Auszeichnungen für herausragende Gutachter 2025
Angekündigt hier →

UMWELTFORSCHUNG Buchstaben

PURPOSE-LED PUBLISHING™
20 Wir feiern das 20-jährige Jubiläum von Environmental Research Letters

BRIEF • OPEN ACCESS

Die globale menschliche Bevölkerung hat die nachhaltige Tragfähigkeit der Erde übertroffen

Corey J A Bradshaw*, Melinda A Judge, Daniel T Blumstein, Paul R Ehrlich, Aisha N Z Dasgupta, Mathis Wackernagel, Lewis J Z Weeda und Peter N Le Souëf

Veröffentlicht am 27. März 2026 • © 2026 Der/Die Autor(en). Veröffentlicht von IOP Publishing Ltd
Umweltforschungsbriefe,Band 21, Nummer 6
Zitat Corey J A Bradshaw *et al.* 2026 *Umgebung. Res. Lett.* **21** 064023
DOI 10.1088/1748-9326/ae51a

Artikel PDF | Artikel ePub

Autoren | Figuren | Referenzen | Offene Wissenschaft
Artikelinformationen

Abstrakt

Das ökologische Konzept der menschlichen Tragfähigkeit ist notwendigerweise kompliziert, weil Menschen die "ultimativen Ökosystem-Ingenieure" sind, die die Umwelt zu ihrem Vorteil moderieren. Mindestens in den letzten hundert Jahren haben menschlicher Einfallsreichtum, Zugang zu massiven Beständen an fossilen Brennstoffen und technologische Entwicklung die Erleichterung vorangetrieben, wobei der zunehmende menschliche Überfluss zu höheren Bevölkerungswachstumsraten geführt hat. Diese positive Beziehung brach jedoch in den 1950er Jahren zusammen, und 1962 trat die globale menschliche Bevölkerung in eine Phase ein, in der die Wachstumsrate mit zunehmender Bevölkerung stetig abnahm. Der Beginn dieser negativen Phase erfolgte 8 Jahre vor Beginn eines globalen Biokapazitätsdefizits im Jahr 1970. Der Beginn der negativen Phase variiert auch regional, wobei die Regionen mit dem niedrigsten Einkommen und der höchsten Fruchtbarkeit später in diese Phase eintreten als die Regionen mit dem höchsten Einkommen. Ein an die negative Phase angepasstes Ricker-Logistikmodell sagt voraus, dass die Weltbevölkerung zwischen 2067 und 2076 11,7–12,4 Milliarden Menschen erreichen könnte. Das gleiche Modell, das in die Moderationsphase integriert ist, sagt eine maximale Bevölkerung von 2,5 Milliarden Menschen voraus, die die Erde erhalten könnte. Die negative Phase korreliert auch stark mit dem Trend der globalen Temperaturanomalie, des ökologischen Fußabdrucks und der Gesamtemissionen, wobei eine größere Variation durch die zunehmende Bevölkerungsgröße und nicht durch den Anstieg des Pro-Kopf-Verbrauchs erklärt wird. Die Erde kann die zukünftige menschliche Bevölkerung oder sogar die heutige nicht ohne eine umfassende Überarbeitung der soziokulturellen Praktiken zur Nutzung von Land, Wasser, Energie, Biodiversität und anderen Ressourcen nicht erhalten.

Zitat und Zusammenfassung exportieren BibTeX RIS

← **Vorheriger** Artikel in Ausgabe | **Nächster** Artikel in der Ausgabe →

Originalinhalte aus diesem Werk können unter den Bedingungen der Creative Commons Attribution 4.0-Lizenz verwendet werden. Jede weitere Verbreitung dieses Werkes muss die Zuschreibung an den/die Autoren und den Titel des Werkes, das Zitat der Zeitschrift und das DOI beibehalten.

ECS WEBINAR Kobaltauflösung aus Pt×Co/C-Kathodenkatalysatoren in PEM-Brennstoffzellen: In-situ-Quantifizierungs- und Entfernungsmethoden
Klicken Sie, um sich zu registrieren

Artikelmetriken
20904 Downloads insgesamt
512

absenden
Bei dieser Zeitschrift einreichen

Diesen Artikel teilen

Abstrakt
Ergänzende Daten
1. Einführung
2. Methoden
3. Ergebnisse
4. Diskussion
Anerkennung
Datenverfügbarkeitserklärung
Referenzen

Vielleicht gefällt Ihnen auch
ZEITSCHRIFTENARTIKEL
Enthüllung des vernachlässigten Treibers von kalten und nassen Extremen im Februar 2024 über Zentralchina: Rolle des quasi-barotropen nordostasiatischen Antizyklons
Umkehrung der extremen Niederschlagstrends über dem Nordosten der USA als Reaktion auf aggressive Klimaminderung in GFDL SPEAR
Ein kürzlicher signifikanter Anstieg der tropischen Wirbelsturm-induzierten Niederschläge in der nordchinesischen Ebene
Bestimmung des Einflusses der Wasserverfügbarkeit auf das photosynthetische Leben in der Antarktis: eine systematische Überprüfung
Ein dekadenaler Wendepunkt in der CO2 Sensitivität der Kohlenstoffsenke
Erforschung globaler, wirtschaftsweiter materieller Trajektorien und damit verbundener Umweltdruck unter gemeinsamen sozioökonomischen Wegen

physics Welt jobs
Doktorarbeitsstelle (m/w/d)
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V. (PIK)
HM Specialist Inspector - Bewertung des Hauptgefahrenrisikos - (Band 3/SEO)
Manager für Gesundheit und Sicherheit
Kerndoktorat Focal Award
Die Universität von Liverpool
Mehr Jobs
Einen Job inserieren

Beschneiden HERAUSRAGENDER PRÜFER
Hervorragend Kritiker Auszeichnungen 2025
Hier angekündigt

ECS Die Elektrochemische Gesellschaft
WEBINAR
Kobaltauflösung aus Pt×Co/C Kathodenkatalysatoren in PEM-Brennstoffzellen: In-situ-Quantifizierungs- und Entfernungsmethoden
LIVE um 15 Uhr BST/ 10 Uhr EDT 15. April 2026
Klicken Sie, um sich zu registrieren

Ergänzende Daten

1. Einführung

Menschen haben zweifellos die am besten untersuchte Demografie aller Arten, aber für den größten Teil der menschlichen Existenz gab es keine genauen Volkszählungen der Bevölkerungsgröße oder Schätzungen der Altersstruktur, der Geburten- oder Sterblichkeitsraten. Seit den 1950er Jahren, als die weltweiten Volkszählungen ernsthaft [1] begannen, haben wir jedoch eine tiefe Einschätzung dafür, wie sich die Bevölkerungsstruktur als Reaktion auf die sich verändernde Wirtschaft [2], die soziale Dynamik [3], Bildung [4], Kultur [5, 6], Gesundheitsinterventionen [7, 8], Familienplanung [2, 9], Heiratsmuster [10], Migration [2, 11], Kriegsführung [12] und Krankheit [13] verändert hat. Doch trotz der Fülle an Daten und Analysen zur menschlichen Demografie haben wir immer noch ein schlechtes Verständnis dafür, wie die globale menschliche Bevölkerung auf ihre eigenen Prozesse der Selbsterleichterung und Begrenzung innerhalb der Einschränkungen von Umweltrückmeldungen reagieren könnte [2], insbesondere wenn man bedenkt, dass wir Daten für nur einen winzigen Bruchteil der Geschichte des *Homo sapiens haben*. Darüber hinaus ist der Zusammenhang zwischen Demografie und Umwelt im Allgemeinen im Bereich der menschlichen Demografie unterentwickelt [14–16], obwohl Umweltvariationen einer der Hauptmechanismen sind, die die Muster des menschlichen demografischen Wandels bestimmen [14].

