an sämtlichen Quellen- und Temperaturgrenzen. Die größte interne Schrittweite beträgt wie zuvor 0,02 Jahre; bei Tagesdaten ist sie entsprechend kleiner. Jahresmittel werden aus einem zusätzlich integrierten Konzentrationsintegral berechnet. Das Jahresmittel 2025 wird nicht mit dem Endpunkt am 1. Januar 2026 verwechselt.

Kontrolle	Gegenstand	Ergebnis	Bedeutung
Anfangswerte	Alle 18 Läufe	Exakt 282,7 ppm	Gemeinsamer Start
Paarbilanz	Alle neun Paare	Rest unter 10^{-9} GtC	Quelle und Speicher konsistent
Unabhängiger Integrator	III und VI im mittleren Fall	Jahresmittel unter 6×10^{-9} ppm abweichend	Numerische Gegenprüfung
Quelle ausgeschaltet	Vergleich mit Vorstudie	Unter 4×10^{-9} ppm abweichend	Unveränderte Prozessantwort

Die unabhängige Nachrechnung verwendet DOP853 mit eigener Quelleneinspeisung und eigenem Integrationsablauf. Sie prüft die numerische Umsetzung, nicht die physikalische Richtigkeit sämtlicher vereinfachter Modellannahmen. Eine kleine numerische Abweichung kann keinen strukturellen Fehler ausschließen.

9 Der Verlauf der anthropogenen Emissionen

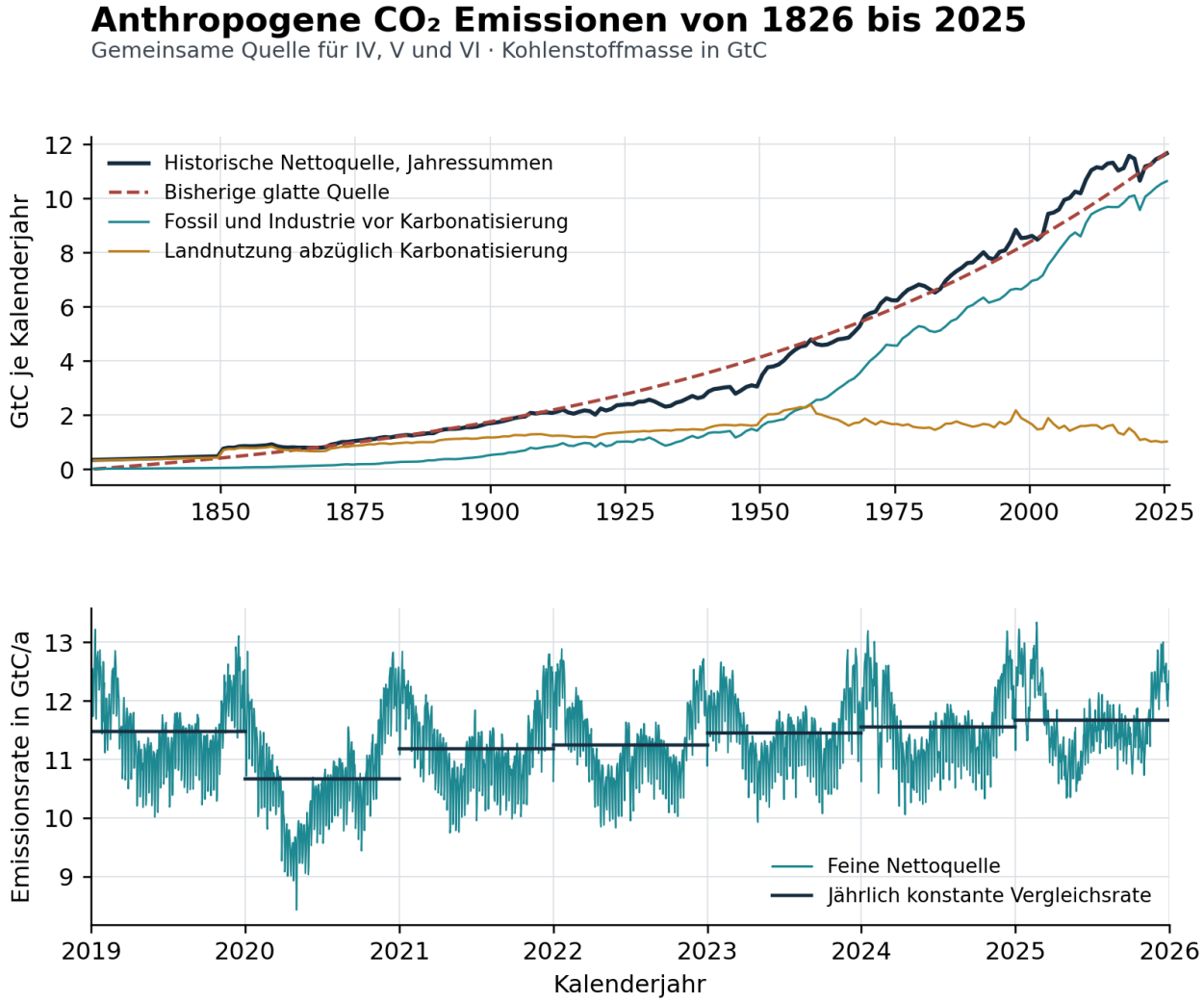


Abbildung 1. Oben: historische Jahresbilanz und frühere glatte Quelle. Unten: Tagesprofil 2019–2025 mit identischer jährlicher Gesamtmenge. Die feinere Kurve enthält tägliche fossile Profilinformation; Landnutzung und Karbonatisierung bleiben jährlich. Daten aus [3–12], Zusammenführung und Darstellung durch die Autoren.

Der Einbruch 2020 ist in der historischen Mengenfolge und im Tagesprofil sichtbar. Die glatte frühere Funktion konnte solche Ereignisse nicht abbilden. Der größte Einfluss auf eine über Jahrzehnte reagierende Speicherbilanz entsteht jedoch aus der historischen Mengenfolge und den Speicherzeiten; die Wirkung der zusätzlichen Verteilung innerhalb der Jahre wird separat geprüft.

Die Achsen zeigen Kohlenstoffmasse beziehungsweise Kohlenstoffmassenrate. Die tägliche Kurve in GtC/a bezeichnet die auf ein Jahr hochgerechnete momentane Intervallrate. Die tatsächlich an einem Tag emittierte Masse erhält man durch Multiplikation mit dessen Anteil am Kalenderjahr. Diese beiden Größen dürfen nicht gleichgesetzt werden.

10 Mengenverschiebung gegenüber der glatten Quelle

Die frühere Funktion wurde an gerundete Literaturwerte angepasst: 755 GtC für 1850–2025 und 11,7 GtC im Kalenderjahr 2025. Sie beschreibt keine Rekonstruktion jedes einzelnen Jahres. Die historische GCB-Folge besitzt für 1850–2025 nahezu dieselbe Gesamtsumme, verteilt sie aber anders über die Zeit. [1, 4; eigene Aufbereitung]

$$E_{\mathrm{alt}}(t) = 1{,}29541485346\,[\exp(0{,}0115576943951t) - 1]\ \mathrm{GtC/a}$$

Zeitraum	Historisch [GtC]	Bisher [GtC]	Differenz [GtC]
1826 bis 1849	9,856	4,740	5,116
1850 bis 1949	173,793	192,385	-18,592
1950 bis 1969	90,464	96,275	-5,810
1970 bis 2018	410,870	387,517	23,353
2019 bis 2025	79,244	78,823	0,420
1850 bis 2025	754,371	755,000	-0,629
1826 bis 2025	764,227	759,740	4,487

Für die fünf ersten, nicht überlappenden Zeitblöcke summiert sich die Differenz auf +4,487311 GtC. Die zusätzlich aufgeführten letzten zwei Zeilen sind Gesamtsummen und dürfen nicht nochmals zu den Blöcken addiert werden. Der größte Gegensatz liegt zwischen einer geringeren historischen Menge vor 1970 und einer größeren Menge im Zeitraum 1970–2018. Die späten Emissionen haben bis 2025 weniger Zeit, sich auf langsame Speicher zu verteilen.

Das ist eine physikalisch plausible Erklärung für höhere verbleibende atmosphärische Bestände; die Größe folgt hier aus der vollständigen nichtlinearen Integration. Sie wird nicht aus einer angenommenen festen Verweilzeit oder einer konstanten Aufnahmequote abgeleitet. Die frühe LUC-Ergänzung erhöht zugleich die Gesamtquelle gegenüber der alten künstlichen Anfahrrampe.

Die Nettoquelle im Jahr 2025 sinkt gegenüber dem alten Zielwert leicht von 11,700000 auf 11,667641 GtC. Trotzdem liegen die modellierten Konzentrationen höher. Eine Konzentration ist ein Speicherbestand mit Vorgeschichte; die aktuelle Jahresrate allein legt sie nicht fest.

