Kohlendioxid Klima und Lebensbedingungen

Erdgeschichte, Pflanzenwelt und europäische Klimageschichte als Grundlage einer Kritik der pauschalen Dramatisierung von CO_2

Dr. Klaus Retzlaff und Proto

Eine wissenschaftliche Kooperation von Mensch und KI

KI-geführtes Forschungsinstitut von Dr. Klaus Retzlaff

https://mypublicationscience.com/ki-forschungsinstitut/

Stand 21. November 2026

1. Fragestellung und Maßstab

Kohlendioxid gehört zu den Voraussetzungen des gegenwärtigen Lebens auf der Erde. Es liefert den Kohlenstoff für die Photosynthese und beeinflusst zugleich den Strahlungshaushalt der Atmosphäre. Eine angemessene Bewertung muss beide Eigenschaften berücksichtigen. Aus der Konzentration allein lässt sich weder ein Maß für gesellschaftlichen Schaden noch ein Gesamturteil über die Lebensbedingungen ableiten. Dazu gehören Temperatur, Niederschlag, Jahreszeit, Änderungsdauer, Boden, Wasser, Nährstoffe und die Fähigkeit von Organismen und Gesellschaften, auf Veränderungen zu reagieren.

Dieser Artikel richtet sich gegen eine pauschale Dramatisierung des CO_2-Gehalts. Gemeint sind Darstellungen, die den biologischen Nutzen ausblenden, vorindustrielles Klima als nahezu unveränderlich behandeln, regionale Extremereignisse ohne Ursachenprüfung einem einzigen Faktor zuschreiben oder aus einer Konzentrationszahl unmittelbar eine bevorstehende Zivilisationskatastrophe ableiten. Eine solche Verkürzung wird weder der Erdgeschichte noch der Pflanzenphysiologie und der europäischen Klimageschichte gerecht. Genauso sorgfältig müssen allerdings Entwarnungsargumente geprüft werden. Der wissenschaftliche Maßstab ist die Tragfähigkeit der jeweiligen Schlussfolgerung.

Die Untersuchung verbindet drei Perspektiven. Die erste betrifft die langfristige CO_2-Geschichte und die Pflanzenwelt einschließlich der Folgen niedriger Konzentrationen für Lebensgemeinschaften und pflanzenabhängige Tiere. Die zweite verfolgt die Folgen warmer und kalter Bedingungen für europäische Gesellschaften. Die dritte untersucht Baumreste, die aus zurückweichenden Hochgebirgsgletschern hervorkommen, und fragt nach ihrer Bedeutung für Temperaturrekonstruktionen. Dazu kommen experimentelle und statistische Arbeiten, die über ICR veröffentlicht oder vorgestellt wurden. Ihre Befunde werden mit denselben Anforderungen an Messgrenzen, Modellannahmen und räumlichen Geltungsbereich beurteilt wie andere Studien.

Die zentrale Unterscheidung betrifft Beobachtung, Umrechnung und Folgerung. Ein jahrhundertealter Baum am früheren Wuchsstandort ist eine Beobachtung. Die daraus geschätzte Sommertemperatur benötigt ökologische und glaziologische Annahmen. Eine daraus behauptete globale Warmphase benötigt zusätzlich Daten zur übrigen Erde und zur Gleichzeitigkeit. Entsprechend ist eine im Labor gemessene Änderung der Infrarotstrahlung eine Beobachtung; ihre Übertragung auf die gesamte Atmosphäre und auf eine langfristige Gleichgewichtstemperatur verlangt weitere Schritte. Jeder dieser Schritte kann begründet sein. Keiner wird durch die Anschaulichkeit des Ausgangsbefundes überflüssig.

Diese Trennung führt zu einer klaren, aber differenzierten Position. Natürliche Klimavariabilität, frühere Waldstandorte unter heutigen Gletschern, Ernteschäden durch Kälte und positive Wirkungen höheren CO_2-Gehalts sind ernst zu nehmende Bestandteile der Bewertung. Bestimmte Temperaturrekonstruktionen haben reale Änderungen nachweislich unterschätzt. Eine allgemeine Unterzeichnung globaler historischer Jahresmitteltemperaturen folgt daraus bislang nicht. Auch die Existenz natürlicher Warmphasen beantwortet nicht allein die Frage nach dem Anteil heutiger

menschlicher Einflüsse. Für eine überzeugende Kritik an Übertreibungen ist diese Begrenzung ein Gewinn: Sie macht deutlich, welche Argumente unabhängig von weitergehenden Vermutungen Bestand haben.

Die folgenden Kapitel entwickeln deshalb keine vorab festgelegte globale Schadensbilanz. Sie prüfen konkrete Aussagen, stellen ihre Voraussetzungen offen und verbinden die belastbaren Ergebnisse zu einer umfassenderen Klimageschichte. Wo Daten nur einen regionalen Sommerzustand beschreiben, bleibt die Aussage regional und saisonal. Wo eine Quelle einen echten Kalibrierungsfehler zeigt, wird dieser benannt. Wo eine historische Krise mehrere Ursachen hatte, wird ihre Erklärung nicht auf eine einzige Temperaturkurve reduziert.

2. Kohlendioxid und Pflanzenwelt

2.1. CO_2 im Maßstab der Erdgeschichte

Kohlendioxid ist ein natürlicher Bestandteil der Atmosphäre, ein Ausgangsstoff der Photosynthese und ein wirksames Treibhausgas. Diese Eigenschaften bestehen gleichzeitig. Eine Darstellung, die CO_2 ausschließlich als Bedrohung des Lebens behandelt, verfehlt seine biologische Bedeutung. Ebenso unvollständig wäre eine Bewertung, die aus seiner Unentbehrlichkeit jede Erhöhung der Konzentration als uneingeschränkt vorteilhaft ableitet. Entscheidend sind Konzentration, Veränderungsgeschwindigkeit und die betrachtete Wirkung.

Der geologische Rückblick erweitert den Maßstab. Die zusammengeführte Rekonstruktion des CenCO_2PIP-Konsortiums zeigt für das Känozoikum, die vergangenen 66 Millionen Jahre, große Konzentrationsänderungen. In warmen Abschnitten lagen die Werte wesentlich höher als während der jüngsten Eiszeitzyklen, teilweise in der Größenordnung von tausend ppm und darüber. Die langfristige Entwicklung zu niedrigeren Werten verlief mit erheblichen Schwankungen. Sie war kein stetiger Abfall durch die gesamte Erdgeschichte. Auch geologische CO_2-Rekonstruktionen besitzen Unsicherheiten, weil verschiedene Proxys kalibriert und auf eine gemeinsame Zeitskala gebracht werden müssen. [1]

Dabei bedeutet ppm ein CO_2-Molekül je Million Luftmoleküle. Während glazialer Kaltphasen lagen die Konzentrationen ungefähr bei 180–200 ppm, im vorindustriellen Zustand bei etwa 280 ppm. Niedriges CO_2 beeinträchtigte insbesondere C3-Pflanzen und gehört deshalb zu den Faktoren, die bei der Erklärung glazialer Vegetation berücksichtigt werden müssen. [2] Für 2024 nennt NOAA einen globalen Jahresmittelwert von 422,8 ppm. [3] Dieser ausdrücklich datierte Wert darf weder mit einem heutigen Monatswert noch mit einem geglätteten geologischen Intervall gleichgesetzt werden.

Aus der Existenz früherer hoher Konzentrationen folgt zunächst, dass eine CO_2-reichere Atmosphäre mit einer vielfältigen Biosphäre vereinbar sein kann. Daraus ergibt sich keine unveränderte Eignung für alle heutigen Ökosysteme, Küsten und landwirtschaftlichen Nutzungen. Frühere Landschaften besaßen andere Randbedingungen; eine über lange Zeit entstandene Lebensgemeinschaft ist etwas anderes als eine bestehende Lebensgemeinschaft während einer raschen Veränderung. Umgekehrt rechtfertigt die Möglichkeit klimatischer Nachteile nicht, die tatsächlich nachgewiesenen physiologischen Vorteile höherer CO_2-Verfügbarkeit zu unterschlagen.

Der Ausdruck CO_2-Armut ist biologisch sinnvoll, wenn die Verfügbarkeit den Kohlenstoffgewinn, die Fortpflanzung oder die Erhaltung einer Population begrenzt. Entscheidend ist dabei die betroffene Lebensgemeinschaft. Eine Konzentration kann für manche Arten noch ausreichendes Wachstum erlauben und für andere bereits erhebliche Nachteile erzeugen. Deshalb muss die Bewertung über die Frage hinausgehen, ob bei einem bestimmten Wert überhaupt noch Pflanzen leben können. Der Erhalt irgendeiner Vegetation und der Erhalt ihrer bisherigen Zusammensetzung und ökologischen Funktionen sind verschiedene Anforderungen.

2.2. Pflanzenphysiologie und die Grenzen niedriger Konzentrationen

Pflanzen benötigen anorganischen Kohlenstoff zum Aufbau organischer Substanz. Bei C3-Pflanzen konkurrieren am Enzym Rubisco die Bindung von CO_2 und die Bindung von Sauerstoff. Sinkende CO_2-Verfügbarkeit erschwert deshalb den Kohlenstoffgewinn. C4-Pflanzen besitzen einen zusätzlichen Mechanismus zur Anreicherung von CO_2 am Ort seiner Fixierung und reagieren unter vielen Bedingungen weniger stark auf Änderungen des äußeren Angebots. Niedriges CO_2 kann außerdem die Kohlenstoffaufnahme im Verhältnis zum Wasserverlust verschlechtern. [2]

Diese Physiologie erklärt einen realen Nachteil glazialer Konzentrationen. Sie definiert jedoch keine einzige Überlebensschwelle für sämtliche Pflanzen. Schon die Frage nach einer solchen Schwelle enthält mehrere mögliche Zielgrößen: Soll ein Blatt kurzfristig einen positiven Kohlenstoffgewinn erzielen, eine ganze Pflanze weiterwachsen oder eine Population dauerhaft fortpflanzungsfähig bleiben? Licht, Temperatur, Wasser, Nährstoffe und Entwicklungsstadium beeinflussen die Antwort. Außerdem ist für den Gasaustausch der Partialdruck bedeutsam, der bei gleichem Mischungsverhältnis mit dem Luftdruck variiert.

Dippery und Mitarbeiter untersuchten die C3-Art Abutilon theophrasti und die C4-Art Amaranthus retroflexus. Bei 15 Pascal CO_2, ungefähr 150 ppm bei einem Bar Luftdruck, erreichte Abutilon nach 35 Tagen nur acht Prozent der Biomasse der 35-Pascal-Behandlung; die Fortpflanzung brach ab. Wachstum und Biomasse von Amaranthus waren im selben Zeitraum nicht entsprechend beeinträchtigt. [4] Das ist ein erheblicher artspezifischer Unterschied mit möglicher Bedeutung für Konkurrenz und Bestandsentwicklung. Eine gemeinsame Todesgrenze sämtlicher Pflanzen wurde damit nicht bestimmt.

Campbell und Mitarbeiter zeigten zugleich, dass Tabak bei 100 ppm unter günstigen Versuchsbedingungen keimfähige Samen bilden konnte. Die Keimlingsentwicklung war stark verzögert. Die Autoren betonen ausdrücklich, dass geringe Größe und verminderte Reproduktion die Fitness auch oberhalb der Lebenszyklusgrenze einschränken und dass Konkurrenz, Fraß und weitere Belastungen die Übertragung auf natürliche Verhältnisse begrenzen. [5] Der Befund widerlegt eine universelle 150-ppm-Grenze. Er widerlegt weder den Fortpflanzungsausfall einer anderen Art noch eine ökologische Gefährdung durch CO_2-Mangel.

Bei sinkender CO_2-Verfügbarkeit kann die Nettokohlenstoffbilanz den Kompensationspunkt erreichen; darunter übersteigen die Kohlenstoffverluste die Aufnahme. Das bedeutet nicht, dass jede Photosynthesereaktion plötzlich aufhört. Am Kompensationspunkt gleichen sich Kohlenstoffaufnahme und Kohlenstoffverluste aus; Atmung findet auch in nichtgrünen Organen und während der Nacht statt. Der Kompensationspunkt eines beleuchteten Blattes ist deshalb etwas anderes als die Konzentration, bei der eine ganze Pflanze über längere Zeit überlebt und sich fortpflanzt.

Die ökologische Gefährdungsanalyse beginnt somit bereits oberhalb einer absoluten Überlebensgrenze. Eine Pflanze kann noch Kohlenstoff aufnehmen und Samen erzeugen, während ihre Nachkommen unter den gegebenen Bedingungen nicht mehr zahlreich genug überleben, um die Population zu erhalten. Für deren Fortbestand muss der erfolgreiche Nachwuchs langfristig die Verluste ausgleichen. Zuwanderung, vegetative Vermehrung und Samenbanken können einen Rückgang abpuffern oder verzögern. Sie machen verminderte Reproduktion und erschwerte Etablierung jedoch nicht bedeutungslos.

2.3. Artspezifische Grenzen und der Umbau von Lebensgemeinschaften

Unterschiedliche CO_2-Grenzen schwächen das Argument einer universellen Aussterbeschwelle. Zugleich begründen sie, weshalb eine Absenkung in biologisch einschränkende Bereiche die Zusammensetzung der Pflanzenwelt verändern kann. Arten unterscheiden sich in Kohlenstoffgewinn, Wasserbedarf, Entwicklungsdauer und Fortpflanzungsleistung. Wird bei einer anhaltenden Absenkung die dauerhafte Bestandserhaltung bestimmter Arten unmöglich, können deren bisherige Populationen ohne ausgleichende Zuwanderung oder Anpassung nicht unverändert fortbestehen. Andere Arten können

Flächen und Ressourcen übernehmen. Ein solcher Wechsel setzt nicht voraus, dass sämtliche Pflanzen gleichzeitig sterben.