Die Tragfähigkeit ist ein ökologisches Konzept, das die langfristige durchschnittliche maximale Anzahl von Individuen einer bestimmten Art beschreibt (typischerweise gemessen als Dichte in Individuen pro Flächeneinheit und bezeichnet *K*), die eine Umwelt angesichts der verfügbaren regenerativen Ressourcen unbegrenzt aufrechterhalten kann [17–19]. In mathematischer Hinsicht kann *K* als die langfristige mittlere Populationsgröße (*N*) berechnet werden, bei der sich die *Pro-Kopf*-Rate der exponentiellen Bevölkerungsänderung (*r*) Null nähert [17, 18] (ergänzender Materialanhang I, Abbildung S1). Diese phänomenologische Beziehung ist der *Gesamtausdruck* von *Komponenten*-Feedback [20] - der Prozess, durch den Interaktionen zwischen Individuen und Gruppen die demografischen Raten von Komponenten beeinflussen (z. B. Überleben, Fruchtbarkeit und Zerstreuung). Die Variation der Komponenten wiederum "Feedback" direkt oder indirekt, um die Bevölkerungsgröße und die demografischen Raten selbst zu verändern [21]. Es gibt zwei Haupttypen von phänomenologischen Beziehungen zwischen *r* und *N* - *negativ*, bei dem die Rate des Bevölkerungswachstums mit zunehmender Bevölkerungsgröße abnimmt, und *Erleichterung*, ein Sonderfall, in dem die Rate des Bevölkerungswachstums mit zunehmender Bevölkerung steigt [21].

Auf menschliche Populationen angewendet, ist das Konzept der Tragfähigkeit notwendigerweise kompliziert, weil die Menschen die "ultimativen Ökosystem-Ingenieure" sind, die die Umwelt absichtlich und erfolgreich zu ihrem Vorteil moderieren [22, 23]. Im Gegensatz zu nichtmenschlichen Arten, die durch die regenerative Ressourcenbasis begrenzt sind, von der sie direkt abhängen, hat der moderne Mensch im Wesentlichen die einschränkende Rückkopplung aus der Ressourcenerschöpfung durch die Ausbeutung fossiler Brennstoffe ausgerottet. Weitere Gründe, warum das Konzept der ökologischen Tragfähigkeit, das auf menschliche Populationen angewendet wird, umständlich ist, sind die enormen Unterschiede in der Menge der verbrauchten Ressourcen und der Umweltschäden, die durch Einzelpersonen verursacht werden [24], der Zugang zu nicht erneuerbaren Ressourcenbeständen, die regenerative Ressourcen ergänzen können, und die Schwierigkeit, festzustellen, welche technologischen Innovationen und Lebensstandards als "akzeptabel" gelten [22] bei einer bestimmten Bevölkerungsgröße und Fruchtbarkeitsrate. Der letztere Grund ist möglicherweise das hartnäckigste Element bei der Anwendung der Tragfähigkeit auf den Menschen, denn *K* hat unterschiedliche Interpretationen, je nach dem Wirtschaftssystem und den Technologien, ob die Gesellschaften bemühen, Ungleichheit zu verringern, über welchen Zeitraum man beschließt, die Kriterien anzuwenden, wie viel Umweltschäden wir bereit sind zu ertragen oder zu akzeptieren [23, 25], und an welchem Punkt der Umweltschaden so groß und die menschliche Belastung so hoch ist, dass diese physischen Bedingungen beginnen, die Größe der menschlichen Bevölkerung direkt zu begrenzen. Darüber hinaus argumentierte Rees [26], dass technologische Innovation oft nicht *K per se* erhöht, sondern nur die Effizienz der Ressourcennutzung, was die Illusion einer Zunahme erzeugen kann, während die Menschen vor der Wahrnehmung der dauerhaften Schäden an der Ressourcenbasis geschützt werden.

Eine weitere Komplikation ist, dass trotz der gut dokumentierten, planetarischen ökologischen und Aussterbenskrise, die durch die Ausbeutung fossiler Brennstoffe ermöglicht wurde, und der Beobachtung, dass menschliche Gesellschaften vor langer Zeit die "Biokapazität" der Erde überschritten haben (d. h. die Produktivität ökologischer Ressourcen, einschließlich Ackerland, Weideland, Waldland, Fischergründe und bebautes Land) [29], Bruttomaße des menschlichen Wohlbefindens im Allgemeinen auf historischen Höchstständen liegen; zum Beispiel nimmt die absolute Armut ab [30] (obwohl die länderspezifische Armut zunimmt) [30], wie die Kindersterblichkeit [31], während die Langlebigkeit größtenteils zunimmt [32]; die Langlebigkeit jedoch durch die Auswirkungen von COVID-19 reduziert wurde, Unterernährung ist zwischen 2017 und 2021 um ~30% gestiegen [33], und Fettleibigkeit nimmt zu [32]. Dieses scheinbare Paradoxon hat die Stabilität des Lebenserhaltungssystems der Menschheit und eine massive Zunahme der Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen gekostet, was wiederum das lebenserhaltende System bedroht, das diese Bevölkerung durch den daraus resultierenden Klimawandel erhält, und gleichzeitig Gesellschaften für endliche, regenerative biologische Ressourcen blind macht, solange es Alternativen auf Basis fossiler Brennstoffe gibt. Der Druck auf die Biosphäre ist auch auf eine anhaltende Übernutzung zurückzuführen, einschließlich der vergangenen Kohlenstoffemissionen. Das bedeutet, dass die Stressfaktoren das Ergebnis kumulativer, historischer Übernutzung sind, nicht nur aktueller Aktivitäten. Zusammen begrenzen diese Stressfaktoren die kontinuierliche Verbesserung und werden stattdessen wahrscheinlich oder haben bereits begonnen, den Lebensstandard zu senken [27, 34].

Infolgedessen gab es viele wissenschaftliche Diskussionen über die menschliche Tragfähigkeit [19, 22–25, 35–37], ohne einen klaren Konsens über ihren Wert [23] oder sogar ihre Relevanz für die moderne menschliche Gesellschaft. Die meisten scheinen sich jedoch einig zu sein, dass für den Menschen die "optimum" Tragfähigkeit erheblich niedriger ist als die "maximale" (oder "biophysikalische") Tragfähigkeit [24, 25, 37]. Der Qualifikator "Optimum" scheint sich auf ein Feedback zu beziehen, das mit einer Verbesserung des Wohlbefindens durch sozioökonomische Entwicklung und ökologische Integrität verbunden ist [22], wie z. B. die maximale Anzahl von Menschen, die mit einem Mindestlebensstandard [36, 37] erhalten werden können, anstatt auf eine maximale Dichte, die stattdessen von Hungersnot, Krankheit und Krieg diktiert wird [35].