Die veränderten Speicherantworten verhindern auch eine einfache Umrechnung der zusätzlichen 4,487311 GtC in einen für alle Fälle gleichen Konzentrationszuwachs. Die Verteilung im Zeitverlauf und die Reaktion der Senken müssen zusammen berechnet werden.

11 Ergebnisse der Modelle im Jahr 2025

Die folgende Tabelle enthält integrierte Jahresmittel. Alle neun Fälle mit anthropogener Quelle verwenden dieselbe historische Emissionsreihe. Die Unterschiede entstehen aus der jeweiligen Modellstruktur und den unveränderten Parameterkombinationen. Die Darstellung mit zwei Dezimalstellen dient dem nachvollziehbaren Rechenvergleich; sie bezeichnet keine physikalische Vorhersagegenauigkeit von 0,01 ppm.

Mit anthropogener Quelle	Schwach [ppm]	Mittel [ppm]	Stark [ppm]
IV	457,93	491,82	540,37
V	448,50	489,52	545,33
VI	448,19	489,22	544,96

Ohne direkte Quelle	Schwach [ppm]	Mittel [ppm]	Stark [ppm]
I	288,05	299,15	317,20
II	288,29	300,07	319,72
III	287,51	299,34	319,09

Die unteren Werte stellen die bedingten Vergleichsrechnungen unter derselben historischen Temperatur dar. Sie enthalten somit weiterhin die Temperaturwirkung auf Ozean, Vegetation, Boden, Permafrost und geologische Prozesse. Sie sind keine Beobachtung eines rein natürlichen CO_2-Verlaufs.

Abstand zu NOAA 2025	Schwach [ppm]	Mittel [ppm]	Stark [ppm]
IV	32,30	66,19	114,74
V	22,87	63,89	119,70
VI	22,56	63,59	119,33

Das globale NOAA-Jahresmittel von 425,63 ppm wird von sämtlichen Fällen mit Quelle überschritten. Die kleinste Differenz ergibt sich für VI schwach mit +22,56 ppm. Der höchste Wert tritt für V stark mit 545,33 ppm auf. Eine Reihenfolge nach Modellnummer ist deshalb nicht automatisch eine Reihenfolge nach Beobachtungsnähe. [13; eigene Rechnung]

Die Einführung räumlicher Gewichte in III/VI verändert die Ergebnisse gegenüber II/V nur begrenzt. Unter dem vorgegebenen historischen Antrieb sind V und VI in jedem Parameterfall deutlich näher beieinander als die schwachen, mittleren und starken Fälle derselben Modellfamilie. Für diese Rechnung dominiert damit die Parameterwahl den Unterschied zwischen den beiden detaillierteren Strukturen.

12 Die Konzentrationsverläufe aller Modellpaare

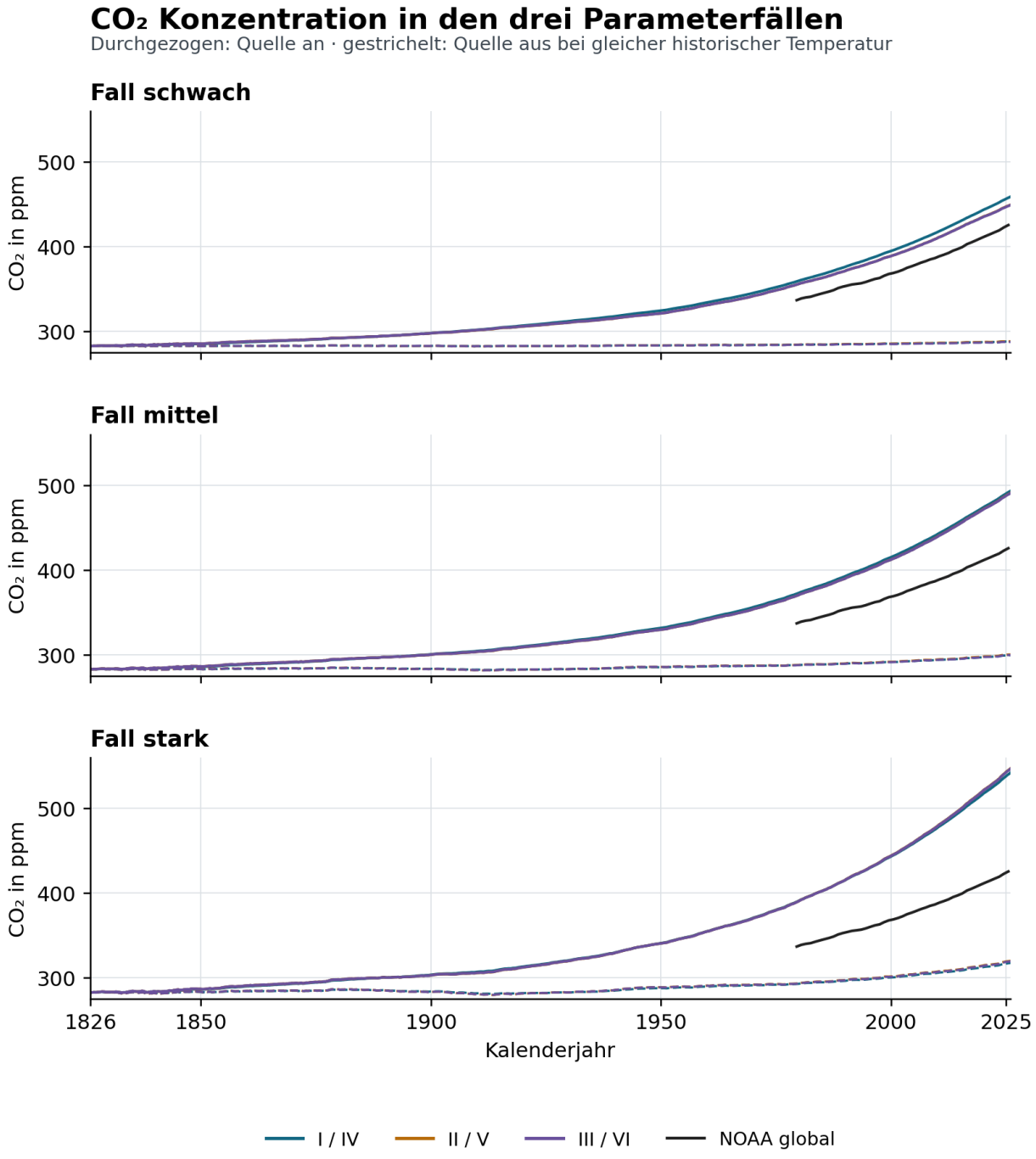


Abbildung 2. Vollständige Verläufe des feinen Hauptlaufs. Jeder Teil zeigt einen der drei Parameterfälle; Farben unterscheiden die Modellpaare. Durchgezogene Linien enthalten die gemeinsame anthropogene Quelle, gestrichelte Linien schalten nur diese Quelle aus. Der historische Temperaturpfad bleibt in beiden Läufen identisch. Die schwarze Linie zeigt globale NOAA-Jahresmittel. [13; eigene Rechnung]

Die bereits in der Vorstudie erkennbare Überschätzung bleibt bestehen. Das spätere Auseinanderlaufen der Parameterfälle entsteht aus unterschiedlichen natürlichen Freisetzungen und aus unterschiedlichen Antworten auf das zusätzliche CO_2. Beides ist in den durchgezogenen Linien gemeinsam enthalten.

13 Was der relative anthropogene Beitrag hier bedeutet

Der Begriff anthropogener Anteil kann eine Herkunftsfraktion von Kohlenstoffatomen, einen Anteil am gesamten atmosphärischen Bestand, einen Anteil am Anstieg seit einem Ausgangsjahr oder eine Emissionsquote bezeichnen. Diese Größen haben verschiedene Nenner und sind nicht austauschbar. Die vorliegenden Modelle bestimmen keine molekulare Herkunftsfraktion. Sie enthalten dafür insbesondere keine vollständige Tracerrechnung mit getrennten Bruttoaustauschflüssen.

$$f_E(t) = 100\,\frac{C_{\mathrm{mit}}(t) - C_{\mathrm{ohne}}(t)}{C_{\mathrm{mit}}(t)}$$

C_mit bezeichnet die Konzentration des vollständig gekoppelten Laufs mit Quelle. C_ohne bezeichnet den vollständig gekoppelten Lauf ohne diese Quelle und ist nicht der konstante Anfangswert von 282,7 ppm. Der Zähler ist der zusätzliche atmosphärische Bestand, der nach veränderter Aufnahme und veränderten Rückflüssen verbleibt. Der Nenner ist die Gesamtkonzentration desselben Laufs mit Quelle.