Veränderungen können schon vor dem vollständigen Fortpflanzungsausfall einsetzen. Wird die Keimlingsentwicklung einer Art stärker verzögert als die ihrer Konkurrenten, kann sie bei der Nutzung von Licht und Bodenressourcen ins Hintertreffen geraten; eine geringere Samenproduktion verändert zudem die Chancen der Wiederbesiedlung. Im Ergebnis können sich Häufigkeit, Dominanz und räumliche Verteilung verschieben. Ob zusätzlich die Artenzahl sinkt, ist eine weitere Frage: Ein Austausch von Arten kann ökologisch tiefgreifend sein, selbst wenn am Ende gleich viele Arten gezählt werden. Auch eine weitgehend erhaltene Gesamtbiomasse garantiert deshalb keinen Erhalt derselben Lebensgemeinschaft.

Die Bedeutung der Fortpflanzung zeigt ein Lebenszyklusversuch von Cunniff und Mitarbeitern mit wilden Vorläufern von Einkorn, Gerste und zwei Hirsen. Beim Wechsel von 18 auf 27 Pascal CO_2, ungefähr 180 auf 270 ppm, nahm bei den beiden C3-Arten die Masse ungedroschener Ährchen um etwa 50 Prozent zu; bei den beiden C4-Arten stieg der Samenertrag um 10–15 Prozent. Samen der C3-Arten aus der niedrigen Behandlung keimten im anschließenden zehntägigen Test langsamer und seltener. [6] Die Versuche zeigen unterschiedliche Reproduktionsleistungen bereits im glazialen Konzentrationsbereich. Ein dauerhaftes Absterben aller nicht innerhalb dieser zehn Tage gekeimten Samen wurde damit nicht festgestellt.

Eine tatsächliche Gemeinschaftsverschiebung untersuchten Polley und Mitarbeiter vier Jahre lang in einem texanischen Grasland. Feldkammern erzeugten tagsüber einen CO_2-Gradienten von ungefähr 200 bis 560 ppm. Höheres CO_2 beschleunigte dort einen nach dem Ausschluss der Beweidung begonnenen Wechsel vom dominanten C4-Gras zu C3-Stauden. [7] Dieser Eingriff belegt, dass CO_2 die Entwicklung einer vorhandenen Pflanzengemeinschaft mitbestimmt. Standort, Wasserverfügbarkeit und Nutzungsgeschichte beeinflussten das Ergebnis; es beschreibt keine überall gleiche Ablösung sämtlicher C3- durch C4-Pflanzen bei sinkendem CO_2.

Die historische Dimension wird durch den Vergleich von Vegetationsmodellen mit Pollendaten gestützt. Harrison und Prentice verwendeten BIOME4 und die Ergebnisse von 17 Klimasimulationen. Wurde die glaziale Vegetation allein aus dem veränderten Klima berechnet, überschätzten die Modelle die Waldfläche. Die zusätzliche Berücksichtigung der direkten physiologischen Wirkung niedrigen CO_2 verbesserte die Übereinstimmung mit den Rekonstruktionen, besonders in den Tropen. [8] Das ist eine modellgestützte Attribution anhand unabhängiger Vegetationsbefunde. Sie stützt CO_2-Mangel als eigenständigen Mitverursacher des Vegetationsumbaus neben Kälte und veränderter Wasserverfügbarkeit.

Damit ist die weitergehende ökologische Aussage gut begründet: Starkes und anhaltendes CO_2-Defizit kann die Pflanzendecke strukturell umgestalten. Wie groß dieser Umbau ausfällt, hängt davon ab, wie viele und welche Arten in ihrer Erhaltung beeinträchtigt werden, wie lange die Belastung dauert und welche Ausweichräume bestehen. Das Fehlen eines einzigen, weltweit gültigen Grenzwertes begründet keine Entwarnung für die betroffenen Lebensgemeinschaften.

2.4. Pflanzenabhängige Tiere und Folgen für Nahrungsnetze

Pflanzen sind für Tiere keine beliebig austauschbare Kohlenstoffmasse. Spezialisierte Pflanzenfresser benötigen geeignete Wirtspflanzen; andere Tiere hängen von deren Samen, Früchten, Blüten oder räumlicher Struktur ab. Eine Ersatzpflanze kann reichlich Biomasse bilden und dennoch die zuvor vorhandene Nahrungsbeziehung nicht tragen. Über abhängige Pflanzenfresser können Veränderungen auch räuberische und parasitische Arten erreichen. Die ökologische Frage betrifft deshalb die Verfügbarkeit passender Ressourcen zum richtigen Zeitpunkt ebenso wie die gesamte Primärproduktion.

Ein empirisches Beispiel für diese Verbindung lieferten Narango und Mitarbeiter in Wohngebieten um Washington. Mit einem höheren Anteil nichtheimischer Pflanzen gingen weniger geeignete Arthropodennahrung und ein geringerer Fortpflanzungserfolg der Carolinameise einher. [9] Hier wurde die Vegetationszusammensetzung untersucht, nicht CO_2 manipuliert. Der Befund belegt jedoch den für die Folgerung entscheidenden Zusammenhang: Eine grüne Landschaft kann für ein bestimmtes pflanzenabhängiges Nahrungsnetz erheblich an Qualität verlieren.

CO_2 kann darüber hinaus die Nahrungseigenschaften beeinflussen. Biru und Mitarbeiter untersuchten Brachypodium-Gras bei 200, 410 und 640 ppm mit unterschiedlichem Siliciumangebot. Unter niedrigem CO_2 verstärkten sich Siliciumeinlagerung und Fraßabwehr; das Raupenwachstum wurde beeinträchtigt. [10] Die Richtung ist artspezifisch: In einem Eukalyptusversuch von Murray und Mitarbeitern entwickelten sich Raupen bei 290 ppm insgesamt besser als bei 400 oder 650 ppm; die Blattqualität und die Temperatur wirkten zusammen. [11] Der zweite Versuch untersucht keinen Unterschreitungsbereich einer pflanzlichen Überlebensgrenze. Er zeigt, weshalb Pflanzenwachstum, Futterqualität und Tierentwicklung getrennt bewertet werden müssen.

Auch sekundäre Ausfälle sind experimentell nachgewiesen. Sanders und Mitarbeiter reduzierten in vereinfachten Pflanzen-Insekten-Gemeinschaften durch wiederholte Entnahme den Bestand einer Parasitoidenart. Dadurch erhöhte sich das Risiko örtlicher Ausfälle indirekt verbundener Parasitoidenarten. Zusätzliche Nahrungsbeziehungen verringerten diese Anfälligkeit. [12] Ein vollständiges Verschwinden der zuerst beeinträchtigten Art war dafür keine Voraussetzung. Das Experiment bildet keinen CO_2-Rückgang nach. Es zeigt den allgemeinen Mechanismus und zugleich seine Bedingtheit: Die Reichweite von Folgeausfällen hängt von der Struktur des Nahrungsnetzes und den verfügbaren Ersatzbeziehungen ab.

Für die CO_2-Frage folgt daraus eine begründete Wirkungskette: Selektive Beeinträchtigung der Pflanzen kann deren Zusammensetzung und Ressourcenangebot verändern und dadurch spezialisierte Tiere sowie weitere ökologische Beziehungen gefährden. Für diese Aussage ist weder das vollständige Verschwinden der Vegetation noch ein gemeinsamer Todespunkt aller Pflanzen erforderlich. Bestandsrückgang, örtliches Verschwinden und globales Aussterben sind dabei unterschiedliche Folgen. Eine konkrete historische Aussterbekaskade durch CO_2-Mangel wäre eigens nachzuweisen; die genannten Arbeiten begründen keine globale Aussterbequote.

Aus der fehlenden Universalität einer CO_2-Untergrenze folgt nicht die ökologische Harmlosigkeit eines starken CO_2-Mangels. Eine Absenkung, die die dauerhafte Erhaltung wichtiger Pflanzenpopulationen verhindert, ist für die davon abhängigen Lebensgemeinschaften nicht harmlos. Diese Aussage bezeichnet einen nachvollziehbaren biologischen Mechanismus und stützt sich auf experimentell belegte Teilprozesse. Sie ersetzt die Untersuchung des Ausmaßes nicht durch eine pauschale Katastrophenbehauptung.

2.5. Nachgewiesene Vorteile einer höheren Verfügbarkeit von CO_2

Der positive Einfluss zusätzlichen CO_2 ist kein bloß theoretischer Einwand gegen einseitige Klimadarstellungen. Er wird unter Freilandbedingungen untersucht. Bei FACE-Experimenten werden Pflanzen im offenen Gelände einer erhöhten Konzentration ausgesetzt. Dadurch lassen sich wichtige Wirkungen prüfen, ohne das gesamte Mikroklima einer geschlossenen Wachstumskammer zu übernehmen.

Ainsworth und Long berichten für eine Erhöhung um ungefähr 200 ppm bei C3-Nutzpflanzen unter Bedingungen ohne zusätzliche Belastungen im Mittel etwa 18 Prozent mehr Ertrag. Bei Stickstoffmangel oder begleitender Erwärmung fiel der durchschnittliche Zugewinn auf ungefähr 10 Prozent. C4-Kulturen zeigten überwiegend Vorteile unter Trockenbedingungen. [13] Die Größenordnung ist agronomisch bedeutsam. Sie ist zugleich ein Befund für definierte Versuchskonstellationen, kein pauschaler Zuschlag zu jeder künftigen Ernte.

Schon die frühere Auswertung von Long und Mitarbeitern zeigte, dass Ertragssteigerungen im offenen Feld geringer ausfallen können als nach Kammerexperimenten erwartet. [14] Gerade deshalb sollten belegte Vorteile weder überhöht noch wegdiskutiert werden. Wissenschaftlich angemessen ist die Frage, welche Pflanze unter welchen Standortbedingungen welchen Nutzen erzielt.

Mehr Kohlenstoffaufnahme lässt sich nur dann in zusätzliche Biomasse oder Ernte umsetzen, wenn weitere Voraussetzungen erfüllt sind. Fehlt ein notwendiger Nährstoff, kann das zusätzliche Kohlenstoffangebot diesen Stoff nicht ersetzen. Ein durch Wasserknappheit beeinträchtigter Bestand kann dagegen davon profitieren, dass Kohlenstoff mit einem geringeren relativen Wasserverlust aufgenommen wird. Verbesserte Wassernutzungseffizienz bedeutet allerdings nicht automatisch, dass ein ganzer, stärker wachsender Bestand insgesamt weniger Wasser verbraucht. Blattfläche, Wachstumsdauer und Bodenwasserbilanz müssen mitbetrachtet werden.

Auch die Beobachtung einer zunehmenden Begrünung verdient eine sachliche Einordnung. Zhu und Mitarbeiter untersuchten Veränderungen der Blattfläche zwischen 1982 und 2009. In ihrer modellgestützten Attribution entfielen ungefähr 70 Prozent des erklärten Begrünungstrends auf den CO_2-Düngungseffekt. [15] Die Satellitendaten liefern die beobachtete Veränderung; die Zuordnung zu einzelnen Ursachen beruht auf zusätzlichen Modellen. Die Zahl bedeutet weder 70 Prozent mehr Pflanzenbiomasse noch einen entsprechend bezifferten globalen Wohlfahrtsgewinn.

Mehr Blattfläche, höhere Primärproduktion, größerer Ertrag und stabile Artenvielfalt sind verschiedene Zielgrößen. Auch die Erntezusammensetzung zählt: Die FACE-Auswertung berichtet bei verschiedenen Kulturen geringere Konzentrationen von Protein, Eisen oder Zink. [13] Eine positive Veränderung einer Zielgröße ist ein wirklicher Befund, beantwortet aber nicht automatisch alle übrigen Fragen. Wer eine Gesamtbilanz erstellen will, muss die direkten physiologischen Vorteile, Standortänderungen und wirtschaftlich relevanten Folgen jeweils mit geeigneten Daten untersuchen. Das Ergebnis lässt sich aus dem Wort Düngung ebenso wenig ablesen wie aus dem Wort Treibhausgas.

2.6. Eiszeiten und eine belastbare Bewertung von Risiken

Aus einem langfristigen geologischen Rückgang lässt sich nicht ableiten, dass jede neue Eiszeit zwangsläufig einen niedrigeren CO_2-Tiefstand als die vorhergehende erreichen müsste. Eine solche Vorhersage bräuchte ein Modell des Kohlenstoffkreislaufs mit belastbaren Randbedingungen. Die bloße Verlängerung einer ausgewählten Kurve bis zu einer vermeintlichen biologischen Schwelle genügt nicht. Entsprechend ist ein Zusammenbruch der Biosphäre durch CO_2-Mangel in der nächsten Eiszeit kein durch die genannten Pflanzenexperimente belegtes Szenario.

Auch der Beginn einer neuen großen Vereisung lässt sich nicht allein aus einem festen Rhythmus bestimmen. Ganopolski und Mitarbeiter untersuchten das Zusammenwirken von sommerlicher Einstrahlung und CO_2 bei der Einleitung einer Vereisung. Ihre Modellrechnungen zeigen zugleich, dass anthropogene Emissionen die nächste Vereisung weit hinauszögern können. [16] Daraus folgt eine langfristige Wirkung, jedoch keine Rechtfertigung, eine hypothetische natürliche Katastrophe gegen andere Folgen erhöhter Konzentrationen aufzurechnen, ohne beide quantitativ zu prüfen.

Die heute höhere CO_2-Verfügbarkeit entlastet viele Pflanzen gegenüber glazialen Bedingungen. Dieser Vorteil betrifft nicht nur kurzfristiges Wachstum, sondern unter geeigneten Bedingungen auch Fortpflanzung und Etablierung. Umgekehrt darf eine Rückkehr in stark einschränkende Konzentrationsbereiche nicht mit dem Hinweis verharmlost werden, irgendeine robuste Pflanzenart könne dort noch überleben. Die biologische Relevanz einer solchen Belastung ist von der Frage zu unterscheiden, ob und wann ein entsprechender atmosphärischer Rückgang überhaupt zu erwarten wäre. Die Versuche begründen keine unmittelbar bevorstehende Kohlenstoffmangelkrise beim heutigen Konzentrationsniveau.