Um dem Mangel an evidenzbasierten Schätzungen der menschlichen Tragfähigkeit und der Rolle der Bevölkerung selbst bei der Beeinflussung des zukünftigen menschlichen Wachstums zu beheben, berechnen wir anhand gut etablierter demografischer Analysen aus der Ökologie sowohl eine realistische "Erleichterung" (~2,5 Milliarden) als auch eine maximale (11,66–12,40 Milliarden) globale Bevölkerungsgröße aus den verfügbaren Daten, die die Trends in der menschlichen Häufigkeitsschätzungen im letzten Jahrhundert beschreiben. Unsere Vorhersagen sind die ersten, die allein auf menschlichen Bevölkerungszeitreihen basieren, da keine frühere Studie die Beweise für die Beziehungen zwischen *r* und *N* auf globaler oder regionaler Ebene untersucht hat. Eine solche Untersuchung ist nicht nur wichtig, um empirische Schätzungen der Tragfähigkeit zu berechnen, die nicht auf ungerechtfertigten oder unsicheren Annahmen beruhen, die den bestehenden Schätzungen der Tragfähigkeit zugrunde liegen [23], sondern auch um festzustellen, ob sich die Bevölkerungswachstumsraten als Reaktion auf schwindende Pro-Kopf-Ressourcen und potenzielle negative Rückkopplungen aus dem Überkonsum verschoben haben.

Anhand von Bevölkerungsdaten von den Vereinten Nationen und anderen Quellen aus dem Jahr 1800 zeigen wir empirisch, dass sich die menschlichen Gesellschaften von einer langen Periode der Erleichterung (d.h. mehr Menschen = höhere momentane exponentielle Rate des jährlichen Anstiegs) Ende der 1940er Jahre zu einer Phase verlagert haben, in der weitere Zunahme der Bevölkerungsgröße mit einer konstant abnehmenden Wachstumsrate ab den 1960er Jahren verbunden war (negative Phase). Darüber hinaus zeigen wir zum ersten Mal, dass die globale Temperaturanomalie, der ökologische Fußabdruck und die Gesamtemissionen (Indizes der globalen Umweltverschlechterung) mit zunehmender Bevölkerungsgröße in der letzten negativen Phase monoton zugenommen haben und dass die Bevölkerungsgröße ein stärkerer Prädiktor für die Variation der Indizes des globalen Wandels ist als die steigende Pro-Kopf-Verbrauchsrate.

2. Methoden

2.1. Bevölkerungstrend und Veränderungsrate

Wir haben die verfügbaren Schätzungen der menschlichen Populationsgröße bis 1000 n. Chr. zusammengestellt, da der Zeitraum seitdem Schätzungen enthält, die durch mehrere unabhängige Analysen bestätigt wurden [1, 38–46]. Aus diesen Daten haben wir die momentane (jährliche) exponentielle Veränderungsrate (r = loge(Nt_{+1}/Nt) und die Bevölkerungsgröße (*N*) im Jahr *t* von 1800 bis 2023 berechnet (da die globale Bevölkerungsgröße während dieses Zeitraums in jährlichen Schritten verfügbar ist) [44].

Wir berechneten die lineare Beziehung zwischen der jährlichen exponentiellen Veränderungsrate (*r*) und der globalen Bevölkerungsgröße (*N*) basierend auf den phänomenologischen 'Ricker' (linear) [47] und 'Gompertz' (log-linear) [48] logistischen Modellen [20] in *R* (Funktion: *lm*). Wir haben die relativen Anpassungen der Ricker- und Gompertz-Logistikmodelle anhand der Informationskriteriengewichte von Akaike (*wAICc*) gegenübergest. Diese Berechnungen von *r* werden jedoch nicht von einer von den Vereinten Nationen bereitgestellten gemessenen Unsicherheit begleitet. Der Vergleich historischer Revisionen mit Prognosen zwischen 1970 und 2020 zeigt nur eine bescheidene (1%-2%) Diskrepanz, eine Unsicherheit, die gut mit der ~1%-Abweichung übereinstimmt, die zwischen Schätzungen aus verschiedenen Quellen beobachtet wurde [49]. Es gibt auch Hinweise darauf, dass die Unsicherheit in Bezug auf Bevölkerungsgrößenschätzungen auch für verschiedene Regionen variiert, aber dass die Unsicherheit im Allgemeinen im Laufe der Zeit abnimmt [50]. Um zu testen, ob die Trends, die wir zwischen *r* und *Nt* in den drei Phasen beobachtet haben (siehe Ergebnisse), angesichts der Unsicherheit robust sind, haben wir einen Restastansatz entwickelt, bei dem wir Unsicherheiten um *das* jährliche *Nt* von 5 % für die Erleichterungsphase (1800-1949), 2 % für die Übergangsphase (1950-1961) und 1 % für die negative Phase (1962–2023) angenommen haben. Für jede von 10 000 Iterationen haben wir für jede *Nt* in der Reihe eine zufällige Abweichung gleichmäßig innerhalb dieser Fehlerbereiche abgetastet, das entsprechende *r* neu berechnet und dann die Steigung der linearen Beziehung zwischen *r* und *Nt* für jede Phase berechnet.

2.2. Tragfähigkeit

Ein phänomenologisches Ricker-Logistikmodell [20] sagt voraus, dass bei *r* = 0 (Stabilität oder Nullpopulationswachstum) einer Population der Quotient des negativen Schnittpunkts und der Steigung der linearen Anpassung von *r*~ *Nt* eine erwartete "maximale" Populationsgröße (die wir "Ricker-Tradfähigkeit", KR" bezeichnen, schätzt. Dies unterscheidet sich von einer ("biophysikalischen") [37] Tragfähigkeit der Umwelt [24], die eine Populationsgröße wäre, die aufrechterhalten werden könnte und nicht nur auf der Bestandsverknappung arbeiten würde, wie es derzeit der Fall ist. Diese Bevölkerungszahl KR wird an dem Punkt erreicht, an dem die Gesamtgeburten durch die Gesamtzahl der Todesfälle perfekt ausgeglichen werden. Als zusätzliche Realitätsprüfung der Beziehungen haben wir das Ricker-Logistikmodell auf den Schnittpunkt (wobei *Nt* = 0) ausgedehnt, um die theoretische maximale Steigerungsrate zu berechnen [51]. Ebenso haben wir bei der Verlängerung der Erleichterungsbeziehung auf *Nt* = 0 die erwartete *rm* für "unentwickelte" Gesellschaften in Ermangelung von Moderation berechnet [52].

Eine "nachhaltige" Tragfähigkeit" ist erheblich niedriger als eine "maximale" Populationsgröße, die bei *r*= 0 unter Verwendung des Ricker-Modells (KR) vorhergesagt wird [24, 25, 37]. Dies liegt daran, dass KR durch die Bestandsverknappung ermöglicht wird, was es den Menschen ermöglicht, vorübergehend die Einschränkungen zu überwinden, die durch die Regenerationsraten der biologischen Ressourcenversorgung auferlegt werden. Die "nachhaltige" Tragfähigkeit hängt auch vom durchschnittlichen Lebensstandard pro Person ab. Je höher der Verbrauch pro Person, desto geringer die "nachhaltige" Tragfähigkeit. Eine Welt mit einer menschlichen Bevölkerung mit einer "nachhaltigen" Tragfähigkeit ist besser als eine in KR, weil die frühere Bevölkerungsgröße eher für stabilere Volkswirtschaften sorgt, geringere negative Umweltauswirkungen hat, länger aushält, weniger Risiken hat und mehr Kulturen und Werte bewahrt [25, 53]. Angesichts der Beweise für einen abrupten Wechsel von der Erleichterung zu einer negativen *r*~ *N*-Phase (siehe Ergebnisse) haben wir diese geringere Tragfähigkeit als die Populationsgröße berechnet, bei der die Erleichterung ein maximales *r* hervorbrachte (von nun an als Kf bezeichnet). Hier haben wir die globale Bevölkerungsgröße berechnet, wenn *r* während der Erleichterung von 1800-1949 als Kf.