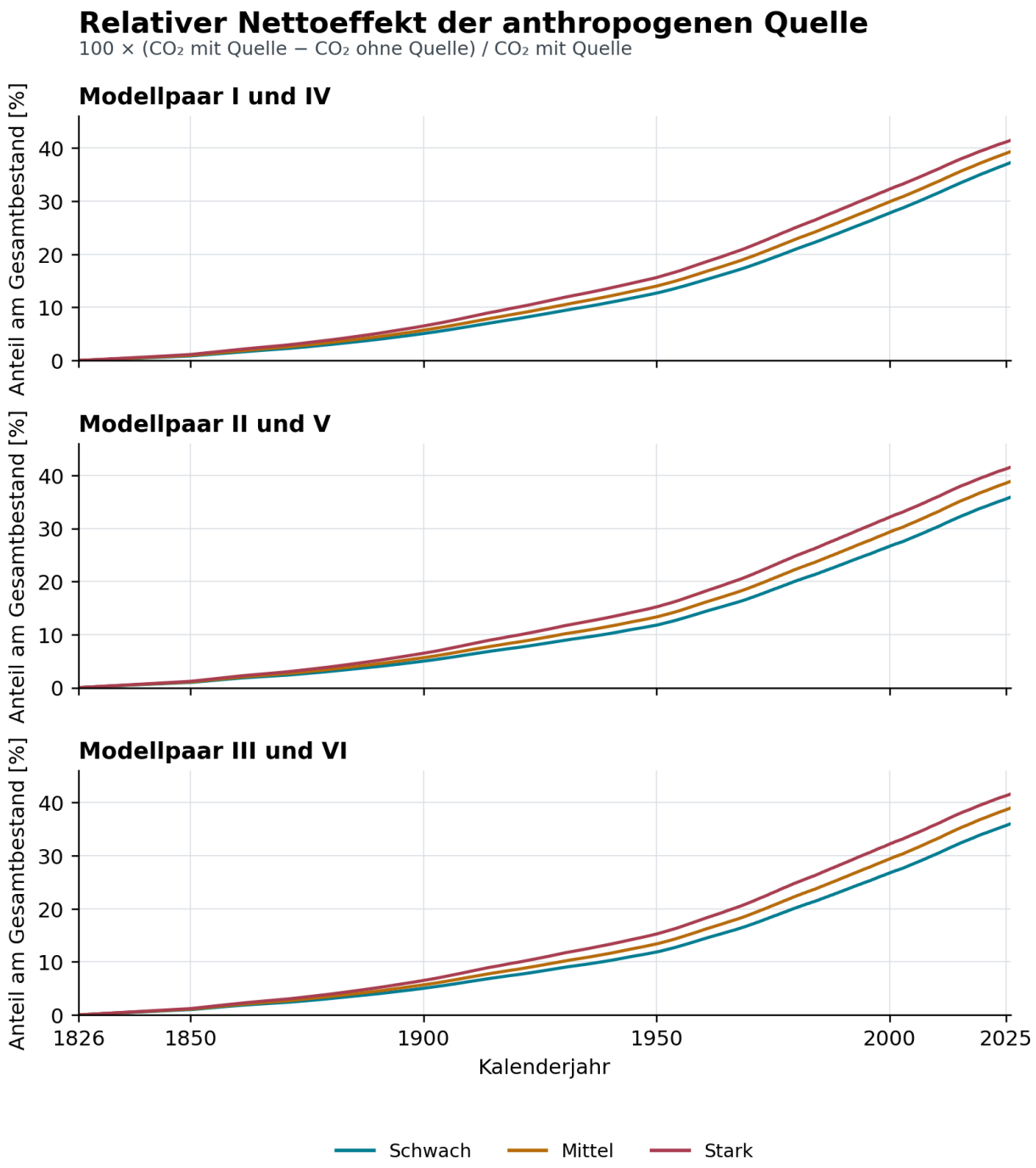
Die Größe heißt deshalb relativer atmosphärischer Nettoeffekt der anthropogenen Quelle bei identischer Temperaturvorgabe. Ihre Berechnung ist auch in einem nichtlinearen System möglich, weil beide Zustandsverläufe vollständig neu integriert werden. Sie setzt nicht voraus, dass die natürliche Komponente unverändert weiterläuft. Ebenso wenig wird ein modellierter Zähler durch den beobachteten NOAA-Gesamtbestand geteilt.

Anteil 2025 aus Jahresmitteln	Schwach [%]	Mittel [%]	Stark [%]
I und IV	37,10	39,17	41,30
II und V	35,72	38,70	41,37
III und VI	35,85	38,81	41,45

In der Zeitgrafik wird der Quotient aus den Zuständen an den feinen Intervallgrenzen gebildet. Die Tabelle verwendet dagegen die Konzentrationsjahresmittel im selben Quotienten. Ein Quotient von Mittelwerten ist formal nicht dasselbe wie der Mittelwert eines Quotienten; die Definition der Tabelle bleibt ausdrücklich erhalten.

Ein Beispiel verdeutlicht die Nenner: VI schwach erreicht im Jahresmittel 448,1911 ppm, der bedingte Lauf III schwach 287,5063 ppm. Der Nettoquelleneffekt ist 160,6848 ppm und damit 35,85 Prozent des gesamten Modellbestands. Bezogen auf den Zuwachs des Mit-Laufs seit 282,7 ppm wären es dagegen rund 97,10 Prozent. Das sind zwei verschiedene, jeweils klar definierte Verhältnisse.

14 Zeitverlauf des relativen Nettoquelleneffekts



Eigene Modellrechnung. Veränderte Senken und Rückflüsse sind enthalten.
Identische historische Temperatur; keine Bestimmung der molekularen Herkunft.

Abbildung 3. Gewünschte Anteilsgrafik. Der zusätzliche atmosphärische Nettoeffekt wird durch den gesamten atmosphärischen Bestand des jeweiligen Mit-Laufs geteilt. Alle vorhandenen Partialdruck-, Speicher- und CO_2-Düngungswirkungen werden in beiden gekoppelten Läufen berücksichtigt. Die Darstellung liefert keine direkt gemessene Herkunftsfraktion und keine vollständige Ursachenattribution bei frei reagierendem Klima.