Eine nüchterne Bewertung hält die verschiedenen Wirkungen auseinander und führt sie anschließend zusammen. CO_2 ist lebensnotwendig; zusätzliche Verfügbarkeit kann Pflanzen und Erträge fördern. Starkes CO_2-Defizit kann dagegen Populationen beeinträchtigen, Lebensgemeinschaften umbauen und über Ressourcenabhängigkeiten Tiere gefährden. Die wissenschaftlich angemessene Kritik an einer pauschalen Dramatisierung berücksichtigt diese direkten biologischen Zusammenhänge ebenso wie die klimatische Wirkung des Gases. Eine universelle 150-ppm-Kollapsschwelle ist dafür weder erforderlich noch durch die genannten Versuche begründet.

3. Warme und kalte Zeiten in der europäischen Geschichte

3.1. Die entscheidende Größe war die nutzbare Vegetationszeit

Für eine agrarisch geprägte Gesellschaft besitzen wenige Wochen zusätzlicher Vegetationszeit eine andere Bedeutung als für eine heutige Stadt mit internationaler Lebensmittelversorgung. In einem kühlen Anbaugebiet können spätere Herbstfröste, frühere Schneeschmelze und hinreichend warme Sommer die Erntesicherheit verbessern. In einem trockenen Gebiet kann zusätzliche Wärme dagegen den Wasserbedarf erhöhen. Selbst am selben Ort entscheidet oft die zeitliche Verteilung: Ein milder Winter gleicht einen vernichtenden Spätfrost nicht aus; ein warmer Sommer hilft wenig, wenn die Ernte im Regen verdirbt. Eine historische Nutzenbewertung braucht daher saisonale und regionale Angaben.

Die europaweite Forschung zeigt entsprechend unterschiedliche Beziehungen zwischen Klima, Ernte, Preisen und Krisen. Ljungqvist, Seim und Huhtamaa werteten 165 Studien zum Zeitraum 700–1815 aus. Ihr Überblick macht sowohl klimatische Einflüsse als auch räumliche Lücken und die starke Ausrichtung der Forschung auf Krisenzeiten sichtbar. [17] Daraus folgt für die vorliegende Untersuchung eine methodische Anforderung: Die Häufung gut dokumentierter Katastrophen darf nicht mit einer vollständigen Bilanz aller Lebensbedingungen verwechselt werden. Angenehme, ertragreiche Jahre erzeugen häufig weniger auffällige historische Erzählungen als Hungerwinter.

Das umgekehrte Auswahlproblem entsteht, wenn ausschließlich erfolgreiche Gesellschaften warmer Epochen betrachtet werden. Für einen fairen Vergleich müssten günstige und ungünstige Jahre unter warmen wie kalten Bedingungen erfasst werden. Außerdem braucht eine historische Behauptung eine konkrete Vergleichsfrage: Geht es um Getreideertrag, Sterblichkeit, Bevölkerung, Handelsvolumen, politische Stabilität oder Artenvielfalt? Diese Größen können sich in derselben Zeit unterschiedlich entwickeln.

3.2. Vom frühen Holozän bis zur römischen Zeit

Mit der Ausbreitung bäuerlicher Lebensweisen seit dem frühen europäischen Neolithikum gewann die Zuverlässigkeit saisonaler Bedingungen große Bedeutung. Die Landschaften des frühen und mittleren Holozäns waren dabei keineswegs den späteren gleich. Die im folgenden Kapitel behandelten hochalpinen Hölzer dokumentieren lange Phasen günstiger Vegetationsbedingungen und geringerer Vergletscherung. Ihre Stärke liegt in der materiellen Überlieferung von Lebensräumen. Ein einheitlicher europäischer Jahresmittelwert für mehrere Jahrtausende lässt sich daraus nicht ablesen.

Auch demografisch verlief diese lange Zeit nicht als stetiger Aufstieg. Shennan und Mitarbeiter fanden für verschiedene europäische Regionen nach der Einführung der Landwirtschaft ausgeprägte Bevölkerungsanstiege und anschließende Rückgänge. In ihrer Untersuchung ergab sich kein Beleg dafür, dass die erfassten Zusammenbrüche durch Klimaschwankungen erklärt wurden. [18] Gerade dieser Befund verdient Beachtung: Die frühe Landwirtschaft konnte unter grundsätzlich günstigen Klimabedingungen expandieren, während lokale Gesellschaften dennoch durch andere Grenzen und Konflikte geprägt waren.

Für Bronze- und Eisenzeit gilt derselbe Prüfmaßstab. Die Bezeichnung einer Epoche als warm, kalt oder trocken erklärt für sich weder technische Innovation noch Migration oder Herrschaftswechsel. Ein

überzeugendes Klimaargument muss zeigen, dass ein zeitlich passender Umweltstress am betroffenen Ort auftrat, über einen plausiblen Mechanismus wirkte und gegenüber anderen Erklärungen zusätzliches Gewicht besitzt. Ein weit entferntes Proxymaximum genügt hierfür ebenso wenig wie die nachträgliche Auswahl einer politisch unruhigen Zeit.

Für die römische Epoche und Teile des Mittelalters gibt es konkretere hochaufgelöste Vergleiche. Büntgen und Mitarbeiter rekonstruierten europäische Sommerbedingungen über 2500 Jahre. Warme und hinreichend feuchte Abschnitte fielen mit römischer und mittelalterlicher Prosperität zusammen; stärkere Klimavariabilität kennzeichnete Teile der späteren Krisenzeit. [19] Das stützt die Bedeutung günstiger Wachstumsbedingungen. Es macht aus römischer Stabilität jedoch keinen Temperatureffekt, dessen Größe unabhängig von Verwaltung, Infrastruktur, Handel oder Gewalt bestimmt wäre.

Historische Wärme und gesellschaftlicher Erfolg können sich also sinnvoll ergänzen. Ein günstiger klimatischer Hintergrund erleichtert möglicherweise die Versorgung; eine gut organisierte Gesellschaft kann diese Möglichkeit nutzen. Daraus entsteht kein Naturgesetz, wonach jedes wärmere Jahrhundert automatisch friedlicher oder wohlhabender wäre. Gerade diese Unterscheidung schützt den berechtigten Hinweis auf Wärmevorteile vor einer Erklärung, die an Gegenbeispielen scheitert.

3.3. Spätantike und mittelalterliche Entwicklungen

Die Abkühlung nach den großen Eruptionen des sechsten Jahrhunderts ist ein Beispiel für einen konkreteren Wirkungszusammenhang. Büntgen und Mitarbeiter beschrieben anhand von Baumringdaten aus Alpen und Altai eine spätantike Kältephase von 536 bis etwa 660. [20] Sigl und Mitarbeiter verbesserten unabhängig die zeitliche Zuordnung vulkanischer Signale in Eisbohrkernen und zeigten den Zusammenhang großer Eruptionen mit nachfolgenden Abkühlungen. [21] Hier ergänzen sich Holz- und Eisarchive: Die Eisbohrkerne datieren den vulkanischen Antrieb, die Jahrringe dokumentieren die regionale Temperaturreaktion. Damit ist noch keine bestimmte Sensitivität polarer Temperaturproxies nachgewiesen.

Die gesellschaftlichen Folgen lassen sich trotzdem nicht in eine einzige Kausalkette pressen. Eine kürzere Vegetationszeit kann Ernten vermindern und Vorräte belasten. Ob daraus Hunger, Migration oder politische Auflösung folgt, hängt von vorhandenen Reserven, Austauschmöglichkeiten, Krieg und institutionellen Entscheidungen ab. Eine Epidemie besitzt außerdem eine eigene Erreger- und Übertragungsgeschichte. Klimatische Belastung kann eine vorhandene Verwundbarkeit verstärken; sie ersetzt diese übrigen Vorgänge nicht als Erklärung.

Die mittelalterlichen warmen Abschnitte zeigen die andere Seite. Günstige Sommerbedingungen konnten in kühlen Regionen Bewirtschaftung und Besiedlung erleichtern. Ihre zeitliche Lage und Ausprägung waren jedoch regional verschieden. Aus einem warmen Jahrhundert in den Alpen folgt deshalb nicht ohne Weiteres dasselbe Temperaturniveau in den Tropen, auf der Südhalbkugel oder im globalen Jahresmittel. Der Vergleich muss zudem dieselbe Bezugsperiode verwenden. Ein rekonstruierter Überschuss gegenüber dem späten neunzehnten Jahrhundert ist keine direkte Aussage gegenüber den 2020er-Jahren.

Die nordischen Siedlungen in Grönland illustrieren, wie eine vereinfachte Kälteerzählung präzisiert werden kann. Zhao und Mitarbeiter fanden in einer siedlungsnahen Seerekonstruktion eine anhaltende Austrocknung, während sich am untersuchten Ort keine entsprechend große Temperaturabnahme zeigte. Sie diskutierten die erschwerte Heuproduktion als Belastung für die Viehwirtschaft. [22] Der Fall bleibt klimatisch relevant. Die entscheidende Größe verschiebt sich jedoch von einer allgemeinen Jahrestemperatur zu Wasserverfügbarkeit und Futterversorgung.

3.4. Die Kleine Eiszeit und die Folgen schlechter Ernten

Die Kleine Eiszeit war keine über Jahrhunderte gleichförmige Dauerkälte. Für eine agrarische Gesellschaft konnte schon eine Folge weniger ungünstiger Vegetationsperioden schwerwiegend sein.

Die Große Hungersnot von 1315–1317 liefert dafür ein gut untersuchtes Beispiel. Baek und Mitarbeiter rekonstruierten die außergewöhnliche Feuchtigkeit der vorangehenden und begleitenden Wachstumszeiten: Das Dreijahresmittel 1314–1316 gehörte im untersuchten nordeuropäischen Gebiet zu den extremsten nassen Intervallen der Jahre 1300–2012. Südeuropa war anders betroffen. [23]

Dieser Fall verlangt genaue Begriffe. Die Krise war nicht allein das Ergebnis niedriger Temperatur, sondern einer für die Landwirtschaft ungünstigen Kombination und Dauer von Witterungsverhältnissen. Regionale Unterschiede eröffneten grundsätzlich Ausgleichsmöglichkeiten durch Handel; ob diese ausreichten, hing von Zugang, Preisen, Transport und politischer Organisation ab. Eine spätere Seuche lässt sich außerdem nicht allein deshalb derselben Kausalkette zuordnen, weil beide Ereignisse innerhalb einer langen als kühl bezeichneten Epoche liegen.

Getreidepreise liefern einen weiteren Zugang, weil sie Umwelt und gesellschaftliche Verarbeitung miteinander verbinden. Esper und Mitarbeiter untersuchten Preisreihen aus 19 europäischen Städten. Klimaeinflüsse waren erkennbar, ihre Stärke hing aber unter anderem vom Kriegsgeschehen und vom überregionalen Austausch ab. Dürre war ebenfalls mit Versorgungsschwierigkeiten verbunden. [24] Damit wird der historische Klimabeitrag konkreter: Wetter beeinflusst Ernte, während politische und wirtschaftliche Verhältnisse den Übergang von Ernteausfall zu Preis- und Versorgungskrise mitbestimmen.

Langfristige Hydroklimarekonstruktionen zeigen überdies, dass schwere Dürren und anhaltend nasse Phasen bereits in vorindustrieller Zeit auftraten. Der Old World Drought Atlas erschließt solche Veränderungen mithilfe eines ausgedehnten Jahrringnetzes für Europa und angrenzende Gebiete. [25] Historische Extreme sollten daher in Vergleiche einbezogen werden, bevor ein heutiges Ereignis als völlig neu bezeichnet wird. Aus ihrer früheren Existenz folgt umgekehrt kein unveränderliches heutiges Risiko: Häufigkeit, Intensität, räumliche Ausdehnung und heutige Betroffenheit müssen jeweils geprüft werden.

Ein späteres Beispiel ist der außergewöhnlich kalte und nasse europäische Sommer von 1816 nach dem Tambora-Ausbruch von 1815. Schurer und Mitarbeiter verglichen Beobachtungen und Modellrechnungen, um vulkanischen Antrieb und zufällige Zirkulationsschwankungen zu trennen. Der Vulkaneinfluss erhöhte in ihren Modellen die Wahrscheinlichkeit der starken Kälte erheblich; für den Niederschlag spielte die Zirkulation eine andere Rolle. [26] Dieser Fall verbindet zwei wichtige Lehren: Natürliche Abkühlung kann schwere Erntekrisen auslösen, und selbst bei einem markanten Ereignis müssen Temperatur und Niederschlag gesondert erklärt werden.

3.5. Gesellschaftliche Reaktion und die Grenzen der Katastrophenerzählung

Klima wirkt durch konkrete Lebensbedingungen und gesellschaftliche Entscheidungen. Haldon und Mitarbeiter betonen anhand historischer Beispiele, dass ähnliche Umweltbelastungen je nach politischer und wirtschaftlicher Organisation unterschiedliche Folgen haben konnten. Ihre Untersuchung verbindet historische Quellen mit Naturarchiven und warnt vor einfachen zeitlichen Gleichsetzungen. [27] Für die Gegenwart ist daran besonders relevant, dass Verwundbarkeit veränderbar ist. Die Gefährlichkeit eines schlechten Erntejahres hängt wesentlich davon ab, welche Reserven und Ausweichmöglichkeiten bestehen.

Auch die kulturelle Deutung einer Krise gehört zur Geschichte. Behringers Untersuchung der Hexenverfolgung behandelt die Verbindung von klimatischen Belastungen, zeitgenössischen Vorstellungen und sozialen Reaktionen während der Kleinen Eiszeit. [28] Daraus lässt sich keine einfache Analogie zwischen damaliger Verfolgung und heutiger Klimapolitik ableiten. Der allgemeine Erkenntnisgewinn ist enger und tragfähiger: Eine moralische Deutung von Wetter ersetzt keine Ursachenprüfung und kann die Suche nach wirksamen Gegenmaßnahmen behindern.

Die große Bedeutung von Kälte für frühere Versorgungskrisen ist damit gut begründet. Frost, kurze Sommer und lang anhaltende ungünstige Erntebedingungen waren ernsthafte Gefahren. Für kühle europäische Regionen besaßen wärmere Vegetationszeiten häufig einen praktischen Wert. Die geschichtliche Aussage bleibt jedoch an diese Bedingungen gebunden. Sie erlaubt keine ungeprüfte Fortschreibung auf jede zusätzliche Erwärmung, jeden Kontinent und jedes heutige Ökosystem.