2.3. Regionale Unterschiede

Die Behandlung der globalen Bevölkerung als eine einzige Einheit maskiert möglicherweise regionale Unterschiede im Beginn und in der Stärke der negativen Beziehung zwischen *r* und *N*. Als eine Form der Sensitivitätsanalyse, um zu bestätigen, dass der globale Trend nicht von bestimmten Regionen und/oder Ländern getrieben wurde, haben wir den Globus daher in sieben von den Vereinten Nationen definierte Hauptregionen unterteilt (Afrika südlich der Sahara, Nordafrika und Westasien, Europa und Nordamerika, Lateinamerika und Karibik, Zentral- und Südasien, Ost- und Südostasien und Ozeanien [+ Ozeanien ohne Australien und Neuseeland]) und berechneten die *r*~ *N*-Beziehung für jede. Wir erweiterten auch die Anpassungen auf *r*= 0 für die negative Phase jeder Region, um eine Schätzung von KR für jede zu liefern, und untersuchten die regionalen Unterschiede in der Steigung von *r*~ *N* in Bezug auf mehrere demografische und wirtschaftliche Indikatoren (ergänzende Materialanhang IV).

2.4. Korrespondenz mit Prognosen

Wir haben die globale Vorhersage von KR aus dem Ricker-Logistikmodell, das auf die negative Phase (Abbildung 2(b)) angewendet wird, gegen die plausibelsten [31] Prognosen der menschlichen Bevölkerungsgröße bis zum Ende dieses Jahrhunderts (Szenarien der Bevölkerungsabteilung der Vereinten Nationen *Medium, Hoch* und *probabilistische* Szenarien) [1] und des Internationalen Instituts für angewandte Systemanalyse und des Gemeinsamen Forschungszentrums der Europäischen Kommission [IIASA-JRC] *für Steste* und *Referenzszenarien* [54, 55]. Dieser Ansatz identifiziert, welche Prognosen die beste Übereinstimmung mit der Größe und dem Zeitpunkt unseres berechneten KR aus dem Ricker-logistischen Modell haben.

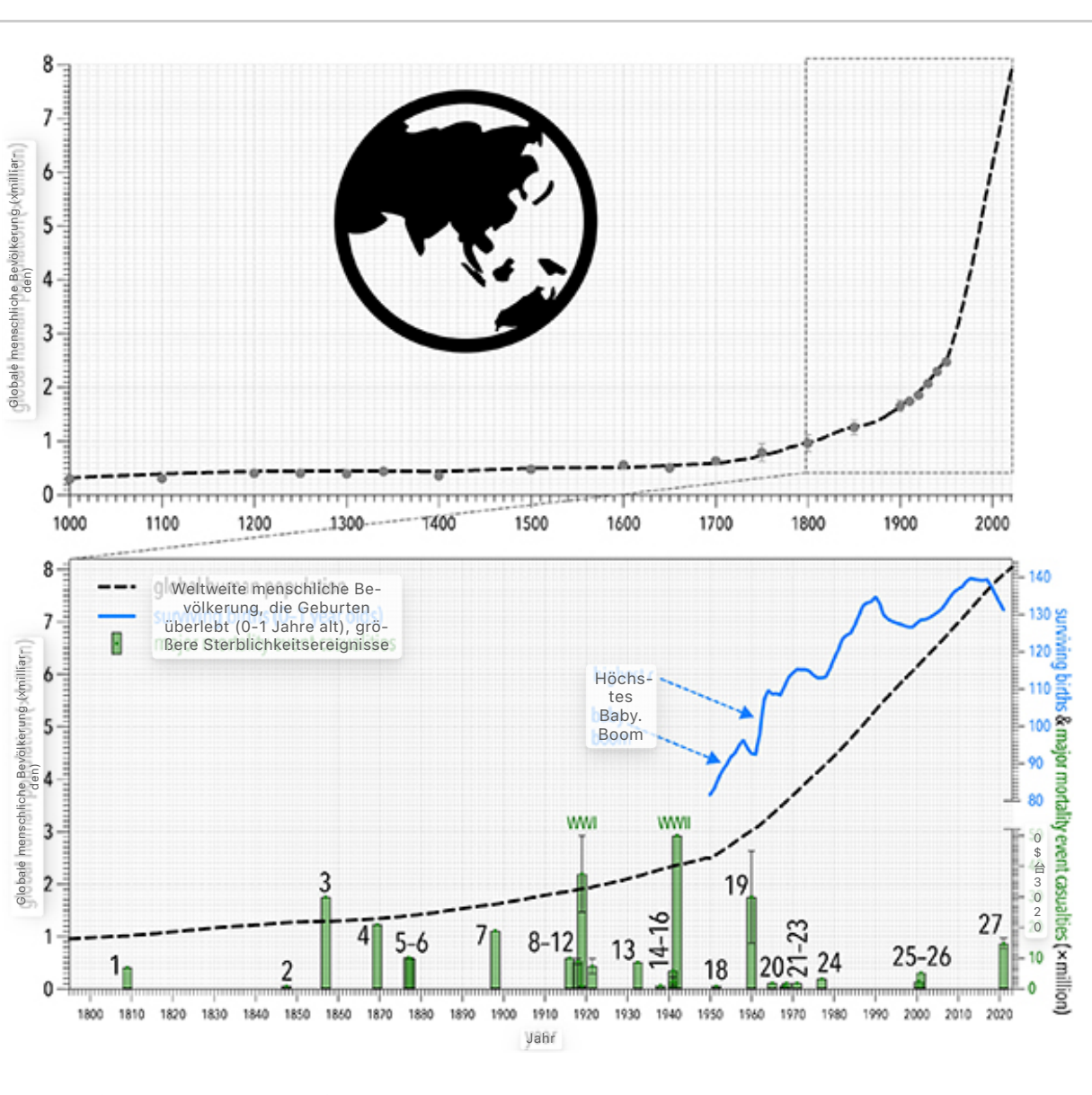
2.5. Indizes des globalen Wandels

Wir verglichen die globale menschliche Bevölkerungsgröße in den drei Hauptphasen der Erleichterung, des Übergangs und der negativen *r*~ *N*-Phase (siehe Ergebnisse) mit der globalen Temperaturanomalie, die aus der HadCRUT.5.0.2.0-Set-Vorhersageanomalie [56] im Vergleich zum Basiswert von 1960-1991 (Daten verfügbar von 1850 bis heute) erhalten wurde. Wir vermuten, dass der stärkste positive Zusammenhang zwischen menschlicher Bevölkerungsgröße und Klimawandel während der negativen Phase aufgrund von Konsumextern wie der zunehmenden Ausbeutung natürlicher Ressourcen und Verlust der biologischen Vielfalt aufgetreten ist. Dies kann auf Gesellschaften in der Zeit des Rückgangs und der Ressourcen zurückzuführen sein, die anschließend zu einer Umweltzerstörung führen. Im Gegensatz dazu könnten Gesellschaften in der Erleichterungsphase über ausreichende Ressourcen verfügen, um die steigenden Bevölkerungswachstumsraten voranzutreiben. Wir haben auch zwei zusätzliche Indizes des globalen Wandels in den Analysen verwendet, um die Ergebnisse anhand der globalen Temperaturanomalie zu bestätigen: der globale ökologische Fußabdruck, gemessen als die Anzahl der Erden, die zur Erreichung der Verbrauchsraten erforderlich sind [29], und die jährlichen jährlichen CO2-e-Emissionen (ourworldindata.org). Die vollständige Methodik finden Sie im ergänzenden Material Anhang III. Alle Codes und Daten, die allen Analysen zugrunde liegen, sind unter https://doi.org/10.5281/zenodo.10951676 verfügbar.