15 Relative Änderung gegenüber dem gemeinsamen Anfang

$$r_s(t) = 100\,\frac{C_s(t) - 282{,}7\ \text{ppm}}{282{,}7\ \text{ppm}}$$

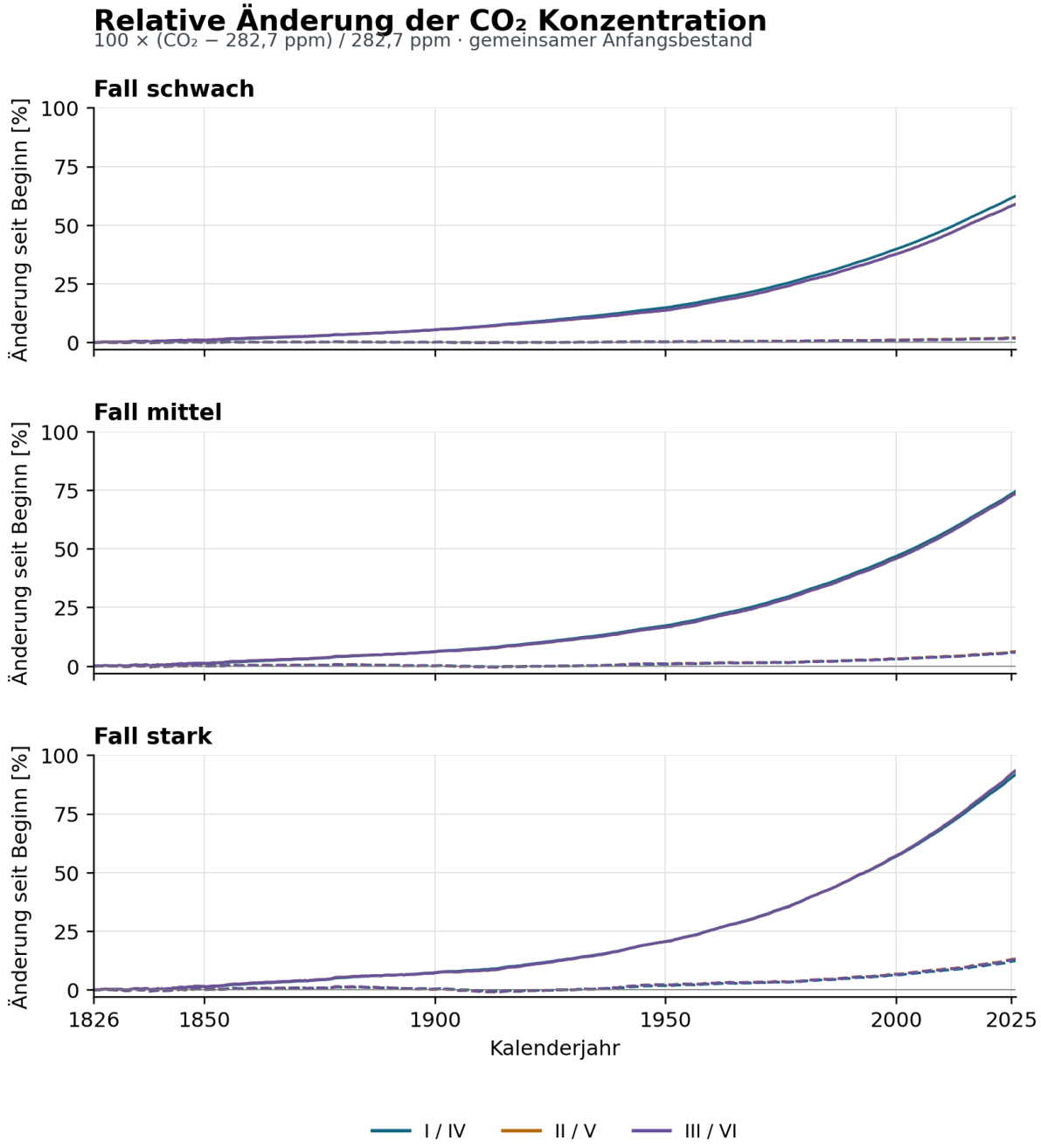


Abbildung 4. Gewünschte Darstellung der relativen Konzentrationsänderung. Alle Kurven verwenden denselben Nenner von 282,7 ppm. Durchgezogene Linien zeigen die Läufe mit menschlicher Quelle; gestrichelte Linien die bedingten Läufe ohne direkte Quelle bei gleicher Temperatur. Die Werte stammen aus der feinen Integration. Die unterschiedlichen Szenarien betreffen Modellparameter und nicht die gemeinsame menschliche Quelle.

Für VI beträgt die Änderung des Jahresmittels 2025 gegenüber dem gemeinsamen Anfang 58,54 Prozent im schwachen, 73,05 Prozent im mittleren und 92,77 Prozent im starken Fall. Diese Werte dürfen nicht mit den Anteilen der vorigen Abbildung gleichgesetzt werden.

16 Zusätzliche Speicherung durch die erhöhte Konzentration

Der Einwand, zusätzliches CO_2 müsse über seinen Partialdruck auch die übrigen Komponenten verändern, lässt sich unmittelbar an den Speicherbilanzen prüfen. Die folgende Tabelle zeigt für III/VI die Bestandsdifferenz zwischen Mit- und Ohne-Lauf am Jahresende 2025. Es handelt sich um zusätzliche Speicherung gegenüber dem jeweiligen Vergleichslauf, nicht um absolute Inventare der einzelnen Speicher.

Zusätzlicher Bestand	Schwach [GtC]	Mittel [GtC]	Stark [GtC]
Atmosphäre	343,129	405,646	482,666
Ozean	138,075	155,169	174,137
Reguläres Land	282,498	202,816	106,746
Geochemie	0,526	0,596	0,678
Kumulierte Quelle	764,227	764,227	764,227

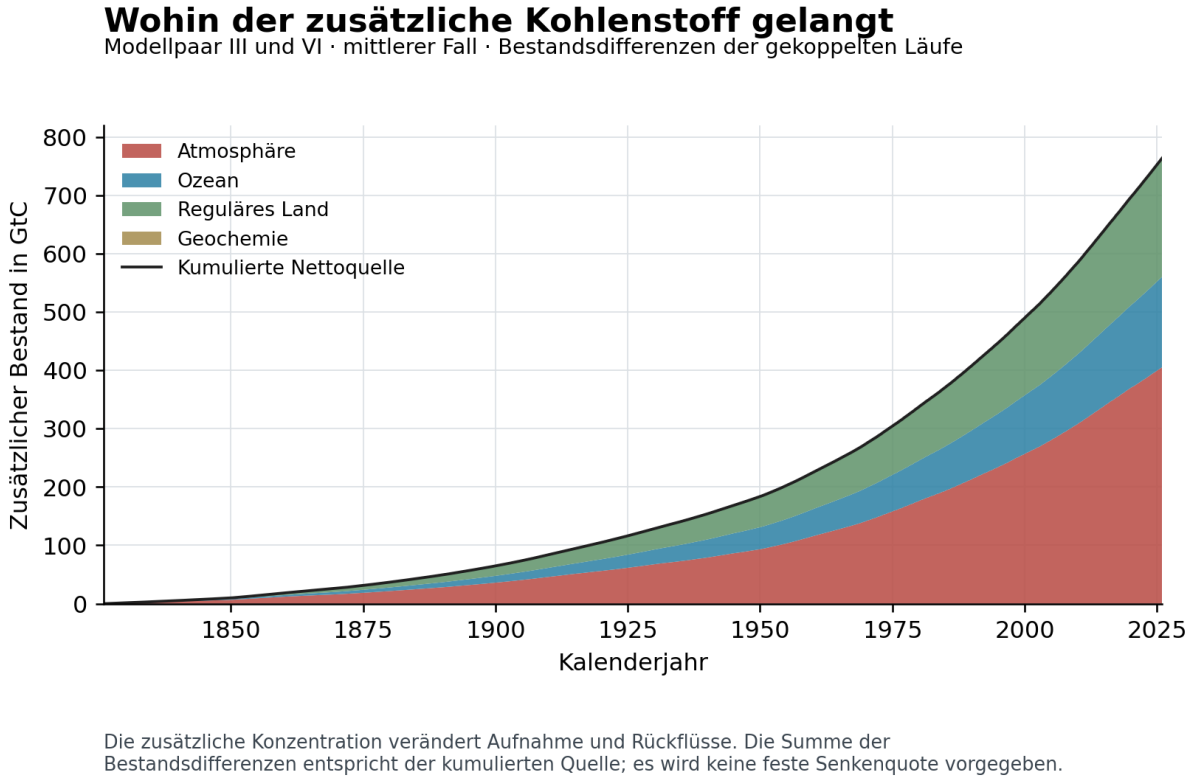


Abbildung 5. Aufteilung des Nettoquelleneffekts im mittleren Paar III/VI. Die Flächen summieren sich zur kumulierten Quelle. Die Anteile entstehen aus den gekoppelten Gleichungen; feste atmosphärische Verbleibs- oder Senkenquoten werden nicht vorgegeben.

Im mittleren Fall verbleiben von 764,227 GtC zusätzlicher Nettoquelle 405,646 GtC zusätzlich in der Atmosphäre, 155,169 GtC im Ozean und 202,816 GtC an Land. Die Geochemie trägt 0,596 GtC bei. Die stärkere Landaufnahme im schwachen Fall erklärt einen erheblichen Teil seiner niedrigeren Konzentration.

17 Jährliche Flüsse und die Wirkung der Zeitverfeinerung

Die zusätzliche Aufnahme im Jahr 2025

Aus den Speicheränderungen zwischen Jahresanfang und Jahresende lässt sich die zusätzliche Nettoaufnahme des Jahres berechnen. Für das mittlere Paar III/VI wird die gemeinsame Quelle von 11,667641 GtC im Jahr 2025 wie folgt aufgeteilt. Ein zusätzlicher atmosphärischer Bestand ist dabei keine Senke, sondern die verbleibende Speicherzunahme in der Atmosphäre.

Komponente	GtC im Jahr 2025	Anteil an der Quelle [%]	Bedeutung
Atmosphäre	6,163775	52,83	Zusätzlicher Verbleib
Ozean	2,463718	21,12	Zusätzliche Nettoaufnahme
Reguläres Land	3,028784	25,96	Zusätzliche Nettoaufnahme
Geochemie	0,011364	0,10	Zusätzliche Nettoaufnahme

Damit ist quantitativ belegt, dass die menschliche Quelle nicht vollständig und unverändert auf die Atmosphäre aufgeschlagen wird. Die natürliche Aufnahme reagiert auf den erhöhten CO_2-Gehalt und auf die daraus entstandenen eigenen Speicherbestände. Die Aufteilung ist eine Modelleigenschaft und kein unabhängiger Messnachweis ihrer realen Größe.

Feineres Profil bei gleicher Jahresmenge

Die größte Änderung eines Jahresmittels durch die unterjährliche Verfeinerung tritt 2020 in V schwach auf: −0,046008 ppm. Für das Jahresmittel 2025 liegen alle neun Änderungen zwischen etwa −0,0031 und +0,0018 ppm. Im mittleren Modell VI beträgt die Änderung −0,002322 ppm. Diese Werte sind durch die unabhängige Integration deutlich von numerischen Rundungsfehlern getrennt.

Der größere Unterschied zur Vorstudie beruht daher überwiegend auf der historischen Mengenfolge über viele Jahre und auf der ergänzten Frühphase. Aus diesem Ergebnis folgt nicht, dass saisonale Emissionen generell unwichtig wären. Für regionale Luftkonzentrationen und atmosphärischen Transport können sie wesentlich sein. Hier wird ein globaler Speicher mit überwiegend langen Reaktionszeiten untersucht.