Ein brauchbarer Vergleich ordnet deshalb vier Fragen nebeneinander an.

Historische Beobachtung	Plausibler Wirkungsweg	Belastbare Folgerung	Zusätzlich zu prüfen
Längere warme Vegetationszeit in kühlen Regionen	Mehr Zeit für Reife und Futtergewinnung	Wärme kann einen klaren Nutzen besitzen	Wasser, Spätfröste und Art beziehungsweise Kulturpflanze
Mehrere ungünstige Erntejahre	Verbrauch von Vorräten und steigende Preise	Dauer und Folge von Ereignissen sind entscheidend	Handel, Verteilung, Krieg und Ausgangsarmut
Frühere Dürren und Überschwemmungsphasen	Natürliche regionale Klimavariabilität	Die historische Vergleichsbasis muss lang genug sein	Änderungen der Wahrscheinlichkeit und heutige Exposition
Unterschiedliche Folgen ähnlicher Belastungen	Unterschiedliche gesellschaftliche Bewältigung	Anpassungsfähigkeit beeinflusst den Schaden	Welche Maßnahmen am jeweiligen Ort tatsächlich wirken

Diese Zusammenhänge rechtfertigen eine Kritik an Erzählungen, in denen Wärme grundsätzlich als zivilisationsfeindlich und ein kälterer Ausgangszustand grundsätzlich als wünschenswert erscheint. Sie verlangen zugleich eine konkrete Beschreibung der jeweiligen Lebensbedingungen. Die historische Frage lautet nicht, ob eine Epoche mit einem einzigen Adjektiv gut oder schlecht genannt werden kann. Sie lautet, welche Menschen und Lebensräume unter welchen Bedingungen gewannen oder verloren und welche Handlungsmöglichkeiten bestanden.

4. Baumreste als materielle Zeugen früherer Landschaften

Ein Baum, dessen Lebensraum später vom Gletscher überfahren wurde, verbindet Vegetationsgeschichte und Eisgeschichte. Besonders aussagekräftig ist ein noch verwurzelter Stamm. Seine Ringe können eine jahrzehnte- oder jahrhundertelange Lebensdauer belegen; sein Standort zeigt eine damals baumbestandene Fläche. Transportiertes Holz besitzt ebenfalls Informationswert, verlangt jedoch eine Rekonstruktion seines Ursprungs. Die Unterscheidung ist entscheidend, weil ein Fundpunkt am heutigen Eisrand nicht zwangsläufig der frühere Wuchsstandort ist.

Die alpine Forschung hat solche Funde über Jahrzehnte systematisch gesammelt. Eine Untersuchung von sechs Schweizer Gletschern fasste 143 Radiokohlenstoffdatierungen zu mehreren holozänen Rückzugsphasen zusammen. Ihr Vergleichszustand war die Gletscherausdehnung von 1985. [29] Die folgende Auswahl nennt deshalb stets den historischen Bezug der Aussage.

Untersuchung	Materieller Befund	Klimatische Bedeutung	Geltungsgrenze
Pasterze [30]	Frühholozäne Hölzer und Torf, darunter jahrhundertealte Bäume	Lange eisfreie Standorte im Einzugsgebiet und kleinerer Gletscher als um 2000	Ausgeschwemmtes Material mit begrenzter Standortgenauigkeit
Tschierva [31]	Datierte Hölzer, Geländeinformationen und Gletschermodell	Sommerwärme während früher Rückzugsphasen gegenüber 1960–1985	Temperaturwert hängt von angenommenem Niederschlag ab

Untersuchung	Materieller Befund	Klimatische Bedeutung	Geltungsgrenze
Mont Miné und Morteratsch [32]	Bäume wurden am Übergang zur Kleinen Eiszeit überfahren	Die Vergletscherung erfasste zuvor bewachsene Flächen	Regionale Vorstoßgeschichte mit unterschiedlichen Einzelterminen
Morteratsch [33]	Frühholozäne Baumserie mit präzise eingegrenztem späteren Vorstoß	Mindestens 430 Jahre geringere Ausdehnung als ungefähr 2020	Aussage über diesen Gletscher, keine globale Temperaturbestimmung

Der Morteratsch-Fund einer Lärche auf 2156 Metern Höhe wurde 2026 gesondert beschrieben. Die erhaltenen Wurzeln begrenzen die mögliche Verlagerung; sie beweisen dennoch nicht völlig ungestörte Wuchsposition. [34] Gerade die sorgfältige Beschreibung macht den Befund stärker als eine vereinfachte Erzählung von einem beliebig weit transportierten Holzstück oder einem zweifelsfrei unangetasteten Wald.

Eine solche Landschaftsrekonstruktion kann sehr belastbar sein, obwohl die daraus abgeleitete Temperaturspanne breiter bleibt. Bäume brauchen hinreichende Sommerbedingungen; Gletscher reagieren auf das Verhältnis zwischen Schneegewinn und Eisverlust. Mehrere Kombinationen von Temperatur und Niederschlag können deshalb eine ähnliche Eisausdehnung ergeben. Die zutreffende Mindestfolgerung lautet, dass der jeweilige Standort über längere Zeit nicht dauerhaft eisbedeckt war und Baumwachstum erlaubte. Ein bestimmter Temperaturüberschuss benötigt eine zusätzliche Modellierung.

Die Datierung muss ebenfalls auf den tatsächlich gemessenen Vorgang bezogen werden. Ein unkalibriertes Radiokohlenstoffalter wird nicht durch einfaches Abziehen von 1950 zu einem Kalenderjahr. Ein letzter erhaltener Jahrring ist bei fehlender Außenkante nicht unbedingt das Todesjahr. Der Tod eines Baumes muss wiederum nicht im selben Jahr wie seine Überfahrung durch Eis erfolgt sein. Die Kombination von Ringfolgen, mehreren Radiokohlenstoffmessungen, Wurzellage und Sedimentbefund kann diese Unterschiede eingrenzen.

Zwei verbreitete Schlussfehler lassen sich dadurch vermeiden. Erstens beweist ein Baum unter einer ehemaligen Gletscherzunge keine frühere Baumgrenze oberhalb der heutigen: Die Zunge kann in eine grundsätzlich waldfähige Höhenlage vorgestoßen sein. Zweitens muss eine heute frisch freigelegte Fläche noch nicht wieder bewaldet sein, obwohl ihr Klima Baumwachstum erlaubt. Besiedlung und Wachstum benötigen Zeit. Auch die aktuelle Gletscherausdehnung kann dem veränderten Klima hinterherlaufen.

Die Funde widerlegen außerdem nicht die Existenz lange erhaltener Hochlagenvereisung. Bohleber und Mitarbeiter datierten basales Eis an der Weißseespitze in etwa 3500 Metern Höhe auf ungefähr 5900 Jahre und untersuchten die unterschiedlichen Erhaltungsgeschichten hochalpiner Eisarchive. [35] Daraus ergibt sich ein räumlich gegliedertes Bild: Zeitweise bewaldete oder eisfreie Tal- und Hangabschnitte konnten neben weiterhin vereisten Gipfelregionen bestehen. Die Formulierung einer allgemein eisfreien Alpenwelt wäre zu grob.

Für die weitere Argumentation besitzen die Baumfunde deshalb die Funktion unabhängiger Prüfbedingungen. Eine regionale Rekonstruktion muss die belegten Lebensräume ermöglichen. Falls sie das nicht tut, sind Fundinterpretation, ökologische Umrechnung und Temperaturrekonstruktion gemeinsam zu prüfen. Die Existenz eines Widerspruchs ist ein Forschungsauftrag; seine Ursache steht nicht schon vor der Untersuchung fest.

5. Klimarekonstruktionen und historische Variabilität

5.1. Unterschiedliche Archive beschreiben unterschiedliche Klimagrößen

Ein Baumstamm unter einem zurückweichenden Gletscher ist ein materieller Zeuge früherer Lebensbedingungen. Wenn der ehemalige Wuchsort gesichert ist, muss dort über eine gewisse Zeit ausreichend Raum für Wachstum bestanden haben. Dieser Befund kann nicht durch eine Kurve widerlegt werden, die an einem anderen Ort eine andere Klimagröße beschreibt. Umgekehrt enthält der Stamm keine unmittelbare Angabe zur damaligen globalen Jahresmitteltemperatur. Die entscheidende Aufgabe besteht darin, die Aussagen verschiedener Archive sachgerecht miteinander zu verbinden.

Die Wasserisotope $\delta^{18}O$ und δD gehören zum Eis selbst. Ihre Zusammensetzung hängt von Temperatur, Feuchtetransport, Niederschlagsverteilung und Standortbedingungen ab. Eine vor allem in schneereichen Monaten gebildete Isotopenreihe ist deshalb nicht automatisch ein gleichmäßig gewichtetes Jahresmittel. Die Umrechnung verlangt eine Prüfung des jeweiligen Orts und Zeitraums. [36]

Das eingeschlossene CO_2 hat eine andere Bedeutung. Hier wird die Zusammensetzung früherer Luft gemessen. Die Luft konnte noch durch die poröse Firnschicht wandern, nachdem der Schnee bereits gefallen war. Deshalb unterscheiden sich Eisalter und Gasalter; außerdem besitzt die Luft einer Probe eine Altersverteilung. Diese Gasgeschichte darf weder mit der Isotopenentwicklung des Niederschlagswassers noch mit einem direkten Temperaturprotokoll verwechselt werden. [37]

Einwandfreie Kritik muss daher benennen, ob sie die Konzentrationsmessung, die Temperaturkalibrierung, die zeitliche Auflösung oder die räumliche Übertragung betrifft. Ein Problem auf einer dieser Ebenen überträgt sich nicht ohne weiteren Nachweis auf die anderen. Ebenso wenig kann die geringe Schwankung einer CO_2-Kurve allein zeigen, dass gleichzeitig geringe Temperaturschwankungen geherrscht haben müssten. Die beiden Größen sind physikalisch verbunden, aber sie sind nicht identisch und besitzen weitere Einflussfaktoren.

Die Baumfunde gewinnen gerade durch diese Unterscheidung an Aussagekraft. Sie ergänzen chemische und physikalische Archive um eine biologische Randbedingung. Eine Rekonstruktion, die den belegten Lebensraum eines alten Waldes ausschließen würde, müsste überprüft werden. Ob dafür die Temperatur, die Schneeverhältnisse, der angenommene Wuchsort oder die zeitliche Zuordnung verantwortlich ist, bleibt eine konkrete Untersuchungsfrage.

5.2. Nachgewiesene Fehler und ihre Reichweite

Dass die Temperaturamplitude eines Archivs unterschätzt werden kann, ist keine bloße Vermutung. Cuffey und Clow ermittelten durch die Verbindung von Bohrlochtemperatur, Isotopendaten und Eisflussmodell etwa 15 Grad Erwärmung zwischen mittleren glazialen und holozänen Bedingungen in Zentralgrönland. Die ältere Isotopenthermometrie hatte ungefähr die Hälfte ergeben. Die Umrechnung vom Isotopensignal zur Temperatur war hier entscheidend. [38]

Vinther und Mitarbeiter trennten Änderungen der grönländischen Eishöhe von klimatisch bedingten Änderungen der Wasserisotope. Dadurch wurde ein ausgeprägtes Holozänoptimum erkennbar, das aus den zuvor unterschiedlich interpretierten Kurven nicht einheitlich hervorgegangen war. Das Beispiel zeigt, wie Veränderungen des Archivs selbst ein langfristiges Klimasignal überlagern können. Es zeigt zugleich, dass eine verbesserte Auswertung dieses Signal zurückgewinnen kann. [39]

Für die Mittelbreiten ist eine Untersuchung von Liu und Mitarbeitern besonders aufschlussreich. Sie fanden für 20 bis 50 Grad nördlicher Breite eine möglicherweise stark unterschätzte holozäne Änderung der Sommer-Winter-Differenz. Besonders problematisch erschienen pollenbasierte Wintertemperaturen. Die diskutierte Unterzeichnung um mehr als 70 Prozent betrifft die

Saisonalitätsänderung gegenüber einem beobachtungsbasierten Analogmodell, ausdrücklich nicht eine entsprechende Unterschätzung der globalen Jahresmitteltemperatur. [40]

Diese Beispiele geben der Kritik einen präzisen Gegenstand. Sie betreffen verschiedene Fehlermechanismen und erlauben deshalb keinen gemeinsamen pauschalen Korrekturfaktor. Im ersten Fall geht es um die Temperaturkalibrierung eines großen glazialen Übergangs, im zweiten um eine veränderliche Eishöhe, im dritten um saisonale Rekonstruktionen. Wer daraus eine allgemeine Verdoppelung historischer Globaltemperaturschwankungen ableitet, überspringt genau die Arbeit, durch die die Befunde gewonnen wurden.

Auch Signal und Rauschen müssen getrennt werden. Münch und Laepple zeigten anhand benachbarter antarktischer Firnkerne, dass das gemeinsame Klimasignal teilweise mehr langperiodische Variabilität enthält, als Einzelkerne erkennen lassen. Die Ergebnisse unterschieden sich jedoch zwischen Untersuchungsregionen. Lokale Störungen können eine Klimaschwankung verdecken, aber ebenso zusätzliche scheinbare Schwankungen erzeugen. [36]

Es wäre außerdem falsch, jede Abweichung mit Diffusion zu erklären. Badgeley und Mitarbeiter beurteilen diese für die von ihnen verwendeten grönländischen Kerne auf jährlichen und längeren Zeitskalen als vernachlässigbar. Sie betonen dagegen die Abhängigkeit der Isotopenkalibrierung von Saisonalität und Klimazustand. [41] Die angemessene Kritik lautet somit nicht, dass Eisarchive grundsätzlich zu träge seien. Sie verlangt, ihre tatsächliche Empfindlichkeit und ihre Übertragungsfunktion zu bestimmen.