3. Ergebnisse

3.1. Bevölkerungstrend und Veränderungsrate

Die Flugbahn der globalen menschlichen Bevölkerung stieg langsam (Mittelwert *r* = 0,0009) von geschätzten 323 Millionen im Jahr 1000 n. Chr. auf 592 Millionen im Jahr 1700 (Abbildung 1(a)). Seit Beginn der industriellen Revolution in der Mitte des 18. Jahrhunderts stieg die berechnete Zuwachsrate erheblich (Mittelwert *r* = 0,005 oder das Fünffache der zwischen 1000 und 1700 n. Chr. beobachteten Rate), um bis 1800 eine weltweite Bevölkerung von 985 Millionen zu produzieren (Abbildung 1(a)). Das Bevölkerungswachstum war danach trotz mindestens 27 großen Sterblichkeitsereignissen (jeweils mit ⩾1 Million geschätzten Opfern, die als Übertodesfälle gezählt wurden) durchweg positiv, von denen vier jeweils ⩾30 Millionen Opfer hatten - d.h. Taipeng-Rebellion (Platt 2012), „spanische" Influenza-Pandemie [57], Zweiter Weltkrieg [58] und die chinesische Hungersnot [59] (Abbildung 1(b)). Nach dem Zweiten Weltkrieg, als die weltweiten Volkszählungen ernsthaft [1] begannen, berechneten wir, dass die globale menschliche Bevölkerung mit ihrer schnellsten Geschwindigkeit aller Zeiten zunahm [2] und zwischen 1950 und 1970 eine durchschnittliche Zunahme von *r* = 0,02 erreichte. Dieser Anstieg ist als der Babyboom der 1950er und 1960er Jahre nach dem Zweiten Weltkrieg bekannt (Abbildung 1(b)).



Vergrößern | Herauszoomen | Bildgröße zurücksetzen

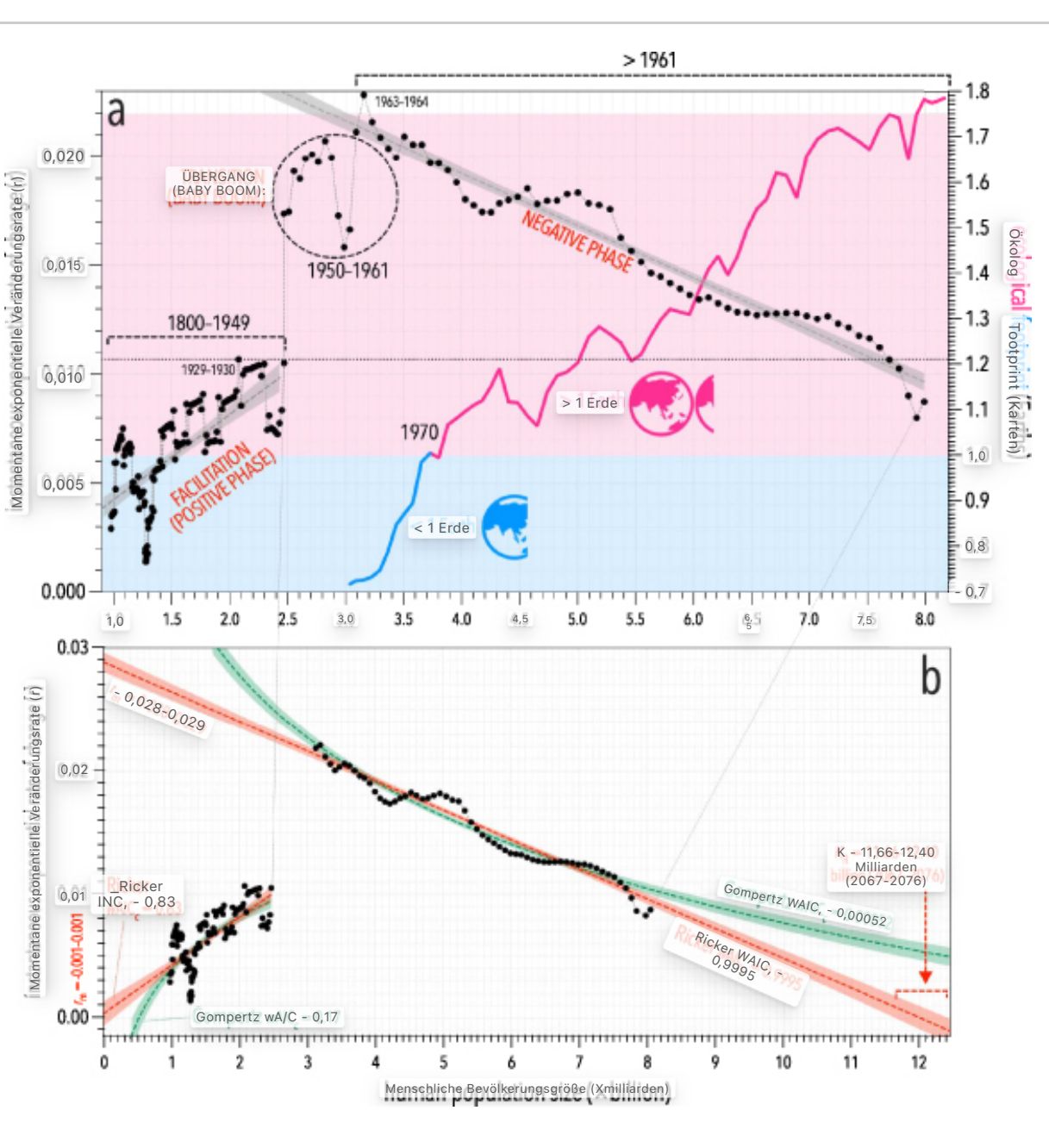
Abbildung 1. Globale menschliche Bevölkerungsgröße von 1000 bis heute (Hauptzahl) und von 1800 bis heute [1, 40, 42, 44] (schwarze Linie; Einsatz). Dunkelgraue Kreise mit Konfidenzgrenzen, die aus den oberen und unteren Schätzungen mehrerer Quellen abgeleitet sind [38, 39, 41, 43, 45, 46]. Inset zeigt ungefähre Größe (grüne Balken; Opfer) der wichtigsten Ereignisse der menschlichen Sterblichkeit (mit ⩾ 1 Million Todesfällen) seit 1800 (rechte *y*-Achse; grün; siehe Referenzen unten für Quellen). *Aufgeführte Sterblichkeitsereignisse*: 1. Napoleonische Kriege (7 Millionen) [60], 2. Irische Hungersnot (1 Million) [61]; 3. Taiping-Rebellion (30 Millionen) [62], 4. Dungan-Aufstand (21 Millionen) [63], 5. Hungersnot in Britisch-Indien (10,3 Millionen) [64], 6. Nordchinesische Hungersnot (10 Millionen) [65], 7. Indianer Hungersnot (19 Millionen) [66], 8. Erster Weltkrieg (10,1 Millionen) [58], 9. Iranische Hungersnot (8–10 Millionen) [67], 10. Influenza-Pandemie (25–50 Millionen) [57], 11. Russischer Bürgerkrieg (1 Million) [58], 12. Russische Hungersnot (5–10 Millionen) [68], 13. Sowjetische Hungersnot (8,7 Millionen) [69], 14. Chinesischer Bürgerkrieg (1,2 Millionen) [58], 15. 2. Chinesisch-Japanischer Krieg (1–4 Millionen) [58, 70] und 16. Hungersnot (6 Millionen) [70], 17. Zweiter Weltkrieg (50 Millionen) [58], 18. Koreakrieg (1 Million) [58], 19. Chinesische Hungersnot (15–45 Millionen) [59], 20. Vietnamkrieg (2 Millionen) [58], 21. Nigerianischer Bürgerkrieg (1 Million) [71] und 22. Hungersnot (2 Millionen) [72], 23. Chinesische Kulturrevolution (2 Millionen) [58], 24. Kambodschanischer Völkermord (3,4 Millionen) [73], 25. 2. Kongo-Bürgerkrieg (2,5 Millionen) [74] und 26. Hungersnot (5,4 Millionen) [75], 27. COVID-19 (13,23–16,58 Millionen) [76].