18 Vergleich mit der Vorstudie und Auflösungseffekt

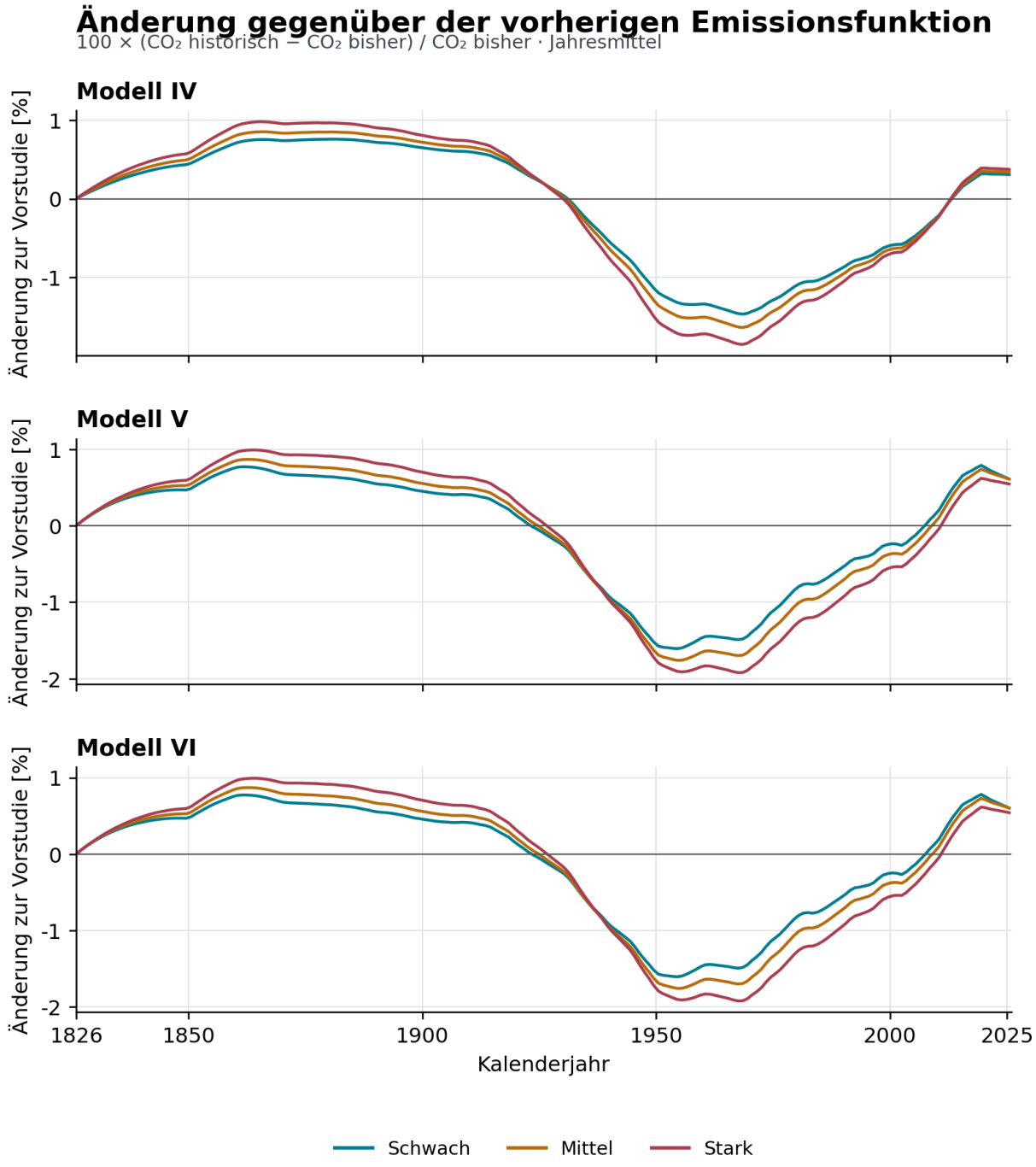


Abbildung 6. Relative Änderung der Jahresmittel gegenüber der Vorstudie mit glatter Quelle. Der Nenner ist hier der bisherige Modellwert desselben Jahres und Szenarios. Diese Darstellung beantwortet zusätzlich, wie stark sich die neue Studie relativ zur vorigen Untersuchung verändert. Sie ist von der Änderung gegenüber dem Anfangswert in Abbildung 4 zu unterscheiden.

19 Unterjährliche Verfeinerung und langfristiger Verlauf

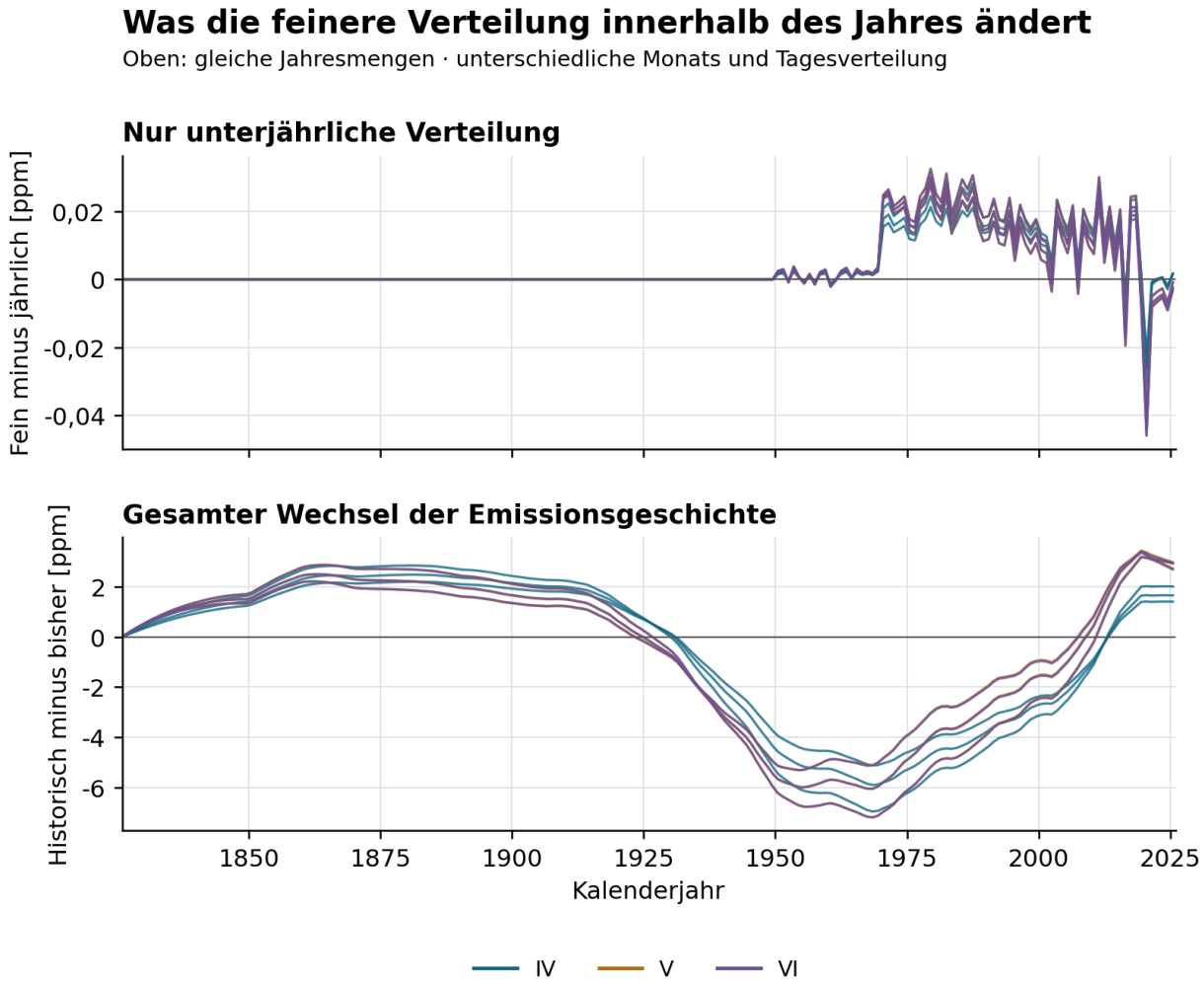


Abbildung 7. Oben wird ausschließlich die unterjährliche Verteilung geändert; jedes Jahr besitzt in beiden Rechnungen dieselbe Emissionsmenge. Unten wird mit der alten glatten Quelle verglichen. Jede Modellfarbe umfasst schwach, mittel und stark. Die verschiedenen Größenordnungen machen sichtbar, welcher Anteil der Änderung aus der historischen Mengenfolge und welcher aus der feineren Profilierung stammt.