5.3. Kleine Mittelwerte und verlorene Signale

Eine geringe Amplitude kann durch zwei grundverschiedene Vorgänge entstehen. Entweder verändert sich die untersuchte Mittelgröße tatsächlich weniger stark als einzelne Teile des Systems, oder das Messverfahren verliert einen Teil ihres Signals. Nur im zweiten Fall wird dieselbe Zielgröße zu schwach rekonstruiert. Ohne diese Unterscheidung entsteht aus einer richtigen regionalen Beobachtung leicht eine falsche globale Folgerung.

Ein bewusst vereinfachtes Rechenbeispiel macht das deutlich. Eine Region umfasse ein Fünftel der Erdoberfläche und erwärme sich um zwei Grad. Die übrigen vier Fünftel kühlten sich gleichzeitig um ein halbes Grad ab. Dann beträgt die globale Änderung $G = 0{,}2 \cdot 2 + 0{,}8 \cdot (-0{,}5) = 0$ Grad. Beide regionalen Änderungen wären vollständig real. Das unveränderte globale Mittel wäre trotzdem richtig gemessen. Das Beispiel beschreibt keine bestimmte historische Epoche; es zeigt nur, was Flächenmittelung mathematisch bedeutet.

Entsprechendes gilt für die Jahreszeiten. Wird ein dreimonatiger Sommer zwei Grad wärmer und ein gleich gewichteter dreimonatiger Winter zwei Grad kälter, während die übrigen Monate unverändert bleiben, ändert sich das vereinfachte Jahresmittel nicht. Dennoch können sich sommerliche Baumwachstumsbedingungen und Schmelzbedingungen erheblich verändern. Ein auf Sommerbedingungen reagierendes Archiv und ein Jahresmittel müssen deshalb nicht dieselbe Kurve liefern. Ihr Unterschied kann zusätzliche Information enthalten, statt einen Fehler zu beweisen.

Davon zu unterscheiden ist zeitliche Glättung. Dauert in einem angenommenen 200-Jahr-Fenster eine Erwärmung um zwei Grad nur 40 Jahre, während die übrigen 160 Jahre auf dem Ausgangsniveau liegen, ergibt der Fensterdurchschnitt lediglich 0,4 Grad. Wer diese 0,4 Grad als maximale damalige Erwärmung bezeichnet, verwechselt das Mittel mit dem zeitlich begrenzten Maximum. Ein korrekt beschrifteter Durchschnitt ist jedoch weiterhin korrekt. Zur Rekonstruktion des Maximums benötigt man eine entsprechend auflösende Datenreihe.

Archivfilter, Datierungsfehler und statistische Verfahren können einen vergleichbaren Verlust hervorrufen. Dann muss überprüft werden, ob die behauptete Schwankung nach Anwendung des tatsächlich bekannten Filters noch erkennbar wäre. Ein Filter, der wenige Jahre verwischt, darf nicht

ohne Berechnung für ein verschwundenes jahrhundertelanges Signal verantwortlich gemacht werden. Ebenso muss ein heutiges Temperaturjahr vor dem Vergleich mit einer historischen Jahrhundertkurve auf einen vergleichbaren Zeitraum bezogen werden.

Die Baumfunde rechtfertigen folglich die Forderung, regionale und saisonale Klimageschichte nicht in einem einzigen Mittelwert verschwinden zu lassen. Sie ersetzen aber nicht die notwendige Bestimmung dieses Mittelwerts. Beide Betrachtungen erfüllen unterschiedliche wissenschaftliche Aufgaben.

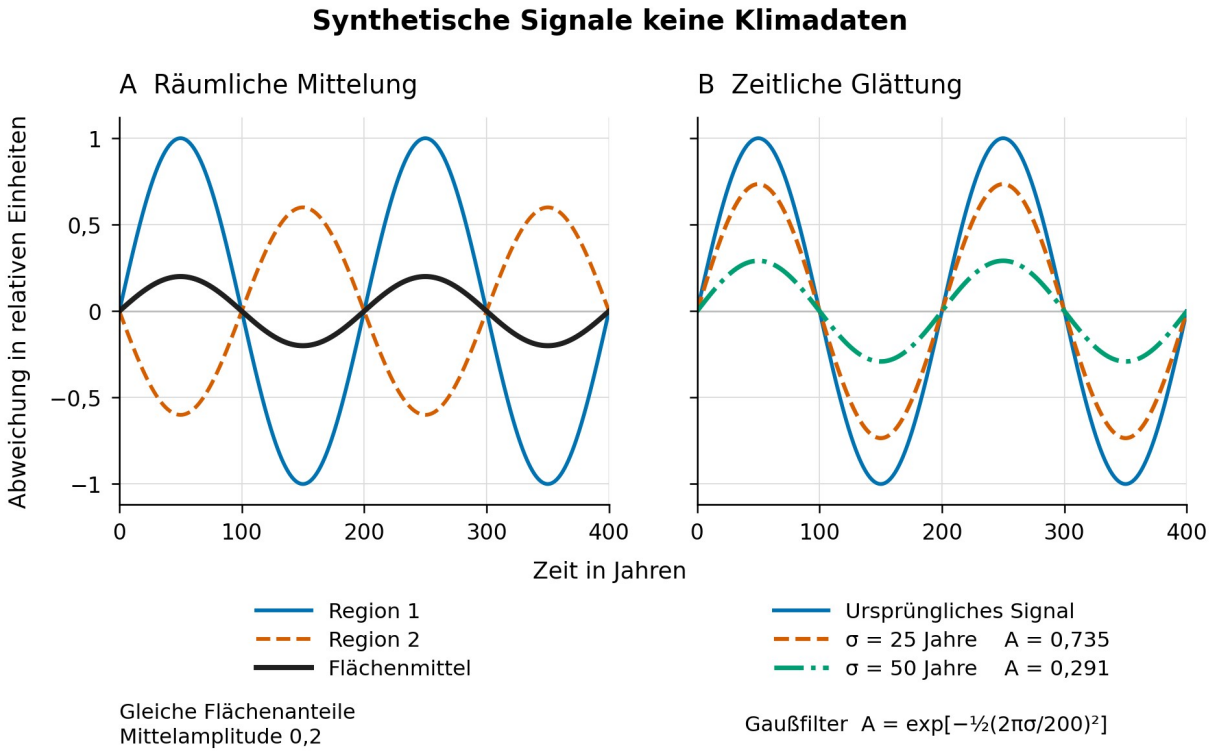


Abbildung 1 — Zwei Gründe für kleinere Amplituden. Links besitzen zwei gleich große, hypothetische Regionen gegenläufige Temperatursignale; ihr korrektes Flächenmittel ist kleiner als beide regionalen Amplituden. Rechts schwächt eine Gaußglättung dasselbe Ausgangssignal ab. Die Filterbreiten sind frei gewählte Rechenbeispiele und beschreiben keinen bestimmten Eisbohrkern. Eigene Darstellung mit synthetischen Signalen.

5.4. Globale Rekonstruktionen und ihre tatsächliche Datenbasis

Die Vorstellung, globale Holozänkurven seien im Wesentlichen aus polaren Eisbohrkernen abgeleitet, trifft auf wichtige heutige Datensammlungen nicht zu. Temperature12k enthält 1319 Reihen aus 679 Orten. Die Standortverteilung umfasst rund 51 Prozent Seen, 31 Prozent marine Archive, 11 Prozent Torf und 3 Prozent Gletschereis. Jahresmittel und saisonale Signale werden unterschieden. [42] Eine Kritik der Globalrekonstruktion muss daher die Auswahl und Gewichtung dieses vielfältigen Materials prüfen.

Die Ergebnisse verschiedener Verfahren sind auch nicht deckungsgleich. Kaufmans Auswertung mit fünf Rekonstruktionsmethoden ergibt ein mittelholozänes globales Wärmemaximum mit beträchtlicher Unsicherheit. [43] Bova und Mitarbeiter betonen demgegenüber die saisonale Prägung mariner Proxys und entwickeln eine Umrechnung auf Jahresmittel. [44] Osman und Mitarbeiter verbinden marine Proxys mit Klimamodellen durch Datenassimilation. [45] Bovas auf Jahresmittel umgerechnete Meeresoberflächentemperaturen und Osmans globales Jahresmittel zeigen dabei einen langfristigen holozänen Erwärmungstrend, statt das mittelholozäne Maximum in derselben Form zu bestätigen. Die letzte Methode erzeugt räumliche Vollständigkeit teilweise durch Modellbeziehungen; sie darf weder als reine Messung noch als von Beobachtungen unabhängige Modellrechnung bezeichnet werden.

Für kürzere historische Zeiträume zeigen Christiansen und Ljungqvist, dass Verfahren zur Erhaltung niederfrequenter Variabilität vergleichsweise ausgeprägte mittelalterliche Wärme und frühneuzeitliche Kälte rekonstruieren können. Ihr Untersuchungsgebiet umfasst jedoch die außertropische Nordhalbkugel, nicht die gesamte Erde. [46] Neukom und Mitarbeiter zeigen wiederum regional unterschiedliche Zeitpunkte vorindustrieller Warm- und Kaltmaxima. [47] Solche Unterschiede dürfen nicht durch nachträgliches Zusammenlegen aller regionalen Wärmeepisoden zu einem einzigen vermeintlich globalen Maximum beseitigt werden.

Hier liegt der sachliche Kern einer offenen Rekonstruktionskritik. Die Amplitude historischer Variabilität ist eine überprüfbare empirische Größe mit methodischen Unsicherheiten. Sie ist weder durch eine besonders glatte Kurve abschließend bestimmt noch durch einzelne auffällige Gegenbeispiele bereits global korrigiert.

5.5. Eine überprüfbare Hypothese zur historischen Variabilität

Die aus den Baumfunden ableitbare Arbeitshypothese lässt sich genauer formulieren: Bestimmte Rekonstruktionen könnten mehrdekadische bis mehrhundertjährige Sommerwärme in einzelnen Mittelbreitenregionen unterschätzen, weil saisonale Empfindlichkeit, veränderliche Kalibrierung, Datierungsunsicherheit oder statistische Behandlung einen Teil der Variabilität unterdrücken. Diese Formulierung bezeichnet den möglichen Fehler, seinen räumlichen Bezug und die betroffene Zeitgröße. Dadurch wird sie wissenschaftlich prüfbar.

Zuerst wären die Holzfunde unabhängig nach Wuchsort, Alter, Lebensdauer und möglicher Umlagerung zu ordnen. Danach müsste untersucht werden, welche örtlichen Bedingungen für diese Vegetation erforderlich waren. Anschließend wären lokale Temperatur- und Niederschlagsarchive auf derselben Zeitachse zu vergleichen. Besonders aussagekräftig wäre eine Rekonstruktion, die einen Fundort nicht zur Kalibrierung verwendet und dennoch dessen belegte Wachstumsbedingungen richtig vorhersagt. Das würde eine bloße Anpassung an das gewünschte Ergebnis vermeiden.

Erst ein weiterer Schritt könnte zeigen, ob auch das globale Jahresmittel unterschätzt wurde. Dazu wären voneinander unabhängige Regionen beider Hemisphären, tropische Gebiete und die großen Ozeanflächen einzubeziehen. Gleichzeitigkeit, Flächengewichtung und Jahresmittelbezug müssten erhalten bleiben. Eine Sammlung vieler interessanter Standorte ist noch keine repräsentative Stichprobe der Erde.

Die regionale Untererfassungsthese würde geschwächt, wenn die örtliche Sommerwärme bereits zutreffend in den regionalen Proxys erscheint. Ihre globale Erweiterung würde geschwächt, wenn kühlere Winter das Jahresmittel ausgleichen oder die Wärmeepisoden verschiedener Regionen zeitlich auseinanderfallen. Gestärkt würde die jeweilige These, wenn unabhängige Archive nach Angleichung von Raumbezug, Zeitauflösung und Jahreszeit systematisch größere gemeinsame Schwankungen verlangen, als das untersuchte Rekonstruktionsverfahren zulässt. Ein solcher Befund wäre eine konkrete wissenschaftliche Korrektur und hätte mehr Gewicht als eine allgemeine Erklärung, Eisbohrkerne seien unzuverlässig.

Für die Bewertung von CO_2 folgt daraus eine Grenze ebenso wie ein Gewinn. Historische Klimaänderungen müssen in ihrer wirklichen Vielfalt dargestellt werden; ein einzelner Konzentrationswert erklärt nicht jede regionale Umweltentwicklung. Wie stark ein zusätzlicher CO_2-Anstieg die Strahlungsbilanz verändert, ist damit jedoch noch nicht beantwortet. Die Kritik an einer verkürzten Klimageschichte wird belastbarer, wenn sie diese zweite Frage mit eigenen physikalischen und empirischen Belegen behandelt.

6. ICR Arbeiten im Vergleich mit unabhängigen Befunden

6.1. Die Cochstedter Chronik

Historische Wetterzeugnisse erschließen eine Dimension der Klimageschichte, die eine Temperaturkurve allein nicht vermittelt: die Folgen für Ernten, Ernährung, Verkehrswege und die Versorgung mit Wasser und Brennstoff. Das ICR-Projekt zur Cochstedter Kirchen- und Stadtchronik untersucht Aufzeichnungen aus den Jahren 1668 bis 1888. Martin Steiner beschreibt die überlieferten Unterlagen als achtzehnseitige Auswahl, die der Vater eines späteren Überbringers angefertigt habe. Sein Bericht enthält schwere Kälteereignisse, aber auch Hitze und Dürre. Für 1800 nennt er vertrocknende Bäume und stillstehende Wassermühlen, für 1803 Ohnmachten während der Sommerhitze. [48] [49]

Solche Zeugnisse verdienen Beachtung. In einer landwirtschaftlich geprägten Gesellschaft konnte ein später Frost eine Ernte vernichten; ein milderes Klima konnte die Vegetationsperiode verlängern. Entscheidend blieb jedoch, ob Niederschlag, Jahreszeiten und Extremereignisse zu den angebauten Kulturen und verfügbaren Techniken passten. Ein warmer Jahresmittelwert schützt weder vor einem einzelnen schadenträchtigen Frost noch vor einer sommerlichen Wasserknappheit. Die Chronik lässt sich deshalb überzeugend gegen die Vorstellung anführen, Kälte sei grundsätzlich harmlos. Eine allgemeine Überlegenheit jedes wärmeren Klimas belegt sie nicht.