Download-Zatzeil:
Standardbild | Hochauflösendes Bild

Die lineare Beziehung zwischen der jährlichen exponentiellen Veränderungsrate (*r*) und der globalen Bevölkerungsgröße (*N*) zeigt eine auffällige Verschiebung in den 1950er Jahren von der Erleichterung (positiv) zu einer negativen Phase (Abbildung 2). Von 1800 bis 1949 gab es ein klares Signal für eine Erleichterung - die Bevölkerungswachstumsrate nahm mit zunehmender globaler Bevölkerungsgröße zu [21]. Hier betrug das 95-prozentige Konfidenzintervall der Ricker-Steigung (*β*) 0,0033–0,0046 (*R2* = 0,488). Es gab eine dominante Unterstützung für den Ricker (*wAICc* = 0,828) im Vergleich zum Gompertz-Modell (*wAICc* = 0,172; Evidenzverhältnis = $wAICc_{[Ricker]}/wAICc_{[Gompertz]}$ = 4,83). Es gab ein schwaches Autokorrelationssignal in der *r*-Zeitreihe für die Erleichterungsphase (die partielle Autokorrelationsfunktion zeigte Hinweise auf einen Verzögerungseffekt = 1 Jahr; ergänzendes Material Anhang II Abbildung S2), wobei eine Newey-West-Korrektur für die Autokorrelation eine Steigung von *β* = 0,0024–0,0055 ergab. Dies bedeutet, dass die Pro-Kopf-Fitness (Überleben, Fortpflanzung) mit zunehmender Bevölkerung zunahm (d.h. Erleichterung), was eine Selbstverstärkung durch technologische und sozioökonomische Verbesserungen der Lebensbedingungen impliziert [22].

Der Babyboom nach dem Zweiten Weltkrieg in den 1950er Jahren löste einen starken Anstieg der Wachstumsrate aus, destabilisierte aber die Beziehung zwischen *r* und *Nt* (das negative *r*, das für 1949-1950 berechnet wurde, ist ein Artefakt der globalen Volkszählungsdaten, die ab 1950 standardisiert wurden - die menschliche Bevölkerung nahm in diesem Zeitraum nicht ab und erholte sich dann in einem Jahr; wir haben diesen Wert aus den Schätzungen des Ricker-Modells entfernt). Wir fanden keine Beziehung zwischen *r* und *Nt* nach dem linearen Modell (*β* = -0,0102–0,0047), mit einer Newey-West-Korrektur für die Autokorrelation, die *β* = -0,0109–0,0054 angibt. 1961 wurde die globale menschliche Bevölkerung jedoch in eine negative Phase geschlossen (das höchste aufgezeichnete *r* war von 1962-1963; Abbildung 2(a)), wobei weitere Bevölkerungszuwächse mit einer abnehmenden Bevölkerungswachstumsrate einhergingen (*β* = -0,0025 bis -0,0023; *R2* = 0,952; Abbildung 2(a)). Es gab fast keine Unterstützung für das Gompertz-Modell (*wAICc* = 0,00052; Evidenzverhältnis von Ricker im Vergleich zu Gompertz = 1971,6). Es gab ein bescheidenes Autokorrelationssignal in der *r*-Zeitreihe für die negative Phase (die partielle Autokorrelationsfunktion zeigte Hinweise auf einen Verzögerungseffekt von 1 und 2 Jahren; ergänzendes Material), wobei eine Newey-West-Korrektur für die Autokorrelation eine Steigung von *β* = -0,0025--0,0022 zurückgab (d.h. fast identisch mit dem nicht-Autokorrelation-korrigierten Konfidenzintervall). Ebenso waren die 95 %-Konfidenzintervalle der 10 000 Steigungen, die aus dem Resampling-Ansatz abgeleitet wurden, unter der Annahme einer abnehmenden Unsicherheit in den Populationsschätzungen: 0,0083–0,0140 für die Erleichterungsphase (d.h. positive Steigung), -0,0173–0,0394 für die Übergangsphase (keine Beziehung, da der Bereich die Steigung = 0 umfasst) und -0,0026--0,0020 für die negative Phase (d. h. negative Steigung). Die allgemeinen Trends sind daher robust, selbst mit beträchtlicher, aber realistischer Unsicherheit im jährlichen *Nt*.

Die negative Phase, die 1962 begann, geht 8 Jahre vor dem Beginn im Jahr 1970 zurück, als der globale Verbrauch (ökologischer Fußabdruck) die Biokapazität der Erde überstieg [29]. 1970 ging die Erde zu einem globalen Biokapazitätsdefizit über (erforderliche Erden >1; Abbildung 2(a)) und ist es seitdem geblieben, wahrscheinlich getrieben durch die rasche Ausweitung der wirtschaftlichen Aktivitäten durch fossile Brennstoffe, die nach dem Zweiten Weltkrieg zu einem globalen Phänomen wurde. Die Phasenverschiebung entstand nicht durch eine abrupte Verschiebung der Altersstruktur - in der Tat fanden wir eine Entkopplung zwischen *r* und mittlerem Alter und *r* und Anteil der "jungen" (<15 Jahre alt) in der Weltbevölkerung zwischen 1950 und 1986 (Abbildung S8).