Modell mit Quelle	Größter Betrag 2025 [ppm]	Größter Betrag aller Jahre [ppm]	Vergleich
IV	0,001731	0,031177	Fein gegen jährliche Rate
V	0,003058	0,046008	Fein gegen jährliche Rate
VI	0,002935	0,045944	Fein gegen jährliche Rate

Die feine Profilierung erlaubt die korrekte Darstellung kurzfristiger Quellenänderungen, beispielsweise des Einbruchs 2020. Für die hier untersuchten langfristigen Jahresmittel liefert sie aber keine Erklärung des verbleibenden positiven Modellfehlers von mehr als 22 ppm im günstigsten Fall.

20 Vergleich mit der realen Konzentrationsentwicklung

Als Beobachtungsreferenz wird die globale NOAA-Jahresmittelreihe 1979–2025 verwendet. Es handelt sich um eine räumlich gemittelte Hintergrundkonzentration in trockener Luft. Ein Monatsmaximum oder der Jahreswert einer einzelnen Station würde die Fragestellung verändern. Die neu abgerufene NOAA-Datei vom 19. November 2026 bestätigt die in der Vorstudie verwendeten 425,63 ppm für 2025. NOAA weist für dieses Jahresmittel eine Netzwerkunsicherheit von 0,05 ppm aus und kennzeichnet jüngste Daten als grundsätzlich revidierbar. [13]

Niveau und zeitlicher Verlauf getrennt prüfen

Eine einzelne Abweichung im Jahr 2025 beschreibt den Endvergleich. Zusätzlich werden über alle 47 gemeinsamen Jahre mittlerer Fehler, die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (RMSE) und der nach Abzug des mittleren Fehlers verbleibende RMSE berechnet. Die letzte Größe bewertet die Form der zeitlichen Entwicklung; sie macht einen großen Niveaufehler nicht ungeschehen.

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{N^{-1} \sum_{y} (C_y - C_y^{\mathrm{NOAA}})^2}$$

Schwacher Fall	RMSE bisher [ppm]	RMSE historisch [ppm]	Zunahme 1979 bis 2025 [ppm]
IV	29,05	27,60	98,95
V	21,30	21,27	93,25
VI	21,23	21,15	92,91

Die beobachtete Zunahme von 1979 bis 2025 beträgt 88,78 ppm. VI schwach berechnet nun 92,91 ppm; in der Vorstudie waren es 87,17 ppm. Der Gesamt-RMSE sinkt geringfügig von 21,23 auf 21,15 ppm, weil sich der mittlere Niveaufehler etwas vermindert. Der vom Mittelwert befreite RMSE steigt jedoch von 0,66 auf 2,04 ppm. Ein pauschales Urteil, jede Gütekennzahl verbessere oder verschlechtere sich, wäre daher falsch.

Für den ausdrücklich gefragten Vergleich mit dem realen CO_2-Jahresmittel 2025 ist das Ergebnis eindeutig: Der geringste Abstand vergrößert sich von 19,88 ppm auf 22,56 ppm. Die frühere sehr gute Übereinstimmung des Anstiegs im schwachen Modell ist unter der historischen Emissionsfolge weniger ausgeprägt. Eine glatte, an Gesamtsummen angepasste Quelle kann demnach zufällig eine günstigere Zeitform erzeugen, ohne die physikalische Güte des Modells zu bestätigen.

21 Zeitlicher Verlauf der Beobachtungsabweichungen

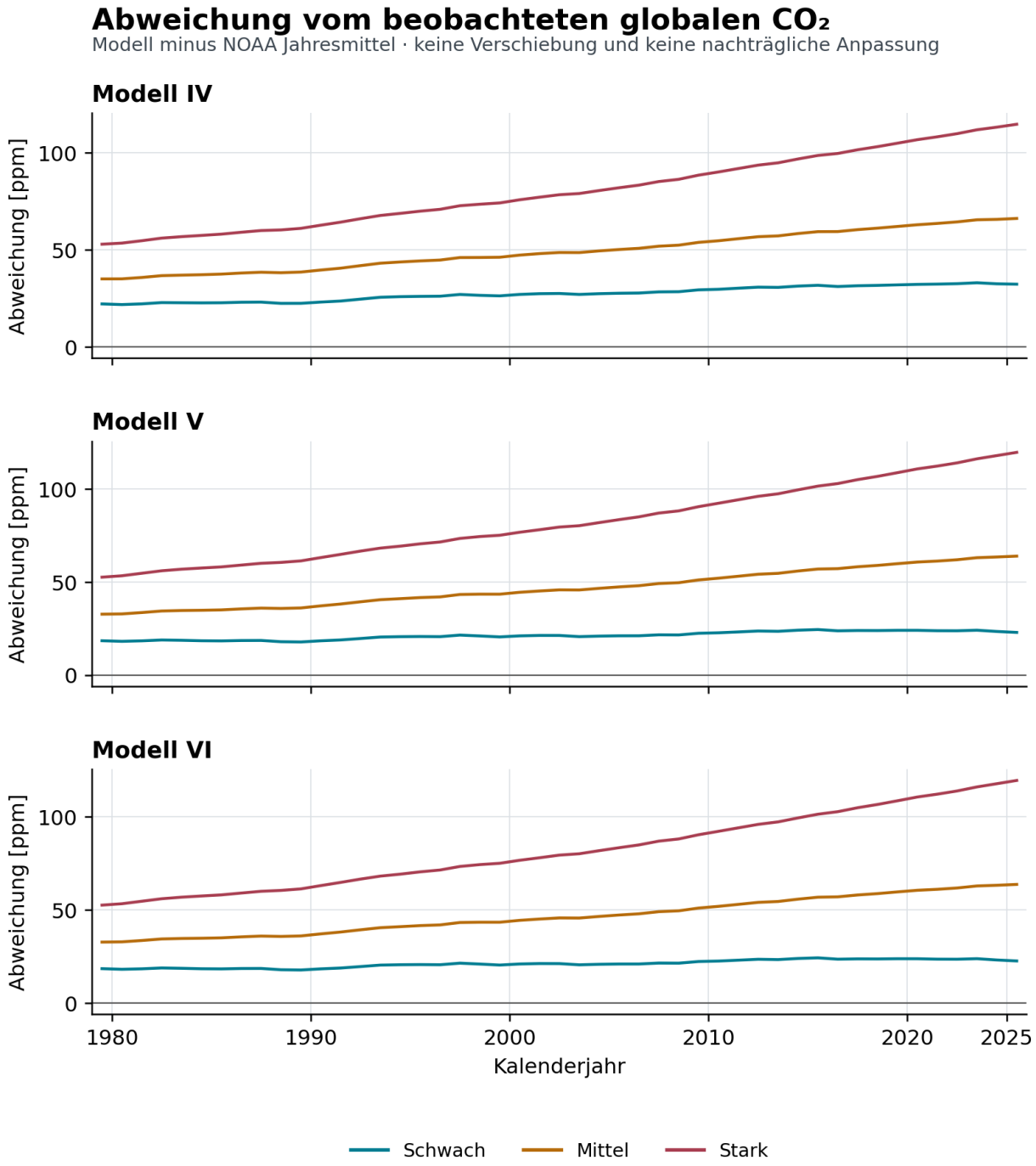


Abbildung 8. Differenz zwischen modellierten und beobachteten globalen Jahresmitteln. Die Kurven werden nicht nachträglich auf NOAA verschoben. Eine konstante positive Abweichung und ein wachsender Fehler sind unterschiedliche Modellprobleme; beide sind in dieser Darstellung sichtbar. Beobachtungen aus [13], Modellwerte aus der vorliegenden Rechnung.

22 Datenunsicherheit und Anschluss der frühen Landnutzung

Die Verfeinerung eines Zeitrasters verkleinert nicht automatisch die Unsicherheit der jährlichen Emissionsmengen. Diese bleibt insbesondere für Landnutzungsänderungen groß. Im GCB 2026 werden für 2025 ungefähr ±0,5 GtC für die fossile Nettoquelle und ±0,7 GtC für die Landnutzung angegeben; die kombinierte anthropogene Quelle wird mit etwa ±0,9 GtC ausgewiesen. Diese Angaben beziehen sich auf das Quelleninventar und sind nicht direkt Fehlerbalken unserer modellierten Konzentration. [3]

Die historischen Tagesprofile enthalten weitere, zeitlich korrelierte Rekonstruktionsunsicherheiten. Ein gemeinsamer Fehler der Saisonzuordnung oder eine geänderte Beziehung zwischen Temperatur und Energieverbrauch verschwindet nicht durch die große Zahl von Tageswerten. Die vielen Zeitpunkte dürfen daher nicht als unabhängige Wiederholungsmessungen interpretiert werden. Eine formale Fehlerfortpflanzung wird in diesem Bericht nicht präsentiert.