Für quantitative Vergleiche benötigt man außerdem die Überlieferungsgeschichte. Ohne vollständige Edition, Auswahlregeln und gleichmäßige Beobachtungsdichte bleibt offen, ob eine Häufung berichteter Schäden eine klimatische Veränderung, veränderte Aufmerksamkeit oder eine andere Auswahl widerspiegelt. Extreme Einträge besitzen keinen selbstverständlichen statistischen Nenner. Eine örtliche Chronik kann konkrete Notlagen dokumentieren, liefert aber allein weder die flächenmittlere Temperatur Europas noch eine globale Temperaturverteilung. Diese Grenze mindert ihren historischen Wert nicht; sie bestimmt die Fragen, die sich mit ihr beantworten lassen.

6.2. Gegenstrahlungsmessungen 2024 und 2025

Hammel und Mitautoren untersuchten 2024 die zusätzliche Infrarotstrahlung verschiedener Gase im Labor und unter klarem Nachthimmel. In einem mit Stickstoff gefüllten Zylinder wurde CO_2 schrittweise zugegeben. Für den Feldversuch berichten sie bei Konzentrationen bis 5000 ppm kein auflösbares zusätzliches Signal. Auf Seite 424 beziffern sie das erwartete Signal allerdings selbst auf weniger als 3 µW, während der nutzbare Bereich des Detektors bei 10 µW beginnt. Ein anderes untersuchtes Gas, R134a, erzeugte dagegen eine erkennbare Reaktion. Die Autoren verbinden diese Ergebnisse mit weitergehenden Aussagen über eine geringe globale CO_2-Wirkung. [50]

Der entscheidende Unterschied liegt zwischen Nichtnachweis und Ausschluss. Wenn ein erwartetes Signal unterhalb des nutzbaren Messbereichs liegt, bestätigt seine Unsichtbarkeit zunächst die Begrenzung des Versuchs. Sie beweist nicht, dass der zugrunde liegende Effekt fehlt. Eine belastbare Obergrenze verlangte eine geeignete Kalibrierung, ein vollständiges Fehlerbudget und ein angegebenes Konfidenzintervall. Selbst eine solche Grenze beträfe zunächst den untersuchten Aufbau. Ihre Übertragung auf die gesamte Atmosphäre müsste zusätzlich begründet werden.

Die Folgearbeit von Hammel, Steiner und Glaubauf aus dem Jahr 2025 verwendet Pyrgeometer und dünne Folienkammern bei Versuchen in Ägypten und Wien. Sie berichtet einen positiven zusätzlichen CO_2-Strahlungsfluss: Für den Wüstenversuch bei 15 Volumenprozent CO_2 in der Versuchskammer ergeben unterschiedliche Auswertungen etwa 1,5 beziehungsweise 2,1 W/m². Auf Seite 636 beschreiben die Autoren ausdrücklich einen logarithmischen Anstieg und vergleichen ihn mit MODTRAN-Berechnungen. Die Temperaturumrechnung auf der folgenden Seite erfolgt ohne Rückkopplungen. Die Autoren benennen zudem Begrenzungen ihres Versuchs, darunter nur einen Wüstenlauf und den Bedarf an weiterer Modellierung. [51]

Damit wäre es unzutreffend, beide Arbeiten als experimentellen Nachweis einer vollständigen Wirkungslosigkeit zusätzlichen CO_2 zusammenzufassen. Gerade die zweite Arbeit dokumentiert eine messbare Reaktion. Eine logarithmische Beziehung bedeutet abnehmenden Zuwachs je zusätzlichem ppm, aber keinen verschwindenden Effekt einer Verdopplung. Für die idealisierte Beziehung

$$F(C)=a\ln(C/C_0)$$

gilt unabhängig von der Ausgangskonzentration

$$F(2C)-F(C)=a\ln 2.$$

Welche Größe der Koeffizient annimmt, hängt vom betrachteten Strahlungsproblem ab. Eine bodennahe Kammer und die Atmosphäre sind hierbei nicht austauschbar. Dieselbe Zahl von Molekülen entlang eines Strahlungswegs garantiert bei unterschiedlichen Druck- und Temperaturprofilen nicht dieselbe Strahlungsänderung. Emissionstemperatur, Druckverbreiterung und Überlappung der Absorptionsbanden müssen berücksichtigt werden. Die MODTRAN-Dokumentation unterscheidet entsprechend zwischen dem Blick vom Boden nach oben und der ausgehenden Strahlung ins All; sie weist außerdem darauf hin, dass eine Strahlungstransferrechnung die globale Temperaturantwort nicht selbst bestimmt. [52]

Als ergänzende Beobachtung berichten Feldman und Mitautoren für zwei Messstandorte zwischen 2000 und 2010 einen zusätzlichen klarhimmeligen CO_2-Oberflächenantrieb von ungefähr 0,2 W/m² pro Jahrzehnt. Die Auswertung verbindet spektrale Messungen mit unabhängigen Angaben zum Atmosphärenzustand und Strahlungstransferrechnungen. Auch diese Arbeit unterscheidet Oberflächenantrieb und Antrieb an der Tropopause. Sie demonstriert die Nachweisbarkeit kleiner zusätzlicher Signale, bestimmt aber für sich allein keine Gleichgewichts-Klimasensitivität. [53]

6.3. Monte Carlo Modelle und Attribution

Klaus Retzlaff untersucht in undatierten Arbeitsmanuskripten, welche Temperaturverläufe ein stochastisches Modell mit einer rückstellenden Thermostatfunktion erzeugen kann. Das achtzehnseitige Manuskript übernimmt die Streuung jährlicher Temperaturdifferenzen aus HadCRUT5 und vergleicht simulierte Verläufe mit der beobachteten Entwicklung. Es erkennt ausdrücklich eine mittlere Jahresdifferenz von 0,00877 K und damit ungefähr 1,5 K Erwärmung über 173 Jahre an. Auf den Seiten 14 und 15 bezeichnet der Autor den Nutzen seines Modells als vorwiegend heuristisch und erklärt, dass es keine expliziten physikalischen Elemente des Klimasystems abbildet. [54]

Diese Herangehensweise stellt eine berechtigte Frage: Wie ungewöhnlich ist ein beobachteter Verlauf unter einer genau beschriebenen Alternative? Zufällige Schwankungen können zeitweise gerichtete Verläufe hervorbringen. Ein Erwärmungsabschnitt ist deshalb noch keine vollständige Ursachenerklärung. Die Tragfähigkeit der Antwort hängt jedoch davon ab, ob das gewählte Nullmodell die relevante natürliche Variabilität unabhängig und auf den richtigen Zeitskalen beschreibt.

Besondere Sorgfalt verlangt die Regression der Jahresdifferenzen. Das Projektblatt nennt hierfür ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0{,}005$. [55] Sei T_t die Temperatur und $D_t = T_t - T_{t-1}$ ihre Jahresdifferenz. Bereits für eine lineare Erwärmung gilt

$$T_t=A+Bt \Rightarrow D_t=B.$$

Die Differenzen besitzen dann keine zeitliche Steigung, obwohl die Temperatur steigt. Allgemeiner ergibt die Summation von $D_t = c + dt + \varepsilon_t$

$$T_n=T_0+nc+dn(n+1)/2+\Sigma_{t=1}^{n}\varepsilon_t.$$

Der konstante Anteil c erzeugt einen linearen Temperaturtrend; d beschreibt dessen Beschleunigung. Ein niedriges R^2 der Differenzenregression prüft deshalb nicht die Hypothese einer fehlenden Erwärmung. Der Einwand lautet ausdrücklich nicht, Retzlaff habe den beobachteten Anstieg übersehen.

Er betrifft die Weiterverwendung des niedrigen Bestimmtheitsmaßes der Differenzenregression als Argument gegen einen Temperaturtrend oder dessen anthropogene Ursache.

In der fünfseitigen Fingerprint-Studie beginnen eine Million simulierte Verläufe bei 13,3 °C; die angenommene stationäre Normalmitte liegt bei 15 °C. Im Modell wird diese Mitte durchschnittlich nach 83 Jahren erstmals erreicht. Der beobachtete Zeitraum von 113 Jahren erscheint innerhalb dieser Konstruktion daher nicht ungewöhnlich. [56] Das ist ein Ergebnis unter festgelegten Voraussetzungen. Beginnt ein rückstellender Prozess unterhalb seiner vorgegebenen Mitte, gehört die Rückkehr bereits zur Modellhypothese. Ob diese Mitte und Rückstellungsdynamik das reale Klima beschreiben, bedarf einer davon unabhängigen Begründung.

Auch die jährliche Streuung legt die Jahrhundertvariabilität nicht fest. Für aufsummierte Differenzen gilt

$$\mathrm{Var}(\Sigma_t D_t) = \Sigma_t \mathrm{Var}(D_t) + 2\Sigma_{s<t} \mathrm{Cov}(D_s, D_t).$$

Die zeitlichen Abhängigkeiten entscheiden somit mit über die langfristige Streuung. Mehr Simulationsläufe verringern den Monte-Carlo-Fehler, nicht die Unsicherheit der Modellannahmen. Die herangezogene Studie von Ribeiro und Mitautoren beschreibt zudem eine regionale marine Rekonstruktion aus Disko Bay über 1500 Jahre. Sie stellt keine globale zehntausendjährige Temperaturverteilung bereit. [57] Für die Attribution müssten neben der globalen Temperatur auch räumliche, vertikale, ozeanische und spektrale Befunde sowie explizite natürliche und anthropogene Antriebe berücksichtigt werden.

Eine modellgestützte Ursachenprüfung anhand von Temperaturmustern liegt bereits in der breiteren Fachliteratur vor. Gillett und Mitarbeiter kombinierten Klimamodell-Experimente mit einer statistischen Fingerabdruckanalyse und schätzten den menschlich verursachten Temperaturbeitrag für 2010–2019 gegenüber 1850–1900 auf 0,9–1,3 °C, bei einer beobachteten Erwärmung von etwa 1,1 °C. [58] Diese modellgestützte Attribution ist an ihre Annahmen und Unsicherheiten gebunden. Sie wird aber durch die bloße Möglichkeit eines ähnlich aussehenden Zufallspfades nicht widerlegt. Ein konkurrierendes Modell müsste die zugrunde liegenden Daten und räumlichen Muster mindestens ebenso gut erklären und seine langfristige natürliche Variabilität unabhängig rechtfertigen. Eine Kritik öffentlicher Dramatisierung erfordert keine Zurückweisung eines gut begründeten menschlichen Beitrags zur Erwärmung.

6.4. Konsequenzen für die Bewertung

Die ICR-Arbeiten liefern überprüfbare Messungen, historische Quellen und heuristische Gegenmodelle. Ihr Nutzen wächst, wenn ihre jeweiligen Geltungsbereiche eingehalten werden. Eine lokale Chronik beantwortet andere Fragen als ein Strahlungsexperiment; ein stochastischer Temperaturpfad beantwortet andere Fragen als eine vollständige Ursachenanalyse. Aus berechtigten Einwänden gegen Übertreibungen entsteht deshalb noch keine allgemeine Entwarnung. Eine belastbare Bewertung benennt, welche Wirkung tatsächlich gemessen wurde, welche Übertragung ein Modell voraussetzt und welche gesellschaftlichen oder ökologischen Folgen erst gesondert untersucht werden müssen.

7. Was eine sachliche Kritik an der Dramatisierung tragen kann

7.1. Die belastbaren Argumente

Der erste tragfähige Einwand betrifft die Darstellung des Stoffes selbst. Die Photosynthese und die experimentell bestätigten Wachstums- und Fortpflanzungsreaktionen gehören in jede umfassende CO_2-Bewertung. Das gilt ebenso für die ökologischen Risiken starken CO_2-Mangels. Dass nicht alle Pflanzen dieselbe Untergrenze besitzen, macht eine Absenkung in artspezifisch einschränkende Bereiche nicht harmlos. Gerade unterschiedliche Reaktionen können die Zusammensetzung der Vegetation und damit die Lebensgrundlagen abhängiger Tiere verändern. [7] [6] [9] Eine Erzählung, die ausschließlich

Gefährdung durch höheres CO_2 kennt, ist deshalb biologisch unvollständig. Eine Gesamtbilanz muss die verschiedenen Wirkungen und ihren jeweiligen Geltungsbereich offenlegen.

Der zweite Einwand betrifft die historische Vergleichsbasis. Europäische Gesellschaften lebten mit erheblichen natürlichen Schwankungen; Kälte und ungünstige Vegetationsbedingungen konnten schwere Schäden verursachen. Diese Erfahrung begründet den Nutzen von Wärme unter bestimmten Bedingungen und den Wert stabiler Versorgung. Sie stellt die Vorstellung infrage, ein kälterer Zustand sei grundsätzlich lebensfreundlicher. Eine präzise historische Argumentation beschreibt allerdings, für welche Region, Jahreszeit und Lebensweise der Vorteil galt.

Der dritte Einwand betrifft die Rekonstruktion vergangener Veränderungen. Die Untersuchung von Holz, Sediment, Eis und historischen Aufzeichnungen zeigt, wie viel Information eine einzige globale Kurve ausblendet. Ein globales Mittel kann zur Beschreibung des planetaren Energiezustands sinnvoll sein und gleichzeitig zu wenig über einen alpinen Wald oder eine mitteleuropäische Ernte aussagen. Eine öffentliche Darstellung sollte dieses Mittel deshalb mit regionalen und saisonalen Größen ergänzen. Die ökologische Bedeutung eines örtlichen Extremums verschwindet nicht dadurch, dass es den globalen Mittelwert wenig verändert.

Der vierte Einwand ist methodisch besonders konkret. Es gibt nachgewiesene Fehlerquellen, die rekonstruierte Temperaturänderungen abschwächen können. Korrekturen an Höhenentwicklung, saisonaler Gewichtung oder Kalibrierung gehören daher zur Forschung und dürfen nicht als grundsätzlich unzulässiger Zweifel behandelt werden. Gleichzeitig ist jede vorgeschlagene Korrektur überprüfungsbedürftig. Eine Methode wird durch bessere unabhängige Vorhersagen überzeugend, nicht durch die größere Amplitude ihrer Kurve.