Vergrößern | Herauszoomen | Bildgröße zurücksetzen

Abbildung 2. (a) Beziehung zwischen der momentanen (jährlichen) exponentiellen Veränderungsrate (r = loge(Nt_{+1}/Nt) und der Bevölkerungsgröße (*N*) im Jahr *t* von 1800 bis 2023. Es gibt eine positive Beziehung zwischen *r* und *Nt* von 1800 bis 1949, was auf eine Erleichterung hindeutet. Die gepunktete horizontale Linie, die sich 1929-1930 schneidet, zeigt das höchste *r an, das* während der Erleichterungsphase beobachtet wurde (0,011). Das negative *r*, das für 1949-1950 gezeigt wird, ist ein Artefakt der globalen Volkszählungsdaten, die ab 1950 standardisiert werden. Nach dem Zweiten Weltkrieg bis in die 1950er Jahre gab es jedoch eine Zeit des Übergangs zu hohem *r*, aber keine Beziehung zu *Nt*, und dann die Etablierung einer negativen *r* ~ *Nt*-Beziehung von etwa 1961-1962 bis heute. Auf der rechten *y*-Achse wird auch der ökologische Fußabdruck angezeigt, ausgedrückt in Bezug auf die Anzahl der Erde, die zur Begleichung des globalen menschlichen Verbrauchs erforderlich ist - bei 1 "Erde" entspricht der globale ökologische Fußabdruck (ökologische Ressourcen, die die Weltbevölkerung benötigt, um die natürlichen Ressourcen zu produzieren, die sie verbraucht, und um ihre Abfälle zu absorbieren) der Biokapazität der Erde (Produktivität ökologischer Vermögenswerte, einschließlich Ackerland, Weideland, Waldland, Fischereigebiete und bebautes Land) [29]. Der globale ökologische Fußabdruck hat seit 1970 die Biokapazität der Erde überschritten (Übergang von blau zu rosa). (b) Die logistischen Beziehungen zwischen Ricker und Gompertz für die Erleichterung und die negativen Phasen (Akaikes Informationskriteriengewichte *wAICc*, die für jedes Modell für jede Phase gezeigt werden) zeigen die größte Unterstützung für das Ricker-Modell. Erweiterung der angepassten Ricker-Beziehung zwischen *r* und *Nt* auf einen Punkt, an dem *r* (*y*) = 0 die maximale (biophysikalische) globale Populationsgröße (KR = −intercept ÷ Steigung) anzeigt. Unter der Annahme, dass es keine Abweichung von dieser erwarteten Beziehung gibt, prognostizierte KR = 11,66–12,40 Milliarden Menschen, die zwischen 2065 und 2074 auftreten würden. Die Verlängerung der negativen Beziehung zurück auf *Nt* (*x*) = 0 (Abschnitt) zeigt die theoretische maximale Rate der für Menschen vorhergesagten Zunahmen in Abwesenheit der Sterblichkeit (*rm*): 0,0281–0,0296, was gut mit der kohortenbasierten Vorhersage [77] von *rm* für Menschen = 0,03 übereinstimmt. Die Verlängerung der Erleichterungsbeziehung zurück auf *Nt* (*x*) = 0 (Abschnitt) ergibt *rm* = -0,001–0,001 (Median = 0,0003), deren Obergrenze nahe an der vorhergesagten Rate des Wachstums der Jäger-Sammler-Population liegt, das aus kohortenbasierten Modellen abgeleitet wird (*rm* = 0,003) [77]. Rote (Ricker) und grüne (Gompertz) Schattierungen um logistische Anpassungen zeigen 95% Konfidenzintervalle an.

Download-Zatzeil:
Standardbild | Hochauflösendes Bild

3.2. Tragfähigkeit

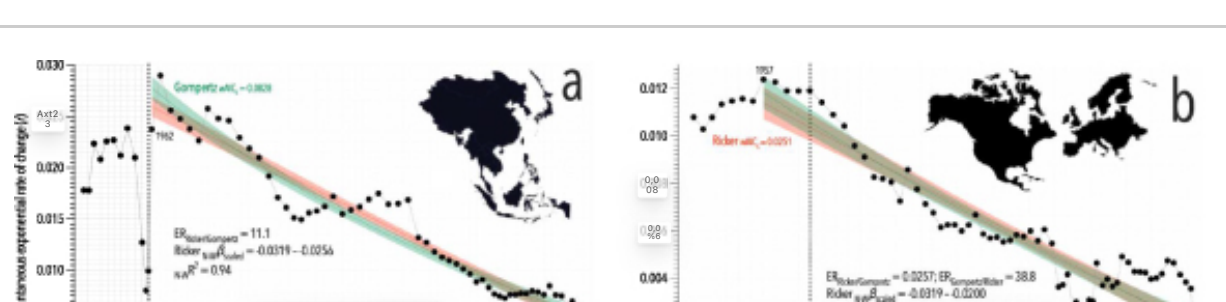
Basierend auf dem logistischen Modell von Ricker haben wir die Populationsgröße bei *r*= 0 (definiert als Ricker-Tragekapazität KR) bei 11,66–12,40 Milliarden Menschen vorhergesagt (Abbildung 2(b)). Unter der Annahme, dass keine Abweichung von der erwarteten Beziehung besteht, berechnen wir, dass dies zwischen 2067 und 2076 auftreten würde (Abbildung 2(b)). Die Newey-West-Autokorrelation-korrigierte Schätzung von KR betrug 11,44–12,69 Milliarden (d. h. eine leichte Verlängerung des Konfidenzintervalls). Der im vorherigen Abschnitt beschriebene Resampling-Ansatz, in dem wir den Bevölkerungsschätzungen der Vereinten Nationen 1% Unsicherheit für die negative Phase hinzugefügt haben, berechnete eine maximale Bevölkerungsgröße aus dem Ricker-Logistic KR =$-\hat{\alpha}/\hat{\beta}$, wo$\hat{\alpha}Und\hat{\beta}$sind der Schnittpunkt und die Steigung der *r*~ *Nt*-Beziehung [Ricker] bzw.) von 11,59-13,36 Milliarden und stimmen damit mit unserer deterministischen (nicht-stochastischen) Vorhersage von 11,66–12,40 Milliarden darüber überein.