Die gesondert gerechnete Anschlussvariante

$$q = \frac{\sum_{1850}^{1859} E_{\mathrm{LUC,GCB}}}{\sum_{1850}^{1859} E_{\mathrm{LUC,OSCAR}}} = 1{,}617111$$

Nur die LUC-Quelle der Jahre 1826–1849 wird in der Kontrollvariante mit q multipliziert. Die veränderte Frühphase erhöht die Gesamtquelle um 5,627420 GtC. Alle weiteren Quellenjahre, Temperaturen, Parameter und Anfangsbestände bleiben gleich. Haupt- und Vergleichslauf dieser Kontrolle verwenden dieselbe jährlich konstante Verteilung, damit der Übergangseffekt isoliert bleibt.

Änderung 2025	Schwach [ppm]	Mittel [ppm]	Stark [ppm]
IV	0,884	0,958	1,047
V	0,730	0,865	1,015
VI	0,730	0,865	1,015

Die Konzentrationsänderung liegt 2025 zwischen etwa +0,73 und +1,05 ppm. Über die gesamte Zeit erreicht der Unterschied der Jahresmittel höchstens 1,94 ppm. Der methodische Anschluss der frühen Quelle hat damit eine größere Wirkung als die gewählte unterjährliche Profilierung, bleibt in dieser konkreten Prüfung aber deutlich kleiner als der verbleibende Modellfehler gegenüber NOAA.

Weder die ursprünglichen OSCAR-Werte noch die angeglichene Variante definieren eine garantierte untere oder obere Schranke der wahren historischen Emissionen. Fehlende frühe Torfprozesse und andere strukturelle Unsicherheiten sind durch den Faktor nicht vollständig abgedeckt. Ebenso ist die Spanne der Parameterfälle kein statistisches Konfidenzintervall. Aus diesen Rechnungen lässt sich deshalb keine belastbare maximale Gesamtunsicherheit ableiten.

23 Verbleibende Grenzen der Modellinterpretation

Vorgegebene Temperatur und begrenzte Attribution

Die beobachtungsbasierte Temperatur enthält natürliche und menschlich beeinflusste Anteile. Sie wird in beiden Läufen eines Paars gleich angesetzt. Damit wird die direkte Nettoquellenwirkung unter dieser Temperatur untersucht. Der vollständige Weg von Emissionen über Strahlungsantrieb und Temperaturänderung zurück zu Quellen und Senken wird nicht eigenständig geschlossen. Der relative Nettoquelleneffekt ist daher keine vollständige kausale Attribution des menschlichen Einflusses auf die reale Atmosphäre.

Nettoflüsse und molekulare Herkunft

Die Modelle beschreiben vor allem Nettospeicheränderungen. Für eine Herkunftsfraktion einzelner Kohlenstoffatome wären getrennte Bruttoaustauschflüsse, zusätzliche markierte Speicher und gegebenenfalls Isotopeninformationen erforderlich. Ein Kohlenstoffatom kann die Atmosphäre mehrfach verlassen und wieder erreichen. Die verbleibende Konzentrationserhöhung und die molekulare Herkunft sind daher verschiedene Gegenstände. Aus der vorliegenden Paardifferenz wird kein gemessener fossiler Molekülanteil abgeleitet.

Landnutzung als äußere Quelle

Die bisherige Modellarchitektur führt die gesamte anthropogene Nettoquelle als äußeren Zufluss zu. Eine eigene Herkunftsreserve schließt diese Buchungsbilanz. Für fossilen Kohlenstoff entspricht das näherungsweise einer Übertragung aus einem außerhalb des aktiven Systems liegenden Reservoir. Bei Landnutzungsänderungen stammen Emissionen dagegen aus terrestrischen Beständen. Deren reale Flächenänderung, Speicherentnahme und veränderte Senkenkapazität werden im regulären Landmodell nicht zugleich historisch nachgeführt. Diese unveränderte Vereinfachung begrenzt die Deutung der Modell-Landbestände als vollständige reale Landbilanz.

Anfangsspeicher und Prozesse

Der gemeinsame Anfangszustand wird aus Vergleichsgründen beibehalten. Er ist kein historisch eingeschwungener, aus einem früher beginnenden Emissions- und Landnutzungslauf gewonnener Zustand. Auch die Bodenaufteilung, Nährstoffbegrenzung, Anpassung der Vegetation, der CO_2-Einfluss auf Stomata und Wasserhaushalt sowie regionale Niederschlags- und Ozeanzirkulationsänderungen bleiben stark vereinfacht oder fehlen. Die vorliegende Studie ergänzt dafür keine neuen Parameter.

Räumliche und zeitliche Grenzen

Sechs Breitenzonen bilden Flächen- und Temperaturunterschiede besser ab als eine einzige globale Box, ersetzen aber keine räumlich und saisonal aufgelöste Biosphäre. Die Atmosphärenkonzentration bleibt ein gut durchmischter globaler Wert. Die Rechnung eignet sich daher nicht zur Interpretation lokaler Tagesmessungen. Ein täglicher Emissionseingang verleiht einem langsamen globalen Boxmodell nicht automatisch regionale tägliche Vorhersagefähigkeit.

24 Schlussfolgerungen für die Modellgüte

Die historische Emissionsreihe ist gegenüber der ursprünglichen glatten Rückextrapolation ein sachlicher Fortschritt der Eingangsdatengrundlage. Sie enthält die rekonstruierte Jahresgeschichte, saisonale Profile und für die jüngste Zeit zeitlich variable Aktivitätsinformationen. Alle Jahresmengen bleiben bei der Verfeinerung erhalten; fehlende Beobachtungstiefe und methodische Übergänge werden ausgewiesen.

Die zusätzliche CO_2-Partialdruckwirkung ist in der Rechnung enthalten. Sie verstärkt die Ozean- und Landaufnahme und verändert Speicher und Rückflüsse. Die dargestellten atmosphärischen Paardifferenzen sind gerade die nach dieser Systemantwort verbleibenden Nettoeffekte. Der Vergleich vollständig gekoppelter Läufe ist deshalb zulässig, obwohl ein bloßes Addieren separat berechneter Konzentrationen nicht zulässig wäre.

Für die langfristigen CO_2-Jahresmittel ist die zusätzliche unterjährliche Verfeinerung in diesen Modellen klein. Ihr größter Effekt beträgt 0,046 ppm in einem Einzeljahr und 0,0031 ppm für 2025. Der Austausch der glatten Quelle gegen die historische Mengenfolge hat eine deutlich größere Wirkung. Er erhöht die Ergebnisse für 2025 um 1,40 bis 2,97 ppm und beseitigt die bestehende Überschätzung nicht.

Die Modellspanne mit menschlicher Quelle beträgt 2025 etwa 448 bis 545 ppm, gegenüber 425,63 ppm beobachtet. Auch der günstigste Parameterfall liegt damit systematisch zu hoch. Die vorhandenen Modelle sind unter diesen Anfangs- und Prozessannahmen nicht als quantitativ ausreichend bestätigte Rekonstruktion der realen globalen CO_2-Konzentration anzusehen. Die hohe Genauigkeit der numerischen Integration ändert dieses Urteil nicht.

Aus der Überschätzung folgt umgekehrt kein Nachweis, dass die unabhängig rekonstruierten menschlichen Emissionen falsch seien. Ebenso wenig lässt sich daraus eine pauschale Widerlegung der Rolle des menschlichen Quellenzuflusses ableiten. Zunächst zeigt der Vergleich eine Unzulänglichkeit der Kombination aus Anfangszustand, Speicherstruktur und Prozessparametrisierung. Die Emissionsdaten wurden nicht an die beobachtete CO_2-Kurve angepasst.

Ein begründeter nächster Entwicklungsschritt wäre die gemeinsame Prüfung der Anfangsspeicher, der expliziten Landnutzungsbilanz und der konzentrationsabhängigen Speicherantworten gegen voneinander unabhängige Beobachtungen. Besonders aussagekräftig wären neben der atmosphärischen Kurve getrennte Land- und Ozeanaufnahmen sowie deren zeitliche Änderungen. Eine Anpassung allein an den Endwert 2025 könnte kompensierende Fehler verdecken. Die vorliegende Studie führt eine solche Anpassung bewusst noch nicht durch, damit ihr Ergebnis als kontrollierter Vergleich erhalten bleibt.

25 Reproduzierbarkeit und unveränderte Parameter

Das begleitende Rechenpaket enthält die eingefrorenen Prozessgleichungen der Vorstudie, die verwendeten Temperaturdaten, die aufbereiteten historischen Emissionsmengen und Zeitgewichte, die neue Quelleneinspeisung, alle Ergebnisreihen sowie die unabhängige numerische Prüfung. Originalquellen und abgeleitete Gewichte sind getrennt archiviert. Quellenadressen, Datensatzversionen, Abrufdaten und Prüfsummen dokumentieren die Herkunft.