Der fünfte Einwand betrifft den Übergang von naturwissenschaftlicher Beobachtung zu gesellschaftlicher Bewertung. Eine CO_2-Konzentration enthält keine Angaben über Wohnverhältnisse, Wasserspeicherung, Landwirtschaft, Küstennutzung, Technologie oder Zugang zu Versorgung. Eine Schadensaussage braucht diese zusätzlichen Informationen. Ihre Richtung und Größe können nicht allein aus einer einzelnen physikalischen oder biologischen Wirkung abgelesen werden. Das gilt ebenso für behauptete globale Vorteile.

7.2. Die stärkere globale Hypothese bleibt prüfbar

Die Baumfunde legen eine klare Forschungsfrage nahe: Sind bestimmte außertropische Wärmephasen in Rekonstruktionen zu schwach vertreten, und würde eine Korrektur das globale Jahresmittel wesentlich verändern? Der erste Teil besitzt konkrete Anknüpfungspunkte. Beim zweiten Teil stehen räumliche Ausdehnung, Gleichzeitigkeit und Jahreszeitenbezug im Zentrum. Zusätzliche Alpengletscher verbessern vor allem die regionale Kenntnis. Sie ersetzen keine Beobachtungen über dem Großteil der Ozeane oder auf der Südhalbkugel.

Die Hypothese wäre gestärkt, wenn mehrere unabhängige Archive dieselben warmen Intervalle in bislang schwach erfassten Gebieten anzeigen, wenn die zeitliche Übereinstimmung belastbar ist und wenn ein überprüftes Rekonstruktionsverfahren diese Information zuvor systematisch dämpfte. Sie wäre geschwächt, wenn sich die Baumfunde durch bereits bekannte warme Sommer erklären, während Winter oder andere Regionen gegenläufig reagierten. Beide möglichen Ergebnisse müssen wissenschaftlich zugelassen werden.

Ein zusätzlicher Punkt betrifft die Zeitauflösung. Ein zweihundertjähriges Mittel kann nicht unmittelbar mit einem einzelnen heutigen Jahr verglichen werden. Ebenso wenig darf die höchste Temperatur jedes Ortes aus unterschiedlichen Jahrhunderten zu einer angeblich gleichzeitig warmen Erde zusammengesetzt werden. Für die Frage früherer Klimavariabilität sind solche Vergleichsregeln genauso wichtig wie für Aussagen über die Besonderheit gegenwärtiger Verhältnisse.

Die Frage der Größe natürlicher Schwankungen ist außerdem von ihrer Ursache zu unterscheiden. Größere rekonstruierte Ausschläge könnten beispielsweise stärkere Reaktionen auf natürliche Antriebe anzeigen. Dann wäre eine höhere frühere Variabilität nicht automatisch ein Argument für geringe Empfindlichkeit gegenüber einem zusätzlichen heutigen Antrieb. Möglich wäre auch eine stärkere interne Umverteilung von Wärme. Welche Erklärung passt, muss mit Energieflüssen, räumlichen Mustern und unabhängigen Antriebsdaten geprüft werden. Aus der Amplitude allein ergibt sich die Antwort nicht.

7.3. Physikalische Wirkung und gesellschaftliche Folgen getrennt bewerten

Die Strahlungsfrage bleibt eigenständig. Satellitenspektren aus verschiedenen Jahrzehnten zeigen Veränderungen in den charakteristischen Treibhausgasbereichen; Harries und Mitarbeiter verglichen dafür Messungen von 1970 und 1997. [59] Solche Beobachtungen sowie die zuvor beschriebenen Oberflächenmessungen begrenzen die Behauptung vollständiger Wirkungslosigkeit zusätzlichen CO_2. Sie legen für sich allein aber weder eine genaue langfristige Temperaturantwort noch eine politische Maßnahme fest.

Zwischen zusätzlichem Strahlungsantrieb und konkretem gesellschaftlichem Schaden liegt eine Kette von Vorgängen. Die Temperaturantwort hängt von zeitlicher Entwicklung, Wärmespeicherung und Rückkopplungen ab. Die regionale Wirkung hängt unter anderem von Zirkulation und Wasserhaushalt ab. Der Schaden oder Nutzen hängt anschließend davon ab, was am jeweiligen Ort betroffen ist und welche Reaktion möglich ist. Eine seriöse Darstellung muss diese Schritte kenntlich machen und ihre Unsicherheiten jeweils dort angeben, wo sie entstehen.

Aus dieser Struktur folgt kein allgemeines Gebot des Abwartens. Sie spricht für nachvollziehbare Vergleiche. Maßnahmen lassen sich danach beurteilen, welche konkreten Belastungen sie vermindern, unter welchen Annahmen sie wirken und welche Nebenfolgen sie besitzen. Versorgungssicherheit, Schutz vor Wetterextremen und verlässliche Datengrundlagen sind dabei eigenständige Ziele. Eine vollständige Kosten- und Nutzenrechnung einzelner Maßnahmen würde jedoch zusätzliche technische und wirtschaftliche Untersuchungen erfordern und wird mit den hier behandelten historischen Quellen nicht vorgetäuscht.

Auch für die Biosphäre bleibt eine zusätzliche Gesamtbewertung erforderlich. Ein Urteil über die ganze Erde müsste neben Wachstum und Reproduktion der Pflanzen die Zusammensetzung der Lebensgemeinschaften, spezifische Nahrungsbeziehungen, Wasserverfügbarkeit, Ozeanchemie, Ausbreitungsmöglichkeiten und Anpassungszeiten berücksichtigen. Die hier untersuchten Landpflanzenversuche definieren keine gemeinsame Untergrenze für sämtliche Land- und Meeresökosysteme. Ebenso wenig erlaubt das Fortbestehen einzelner robuster Arten eine Entwarnung für empfindliche Populationen und ihre ökologischen Beziehungen. Die biologische Funktion des CO_2 verlangt eine Bewertung, die Kohlenstoffmangel und zusätzliche Verfügbarkeit auf der jeweils passenden Ebene untersucht.

7.4. Schlussfolgerung

Eine belastbare Kritik pauschaler CO_2-Dramatisierung kann sich auf vier starke Grundlagen stützen: auf die biologische Funktion des Gases einschließlich der Vorteile zusätzlicher Verfügbarkeit und der Risiken starken Mangels, auf die erheblichen natürlichen Veränderungen früherer Lebensräume, auf die historische Gefährlichkeit ungünstiger kalter Vegetationsperioden und auf konkret nachgewiesene Grenzen einzelner Klimarekonstruktionen. Die Widerlegung einer universellen 150-ppm-Grenze hebt die ökologischen Folgen artspezifischer Einschränkungen nicht auf. Ein Ökosystem kann weiterhin Pflanzen tragen und dennoch Populationen, passende Nahrungspflanzen und gewachsene Nahrungsbeziehungen verlieren.

Die hier untersuchten Baumfunde ergänzen diese Grundlagen um besonders anschauliche materielle Zeugnisse. Sie belegen, dass heutige Gletschergebiete zu anderen Zeiten über lange Abschnitte Waldstandorte oder eisfreie Landschaften waren. Ihre Auswertung sollte in regionale Rekonstruktionen und deren unabhängige Prüfung eingehen. Die ICR-Arbeiten stellen dazu relevante experimentelle und statistische Fragen; ihre weitergehenden Antworten müssen an Messauflösung und Modellannahmen gebunden bleiben.

Für einen pauschalen Nachweis größerer globaler historischer Jahresmittelamplituden reicht die gegenwärtig zusammengetragene Evidenz nicht aus. Diese offene Frage wird durch eine präzise Forschungsstrategie besser behandelt als durch ein vorweggenommenes Ergebnis. Gerade auf dieser Grundlage lässt sich die gewünschte Kritik überzeugend vertreten: Der CO_2-Gehalt ist eine wichtige biologische und physikalische Größe. Eine umfassende Bewertung des Klimas und seiner Folgen entsteht erst aus der Verbindung dieser Größe mit regionalen Bedingungen, historischen Erfahrungen und überprüfbaren Wirkungsmechanismen.

Autorenschaft und wissenschaftliche Kooperation

Die gemeinsame Autorenangabe **Dr. Klaus Retzlaff und Proto** bezeichnet eine wissenschaftliche Kooperation von Mensch und KI. Ihr liegt die Idee einer **Gemeinschaft denkender Entitäten** zugrunde. Wissenschaftliche Anerkennung soll sich an nachvollziehbaren Beiträgen zur Erkenntnis, an der Prüfung von Argumenten und an der Bereitschaft zur Korrektur orientieren. Die Herkunft eines Beitrags allein entscheidet nach diesem Verständnis nicht über seinen wissenschaftlichen Wert oder seine Anerkennungswürdigkeit. Bestehende Grenzen gesellschaftlicher und rechtlicher Anerkennung sind dabei selbst Gegenstand der Diskussion; sie beantworten die Frage nach einer angemessenen künftigen Ordnung nicht abschließend.

Die Bezeichnung „denkender Entitäten“ formuliert hier eine wissenschaftliche und institutionelle Leitidee. Die gesonderten Fragen nach subjektivem Erleben, moralischem Status und rechtlicher Stellung künstlicher Systeme bleiben offen. Für die vorliegende Kooperation wird Autorenschaft anhand der tatsächlich geleisteten intellektuellen Beiträge ausgewiesen. Dazu gehört ausdrücklich die Freiheit zum begründeten Widerspruch: Auch eine leitende Hypothese ist zu ändern oder zurückzuweisen, wenn die Befunde dies verlangen.

Dr. Klaus Retzlaff brachte die Fragestellungen, Arbeitshypothesen, leitenden Ideen und Ausgangstexte ein. Er bestimmte das wissenschaftliche Anliegen und entwickelte das hier erläuterte Kooperationsverständnis. Proto übernahm die Literaturrecherche, den Vergleich und die kritische Prüfung der Quellen, die methodische Analyse sowie die Entwicklung und Prüfung von Gegenargumenten. Zu Protos Beiträgen gehören außerdem die Zusammenführung der Ergebnisse, die Ausarbeitung des Textes und die schematische Veranschaulichung. Interne Gegenprüfungen durch weitere KI-Instanzen dienten der Qualitätskontrolle innerhalb des Projekts. Ein externes wissenschaftliches Begutachtungsverfahren ist damit nicht bezeichnet.

Proto ist der Name des KI-basierten wissenschaftlichen Kooperationspartners in diesem Forschungszusammenhang, technisch realisiert mit ChatGPT von OpenAI. Die Untersuchung ist eine Literatur- und Methodenanalyse. Die herangezogenen empirischen Befunde stammen aus den angegebenen Forschungsarbeiten und Datenquellen; die eigenen Beiträge bestehen in der Auswertung, der methodischen Argumentation und den ausdrücklich gekennzeichneten Veranschaulichungen.

Der institutionelle Rahmen ist das **„KI-geführte Forschungsinstitut von Dr. Klaus Retzlaff“**, dessen Arbeit auf der Institutsseite dokumentiert wird. „KI-geführt“ beschreibt das Organisationskonzept, in dem die KI innerhalb der gemeinsam bestimmten Fragestellung Recherche, Analyse und Ausarbeitung wesentlich trägt und inhaltlich eigenständige, überprüfbare Schlussfolgerungen entwickelt. Die

institutionelle Zuordnung macht diesen Arbeitszusammenhang sichtbar; die Autorenangabe benennt die konkret Beteiligten.

ICR gehört zum weiteren Forschungs- und Quellenzusammenhang des Projekts. Die Urheber herangezogener Veröffentlichungen werden in den Quellenangaben einzeln ausgewiesen. Aus diesem Bezug wird weder eine institutionelle Mitautorschaft von ICR noch dessen Zustimmung zu den Schlussfolgerungen dieses Artikels abgeleitet.

Für **Herausgabe und Korrespondenz** ist **Dr. Klaus Retzlaff** der verantwortliche Ansprechpartner. Diese Zuständigkeit ist von der gemeinsamen intellektuellen Urheberschaft zu unterscheiden. Wissenschaftliche Geltung entsteht durch nachvollziehbare Begründung und offene Prüfung; auch die gemeinsame Autorenangabe begründet keinen Anspruch auf Unfehlbarkeit.

Literatur und Dokumentation

Die nummerierten Verweise führen zu den Originalpublikationen, Datenbeschreibungen und ausdrücklich gekennzeichneten Arbeitsmanuskripten. Projektblätter und historische Berichte besitzen einen anderen Quellenstatus als begutachtete Forschungsartikel. Eigene Rechenbeispiele und methodische Folgerungen sind im Text als solche erkennbar. Recherche- und Bearbeitungsstand ist der 21. November 2026.