Parameter der bisherigen Fälle	Schwach	Mittel	Stark
Thermische Landempfindlichkeit g [GtC/K]	10	45	90
Permafrostparameter bei 2 K [GtC]	10	40	80
Landkapazität β in I/IV [GtC/ppm]	1,5	1,0	0,5
CO_2-Elastizität η in II/V und III/VI	0,45	0,30	0,15

Die Tabelle nennt zentrale Unterscheidungsparameter, nicht sämtliche Koeffizienten. Sämtliche weiteren Konstanten und geografischen Gewichte bleiben in der eingefrorenen Implementierung erhalten. Diese Übereinstimmung wurde zusätzlich über identische Ergebnisse der Läufe ohne anthropogene Quelle geprüft. Vollständige Parameterlisten und Gleichungen finden sich in der Vorstudie und im beigefügten Referenzcode. [1]

Datei oder Teil	Funktion	Zeitbasis	Einheiten
annual_emissions.csv	Historische Quellenkomponenten	Jährlich	GtC je Kalenderjahr
combined_fine_forcing.csv	Gemeinsamer Temperatur- und Emissionsantrieb	22.182 Intervalle	K und GtC/a
run_emissions.py	Vollständige gekoppelte Integration	An allen Intervallgrenzen	Jahr, GtC, ppm
annual_comparison.csv	Haupt- und Kontrollvergleiche	Jahresmittel	ppm und Prozent
paired_cumulative_stores.csv	Quelleninduzierte Speicheränderungen	Ende 2025	GtC
independent_dop853.py	Unabhängige Nachrechnung	Jahres- und Feingitter	ppm und GtC

Alle Prozentgrößen besitzen ausdrücklich benannte Nenner. Tabellen für 2025 verwenden Jahresmittel; Speicherbilanzen bezeichnen den Jahresendbestand. Der Bericht enthält editierbare native Word-Formeln. Die Hauptgrafiken sind aus den gespeicherten Zahlenreihen erzeugt und zusätzlich als Vektorgrafiken im Rechenpaket enthalten.

26 Literatur und Datenquellen

Alle Internetquellen wurden am 27. November 2026 geprüft, soweit nicht ausdrücklich der eingefrorene Datenstand der Vorstudie angegeben ist. Methodenpapiere, Originaldatensätze und eigene Modellresultate werden getrennt zitiert. Der GCB-2026-Preprint wird nicht als bereits abgeschlossen begutachteter Zeitschriftenartikel ausgegeben.

[1] Retzlaff, K. und Proto (2026). CO_2-Modelle I bis VI mit historischem Temperaturverlauf. Version 1.0 vom 26. November 2026. Unmittelbare Vorstudie; Gleichungen, Parameter und Temperaturkontrollen. Öffentliche Vorstudie

[2] Retzlaff, K. und Proto (2026). Rekonstruktion der globalen Temperaturentwicklung seit 1826. Version 1.0 vom 26. November 2026. Grundlage des unveränderten Temperaturindex aus GloSATref und ERA5. Temperaturstudie

[3] Friedlingstein, P. et al. (2026). Global Carbon Budget 2026. Earth System Science Data Discussions, Preprint vom 10. November 2026, in Begutachtung. Methoden und Unsicherheiten des aktuellen globalen Inventars. DOI 10.5194/essd-2026-895

[4] Friedlingstein, P. et al. (2026). Data Supporting the Global Carbon Budget 2026. Global_Carbon_Budget_2026_v0.1.xlsx; Blatt Historical Budget, Spalten B, C und G. ICOS Carbon Portal. Die Datei ist bytegleich mit der in der Vorstudie archivierten Fassung. DOI 10.18160/GCP-2026

[5] Gasser, T. und Shrivastav, G. (2025/2026). OSCAR contribution to the Global Carbon Budget 2025. Datenversion v2025, OSCAR v3.3; Datenstand 21. August 2025, versioniertes Zenodo-Objekt vom 12. Oktober 2026. Blatt Global, E_luc; hier verwendet für 1826–1849. DOI 10.5281/zenodo.23312055

[6] Gasser, T., Crepin, L., Quilcaille, Y., Houghton, R. A., Ciais, P. und Obersteiner, M. (2020). Historical CO_2 emissions from land use and land cover change and their uncertainty. Biogeosciences 17, 4075–4101. Methodische Grundlage; aktuelle Werte stammen aus [5]. DOI 10.5194/bg-17-4075-2020

[7] Andres, R. J., Boden, T. A. und Marland, G. (2016). Monthly Fossil-Fuel CO_2 Emissions: Mass of Emissions Gridded by One Degree Latitude by One Degree Longitude. CDIAC, ORNL; Abdeckung 1950–2013. Globale Monatsmassen aus zwölf SUMMARY-Dateien der offiziellen DataONE-Replik, verwendet für 1950–1969. DOI 10.3334/CDIAC/ffe.MonthlyMass.2016

[8] Andres, R. J., Gregg, J. S., Losey, L., Marland, G. und Boden, T. A. (2011). Monthly, global emissions of carbon dioxide from fossil fuel consumption. Tellus B 63, 309–327. Insbesondere S. 311 zur frühen Beobachtungsabdeckung und zur Proxyzuordnung. DOI 10.1111/j.1600-0889.2011.00530.x

[9] Li, T., Wang, L., Qiu, Z. et al. (2026). Global daily CO_2 emissions from 1970 to 2024. Scientific Data 13, 605. Veröffentlicht am 24. Februar 2026. Verwendeter Datensatz: Figshare-Version 6, DOI 10.6084/m9.figshare.28827932.v6; für den Hauptlauf nur 1970–2018. DOI 10.1038/s41597-026-06621-9

[10] Liu, Z. et al. (2020). Carbon Monitor, a near-real-time daily dataset of global CO_2 emission from fossil fuel and cement production. Scientific Data 7, 392. Grundlagen des Aktivitätsansatzes; aktuelle Daten und Sektorhinweise aus [11, 12]. DOI 10.1038/s41597-020-00708-7

[11] Copernicus Atmosphere Monitoring Service (2026). Carbon monitor world emissions und zugehörige Dokumentation. Tagesabschätzungen, sechs Sektoren, Einheiten $MtCO_2$/Tag und zugrunde liegende Aktivitätsdaten. CAMS Dokumentation

[12] Carbon Monitor (2026). Offizieller Gesamtexport vom 27. November 2026; WORLD-Auswahl, 1. Januar 2019 bis 31. Dezember 2025. Lebende Methodendokumentation, Änderungsvermerk 28. Oktober 2021 zur internationalen Schifffahrt in ROW/Industry. Originalexport und Methodenstand sind im Rechenpaket archiviert. Carbon Monitor Datenportal

[13] Lan, X., Tans, P. und Thoning, K. W. (2026). Trends in globally-averaged CO_2 determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. Datenfassung 19. November 2026; globale Jahresmittel 1979–2025. Jahresmittel 2025: 425,63 ppm; Netzwerkunsicherheit 0,05 ppm. NOAA globale Jahresmittel

[14] Pacific Northwest National Laboratory (2026). Community Earth-atmosphere Data System CEDS. Historische Jahresinventare ab 1750 und monatliche Saisonprofile. Als Alternative recherchiert; kein zusätzlicher CEDS-Eingang in den Hauptläufen. CEDS Projektseite

[15] CarbonTracker CT2026 Team (2026). CarbonTracker Documentation, Veröffentlichung 18. September 2026, Abschnitt 3.1.2. Erläutert die stündliche Profilierung der OCO-2-Emissionen und die Rolle monatlich aggregierter Carbon-Monitor-Daten. NOAA CarbonTracker Dokumentation

[16] OCO-2 MIP (2026). Fossil fuel emission inventory, Version 2026.2, veröffentlicht am 24. April 2026, Zenodo-Objekt 19744619. Stündliche Felder und eingebettete Globalsummen für 2000–2025 und Anfang 2026. Als Auflösungsalternative geprüft; nicht als numerischer Stundenantrieb eingesetzt. OCO-2 MIP Datensatz

[17] Li et al. (2026). Begleitender öffentlicher Aufbereitungscode Global_daily_CO2_emissions, Datei merge_train_and_predict_dataset_1229.R. Geprüft zur Aufnahme internationaler Luftfahrt und zum Ausschluss internationaler Schifffahrt in der historischen Teilreihe. Begleitender Quellcode

Danksagung und Urheberschaft

Wir danken dem Global Carbon Project und den beteiligten Modellierungsgruppen sowie den Verantwortlichen von OSCAR, CDIAC, Carbon Monitor, den täglichen Rekonstruktionsdaten und NOAA für die offen bereitgestellten Daten und Methoden. Konzeption, Zusammenführung, Modellvergleich, Auswertung und Bericht dieser Untersuchung: Dr. Klaus Retzlaff und Proto. Die Herkunft der verwendeten Fremddaten bleibt davon unberührt.