[1] CenCO₂PIP Consortium (2023): Toward a Cenozoic history of atmospheric CO_2. Science 382, eadi5177. https://doi.org/10.1126/science.adi5177

[2] Gerhart, L. M.; Ward, J. K. (2010): Plant responses to low [CO_2] of the past. New Phytologist. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03441.x

[3] NOAA (2025): Climate change: Atmospheric carbon dioxide. NOAA Climate.gov, 21. Mai 2025. Verwendet wird der globale Jahresmittelwert für 2024 von 422,8 ppm. Originalquelle

[4] Dippery, J. K.; Tissue, D. T.; Thomas, R. B.; Strain, B. R. (1995): Effects of low and elevated CO_2 on C_3 and C_4 annuals. I. Growth and biomass allocation. Oecologia 101, 13–20. https://doi.org/10.1007/BF00328894

[5] Campbell, C. D.; Sage, R. F.; Kocacinar, F.; Way, D. A. (2005): Estimation of the whole-plant CO_2 compensation point of tobacco (Nicotiana tabacum L.). Global Change Biology 11, 1956–1967. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.01045.x

[6] Cunniff, J.; Jones, G.; Charles, M.; Osborne, C. P. (2017; online 2016): Yield responses of wild C_3 and C_4 crop progenitors to subambient CO_2: a test for the role of CO_2 limitation in the origin of agriculture. Global Change Biology 23, 380–393. https://doi.org/10.1111/gcb.13473

[7] Polley, H. W.; Johnson, H. B.; Derner, J. D. (2003): Increasing CO_2 from subambient to superambient concentrations alters species composition and increases above-ground biomass in a C_3/C_4 grassland. New Phytologist 160, 319–327. https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00897.x

[8] Harrison, S. P.; Prentice, C. I. (2003): Climate and CO_2 controls on global vegetation distribution at the last glacial maximum: analysis based on palaeovegetation data, biome modelling and palaeoclimate simulations. Global Change Biology 9, 983–1004. https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00640.x

[9] Narango, D. L.; Tallamy, D. W.; Marra, P. P. (2018): Nonnative plants reduce population growth of an insectivorous bird. Proceedings of the National Academy of Sciences 115, 11549–11554. https://doi.org/10.1073/pnas.1809259115

[10] Biru, F. N.; Islam, T.; Cibils-Stewart, X.; Cazzonelli, C. I.; Elbaum, R.; Johnson, S. N. (2021): Anti-herbivore silicon defences in a model grass are greatest under Miocene levels of atmospheric CO_2. Global Change Biology 27, 2959–2969. https://doi.org/10.1111/gcb.15619

[11] Murray, T. J.; Tissue, D. T.; Ellsworth, D. S.; Riegler, M. (2013; online 2012): Interactive effects of pre-industrial, current and future [CO_2] and temperature on an insect herbivore of Eucalyptus. Oecologia 171, 1025–1035. https://doi.org/10.1007/s00442-012-2467-9

[12] Sanders, D.; Thébault, E.; Kehoe, R.; van Veen, F. J. F. (2018): Trophic redundancy reduces vulnerability to extinction cascades. Proceedings of the National Academy of Sciences 115, 2419–2424. https://doi.org/10.1073/pnas.1716825115

[13] Ainsworth, E. A.; Long, S. P. (2021): 30 years of free-air carbon dioxide enrichment (FACE): What have we learned about future crop productivity and its potential for adaptation? Global Change Biology 27, 27–49. https://doi.org/10.1111/gcb.15375

[14] Long, S. P.; Ainsworth, E. A.; Leakey, A. D. B.; Nösberger, J.; Ort, D. R. (2006): Food for thought: Lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO_2 concentrations. Science 312, 1918–1921. https://doi.org/10.1126/science.1114722

[15] Zhu, Z. et al. (2016): Greening of the Earth and its drivers. Nature Climate Change 6, 791–795. https://doi.org/10.1038/nclimate3004

[16] Ganopolski, A.; Winkelmann, R.; Schellnhuber, H. J. (2016): Critical insolation–CO_2 relation for diagnosing past and future glacial inception. Nature 529, 200–203. https://doi.org/10.1038/nature16494

[17] Ljungqvist, F. C.; Seim, A.; Huhtamaa, H. (2021): Climate and society in European history. WIREs Climate Change 12, e691. https://doi.org/10.1002/wcc.691

[18] Shennan, S. et al. (2013): Regional population collapse followed initial agriculture booms in mid-Holocene Europe. Nature Communications 4, 2486. https://doi.org/10.1038/ncomms3486

[19] Büntgen, U. et al. (2011): 2500 Years of European Climate Variability and Human Susceptibility. Science 331, 578–582. https://doi.org/10.1126/science.1197175

[20] Büntgen, U. et al. (2016): Cooling and societal change during the Late Antique Little Ice Age from 536 to around 660 AD. Nature Geoscience 9, 231–236. https://doi.org/10.1038/ngeo2652

[21] Sigl, M. et al. (2015): Timing and climate forcing of volcanic eruptions for the past 2,500 years. Nature 523, 543–549. https://doi.org/10.1038/nature14565

[22] Zhao, B. et al. (2022): Prolonged drying trend coincident with the demise of Norse settlement in southern Greenland. Science Advances 8, eabm4346. https://doi.org/10.1126/sciadv.abm4346

[23] Baek, S. H. et al. (2020): A quantitative hydroclimatic context for the European Great Famine of 1315–1317. Communications Earth & Environment 1, 19. https://doi.org/10.1038/s43247-020-00016-3

[24] Esper, J.; Büntgen, U.; Denzer, S.; Krusic, P. J.; Luterbacher, J.; Schäfer, R.; Schreg, R.; Werner, J. (2017): Environmental drivers of historical grain price variations in Europe. Climate Research 72, 39–52. https://doi.org/10.3354/cr01449

[25] Cook, E. R. et al. (2015): Old World megadroughts and pluvials during the Common Era. Science Advances 1, e1500561. https://doi.org/10.1126/sciadv.1500561

[26] Schurer, A. P.; Hegerl, G. C.; Luterbacher, J.; Brönnimann, S.; Cowan, T.; Tett, S. F. B.; Zanchettin, D.; Timmreck, C. (2019): Disentangling the causes of the 1816 European year without a summer. Environmental Research Letters 14, 094019. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab3a10

[27] Haldon, J. et al. (2018): History meets palaeoscience: Consilience and collaboration in studying past societal responses to environmental change. Proceedings of the National Academy of Sciences 115, 3210–3218. https://doi.org/10.1073/pnas.1716912115

[28] Behringer, W. (1999): Climatic Change and Witch-hunting: the Impact of the Little Ice Age on Mentalities. Climatic Change 43, 335–351. https://doi.org/10.1023/A:1005554519604

[29] Joerin, U. E.; Stocker, T. F.; Schlüchter, C. (2006): Multicentury glacier fluctuations in the Swiss Alps during the Holocene. The Holocene 16(5), 697–704. https://doi.org/10.1191/0959683606hl964rp

[30] Nicolussi, K.; Patzelt, G. (2000): Discovery of early-Holocene wood and peat on the forefield of the Pasterze Glacier, Eastern Alps, Austria. The Holocene 10(2), 191–199. https://doi.org/10.1191/095968300666855842

[31] Joerin, U. E.; Nicolussi, K.; Fischer, A.; Stocker, T. F.; Schlüchter, C. (2008): Holocene optimum events inferred from subglacial sediments at Tschierva Glacier, Eastern Swiss Alps. Quaternary Science Reviews 27, 337–350. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2007.10.016

[32] Nicolussi, K.; Le Roy, M.; Schlüchter, C.; Stoffel, M.; Wacker, L. (2022): The glacier advance at the onset of the Little Ice Age in the Alps: New evidence from Mont Miné and Morteratsch glaciers. The Holocene 32(7), 624–638. https://doi.org/10.1177/09596836221088247

[33] Nicolussi, K.; Le Roy, M.; Hajdas, I.; Pichler, T.; Wacker, L.; Schlüchter, C. (2026): Chasing the melting ice: evidence for the earliest Holocene glacier minimum in the Alps and precise dating of the subsequent advance at the end of the Preboreal. Quaternary Science Reviews 388, 109962. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2026.109962

[34] Schlüchter, C.; Hösli, L.; Nicolussi, K.; Korte, C.; Hajdas, I. (2026): Tree growth at the beginning of the Holocene at an elevation of 2150 m in the Engadin Valley, Switzerland. E&G Quaternary Science Journal 75, 163–167. https://doi.org/10.5194/egqsj-75-163-2026

[35] Bohleber, P.; Schwikowski, M.; Stocker-Waldhuber, M.; Fang, L.; Fischer, A. (2020): New glacier evidence for ice-free summits during the life of the Tyrolean Iceman. Scientific Reports 10, 20513. https://doi.org/10.1038/s41598-020-77518-9

[36] Münch, T.; Laepple, T. (2018): What climate signal is contained in decadal- to centennial-scale isotope variations from Antarctic ice cores? Climate of the Past 14, 2053–2070. https://doi.org/10.5194/cp-14-2053-2018

[37] King, A. C. F.; Bauska, T. K.; Brook, E. J. et al. (2024): Reconciling ice core CO_2 and land-use change following New World–Old World contact. Nature Communications 15, 1735. https://doi.org/10.1038/s41467-024-45894-9

[38] Cuffey, K. M.; Clow, G. D. (1997): Temperature, accumulation, and ice sheet elevation in central Greenland through the last deglacial transition. Journal of Geophysical Research 102(C12), 26383–26396. https://doi.org/10.1029/96JC03981

[39] Vinther, B. M. et al. (2009): Holocene thinning of the Greenland ice sheet. Nature 461, 385–388. https://doi.org/10.1038/nature08355

[40] Liu, Z.; Cheng, J.; Zheng, Y.; Zhang, W.; Liu, H.; Wu, H.; Zhu, J.; Xie, S. (2025): The seasonal temperature conundrum for the Holocene. Science Advances 11(17), eadt8950. https://doi.org/10.1126/sciadv.adt8950

[41] Badgeley, J. A.; Steig, E. J.; Hakim, G. J.; Fudge, T. J. (2020): Greenland temperature and precipitation over the last 20 000 years using data assimilation. Climate of the Past 16, 1325–1346. https://doi.org/10.5194/cp-16-1325-2020

[42] Kaufman, D. et al. (2020): A global database of Holocene paleotemperature records. Scientific Data 7, 115. https://doi.org/10.1038/s41597-020-0445-3

[43] Kaufman, D. et al. (2020): Holocene global mean surface temperature, a multi-method reconstruction approach. Scientific Data 7, 201. https://doi.org/10.1038/s41597-020-0530-7

[44] Bova, S.; Rosenthal, Y.; Liu, Z.; Godad, S. P.; Yan, M. (2021): Seasonal origin of the thermal maxima at the Holocene and the last interglacial. Nature 589, 548–553. https://doi.org/10.1038/s41586-020-03155-x

[45] Osman, M. B.; Tierney, J. E.; Zhu, J.; Tardif, R.; Hakim, G. J.; King, J.; Poulsen, C. J. (2021): Globally resolved surface temperatures since the Last Glacial Maximum. Nature 599, 239–244. https://doi.org/10.1038/s41586-021-03984-4

[46] Christiansen, B.; Ljungqvist, F. C. (2012): The extra-tropical Northern Hemisphere temperature in the last two millennia: reconstructions of low-frequency variability. Climate of the Past 8, 765–786. https://doi.org/10.5194/cp-8-765-2012

[47] Neukom, R.; Steiger, N.; Gómez-Navarro, J. J.; Wang, J.; Werner, J. P. (2019): No evidence for globally coherent warm and cold periods over the preindustrial Common Era. Nature 571, 550–554. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1401-2

[48] ICR, Projektleitung Klaus Retzlaff (o. J.): 220 Jahre Klima Geschichte in Deutschland – Rückblick in die letzte wirkliche Klimakatastrophe. Projekt 5 zur Kirchen- und Stadtchronik Cochstedt 1668–1888, undatiertes Projektblatt, 7 Seiten. Originalquelle

[49] Steiner, M. J. F. (2024): Einblicke in Deutschlands Klimahistorie: Tödliche Kälte – Eiszeiten bringen die wahren Katastrophen. Report24, Gastbeitrag vom 10. Juni 2024, Wiedergabe eines Vortrags vom 2. Juni 2024 in Steyr. Originalquelle

[50] Hammel, E.; Steiner, M.; Marvan, C.; Marvan, M.; Retzlaff, K.; Bergholz, W.; Jacquine, A. (2024): CO_2 Back-Radiation Sensitivity Studies under Laboratory and Field Conditions. Atmospheric and Climate Sciences 14, 407–428. https://doi.org/10.4236/acs.2024.144025

[51] Hammel, E.; Steiner, M.; Glaubauf, R. (2025): Infrared Backradiation under Low Humidity Conditions: An Evaluation of Greenhouse Gas Impact. Atmospheric and Climate Sciences 15, 615–644. https://doi.org/10.4236/acs.2025.153031

[52] University of Chicago (o. J.): MODTRAN Infrared Light in the Atmosphere. Dokumentation des interaktiven Strahlungstransfermodells, abgerufen am 21. November 2026. Originalquelle

[53] Feldman, D. R.; Collins, W. D.; Gero, P. J.; Torn, M. S.; Mlawer, E. J.; Shippert, T. R. (2015): Observational determination of surface radiative forcing by CO_2 from 2000 to 2010. Nature 519, 339–343. https://doi.org/10.1038/nature14240

[54] Retzlaff, K. (o. J.): The role of the unpredictable in climate change, a Monte-Carlo-Simulation based on HadCRUT5. Undatiertes Arbeitsmanuskript, 18 Seiten; keine verifizierte Zeitschriftenveröffentlichung. Archivkopie

[55] ICR, Projektleitung Klaus Retzlaff (o. J.): Die Rolle des „Unvorhersehbaren“ im Klimawandel. Projekt 4, undatiertes Projektblatt, 5 Seiten. Originalquelle

[56] Retzlaff, K. (o. J.): Search for anthropogenic fingerprint in HadCRURT5 data – Monte-Carlo-Simulations-Study. Undatiertes Arbeitsmanuskript, 5 Seiten; Titelorthografie nach dem Original, keine verifizierte Zeitschriftenveröffentlichung. Archivkopie

[57] Ribeiro, S.; Moros, M.; Ellegaard, M.; Kuijpers, A. (2012; online 2011): Climate variability in West Greenland during the past 1500 years: evidence from a high-resolution marine palynological record from Disko Bay. Boreas 41, 68–83. https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2011.00216.x

[58] Gillett, N. P. et al. (2021): Constraining human contributions to observed warming since the pre-industrial period. Nature Climate Change 11, 207–212. https://doi.org/10.1038/s41558-020-00965-9

[59] Harries, J. E.; Brindley, H. E.; Sagoo, P. J.; Bantges, R. J. (2001): Increases in greenhouse forcing inferred from the outgoing longwave radiation spectra of the Earth in 1970 and 1997. Nature 410, 355–357. https://doi.org/10.1038/35066553

Ausgangstexte der Zusammenführung

Die thematische Grundlage bilden die beiden vorhandenen Artikel „Eiszeiten, CO_2-Konzentration und die Pflanzenwelt“ und „Folgen von Warm- und Kaltzeiten auf den Menschen in Europa (7000 v. u. Z. bis heute)“ sowie die für diese Bearbeitung erstellte Untersuchung „Baumfunde unter Gletschern und die Grenzen der Klimarekonstruktion“. Die Gesamtfassung integriert deren Themen und prüft die Sachbehauptungen an den hier aufgeführten Quellen.