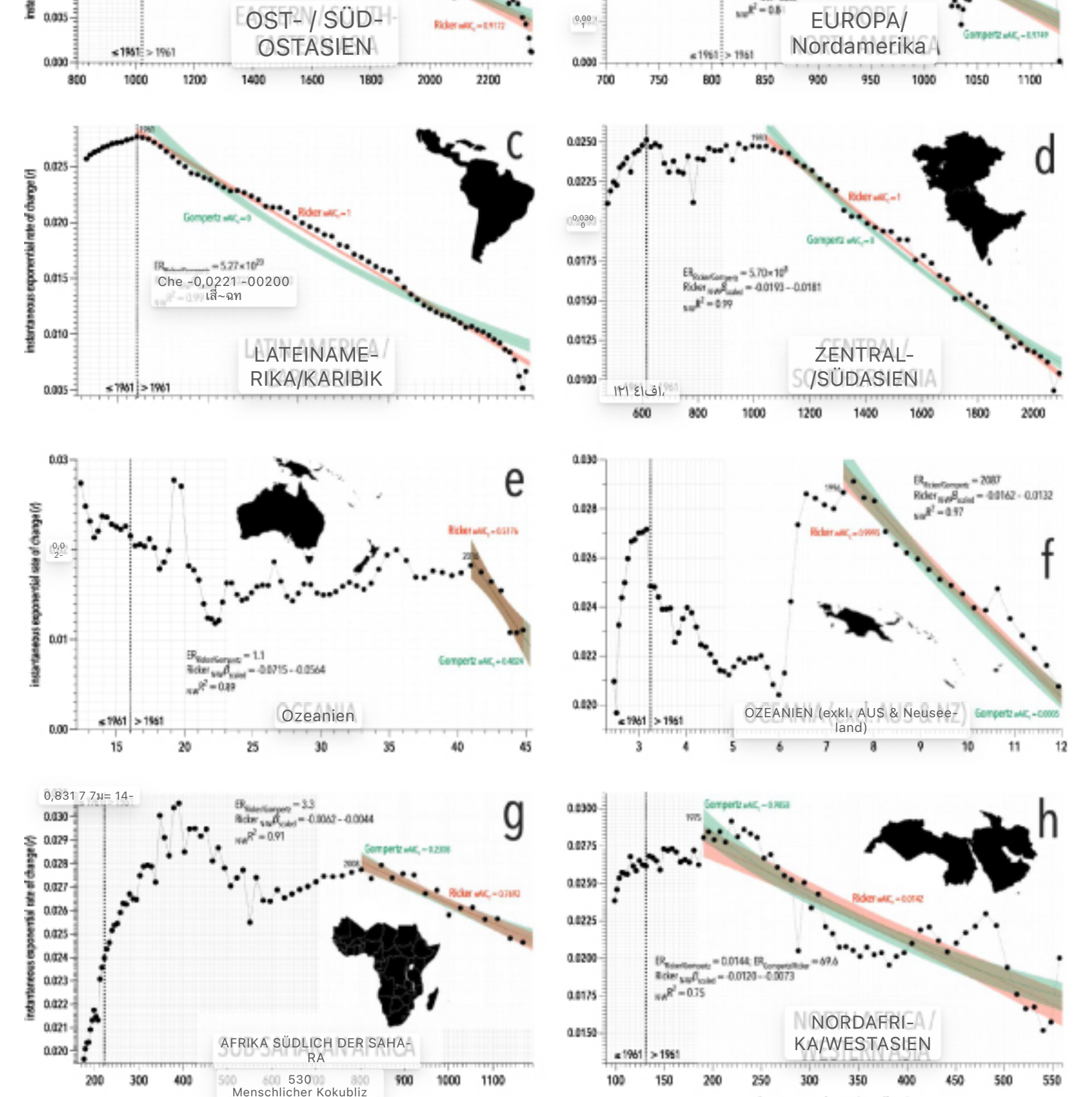
Die Erweiterung des Ricker-Logistikmodells auf den Schnittpunkt (wobei *Nt* = 0) zur Berechnung der theoretischen maximalen Anstiegsrate (*rm*) ergibt 0,028–0,029, was gut mit den theoretischen Vorhersagen des maximalen Bevölkerungswachstums übereinstimmt, das für Menschen berechnet wird (*r*= 0,03) ohne Sterblichkeit [77]. Ebenso haben wir die Erleichterungsbeziehung wieder auf *Nt* = 0 erweitert, um *rm* = -0,001-0,001 (Median = 0,0003) zu berechnen, was auch mit dem realisierten *rm* übereinstimmt, das aus kohortenbasierten Modellen für nicht-agropastoralistische Menschen abgeleitet wurde [77].

Wir schätzten die Erleichterungskapazität Kf, indem wir das Maximum *r* während der Erleichterungsperiode 1800-1949 (*r* = 0,011 von 1929-1930; Abbildung 2(a)) nahmen, um eine globale Bevölkerung von etwa 2,47 Milliarden zu berechnen (Abbildung 2(a)). Natürlich würde eine wirklich "nachhaltige" Bevölkerung mit hohem durchschnittlichen Wohlbefinden bis zu einem gewissen Grad von vielen anderen Merkmalen abhängen, die über die Demografie hinausgehen (z. B. Struktur, Wirtschaft, soziale Bedingungen). Die allgemeine Annahme, dass ältere, langsamer wachsende Bevölkerungsgruppen weniger produktiv sind und eine geringere sozioökonomische Leistung haben als jüngere, schneller wachsende Bevölkerungsgruppen, wird jedoch nicht durch Daten gestützt [78]. Darüber hinaus liegt unsere Schätzung von Kf bemerkenswert nahe an den zuvor geschätzten globalen *K* = 3,3 Milliarden, um allen Menschen ein komfortables wirtschaftliches Leben zu ermöglichen [36]. Aus der Perspektive eines nachhaltigen ökologischen Fußabdrucks haben wir auch ein *K* von 2,35 Milliarden berechnet, unter der Annahme einer Verbrauchsrate von 0,5 Erden, um den Überkonsum (im Vergleich zu den heute verbrauchten 1,7 Erden) und die aktuelle menschliche Bevölkerung von 8 Milliarden zu vermeiden. Wenn man 1,7 (derzeit verwendete) Erden ÷ 0,5 (Zielerden) nimmt, schätzt man, dass die globale menschliche Bevölkerung 3,4-mal zu groß ist und dass *K* = 8 Milliarden ÷ 3,4 = 2,35 Milliarden bei heutigem durchschnittlichen materiellen Lebensstandard und der Verteilung des aktuellen Verbrauchs "nachhaltig" wären [29]. Übrigens zeigen wir, dass die globale Bevölkerungswachstumsrate 2018 unter *r* = 0,011 gefallen ist und seitdem weiter zurückgegangen ist (Abbildung 2(a)).

3.3. Regionale Unterschiede

Die stärkste Abnahmerate von *r* mit zunehmendem *N* während der negativen Phase trat in Ozeanien (Signal dominiert von Australien und Neuseeland), dann Ost- und Südostasien (Abbildung 3(a)), gefolgt von Europa/Nordamerika und Lateinamerika/Karibibik (Abbildungen 3(b), (c) und 4). Die letzten drei Regionen begannen auch ihre negative Phase in den späten 1950er oder frühen 1960er Jahren (Abbildungen 3(a)–(c)) nach dem globalen Trend (Abbildung 2(a)). Die negative Phase der verbleibenden Regionen begann jedoch später (nach 1975; Abbildung 3), wobei Subsahara-Afrika die letzte Region war, die 2010 eine negative Phase begann (Abbildung 3(g); ohne Ozeanien mit Australien und Neuseeland). Afrika südlich der Sahara ist auch die Region mit der schwächsten Rate des Rückgangs von *r* mit *N* und der größten Unsicherheit in der Schätzung von KR angesichts der kürzesten verfügbaren Zeitreihe während der negativen Phase (Abbildungen 3(g) und 4). Aber auch die afrikanischen Länder mit den höchsten Fruchtbarkeitszahlen weltweit zeigen in den letzten Jahrzehnten immer noch Anzeichen für eine Verlagerung in eine negative Phase (ergänzende Materialanhang IV Abbildung S9). Regionale Unterschiede in der Rate des Rückgangs von *r* mit *N* während der negativen Phase deuten darauf hin, dass (*i*) die Rate des Rückgangs des Bevölkerungswachstums in Regionen mit geringerer duer duner Fruchtbarkeit schneller ist, (*ii*) wohlhabendere Regionen (gemessen am BIP) einen schnelleren Rückgang des Bevölkerungswachstums haben, (*iii*) je früher die negative Phase beginnt, desto schneller die Rate des Rückgangs des Bevölkerungswachstums und (*iv*) es möglicherweise einen schnelleren Rückgang der Fruchtbarkeit von unmittelbar vor dem Übergang zur Rückgangsphase im *Vergleich* zur Rückgang zur Rückgangsphase in Regionen mit dem schnellsten Bevölkerungswachstum gibt (ergänzende Material Anhang IV Abbildung S10).



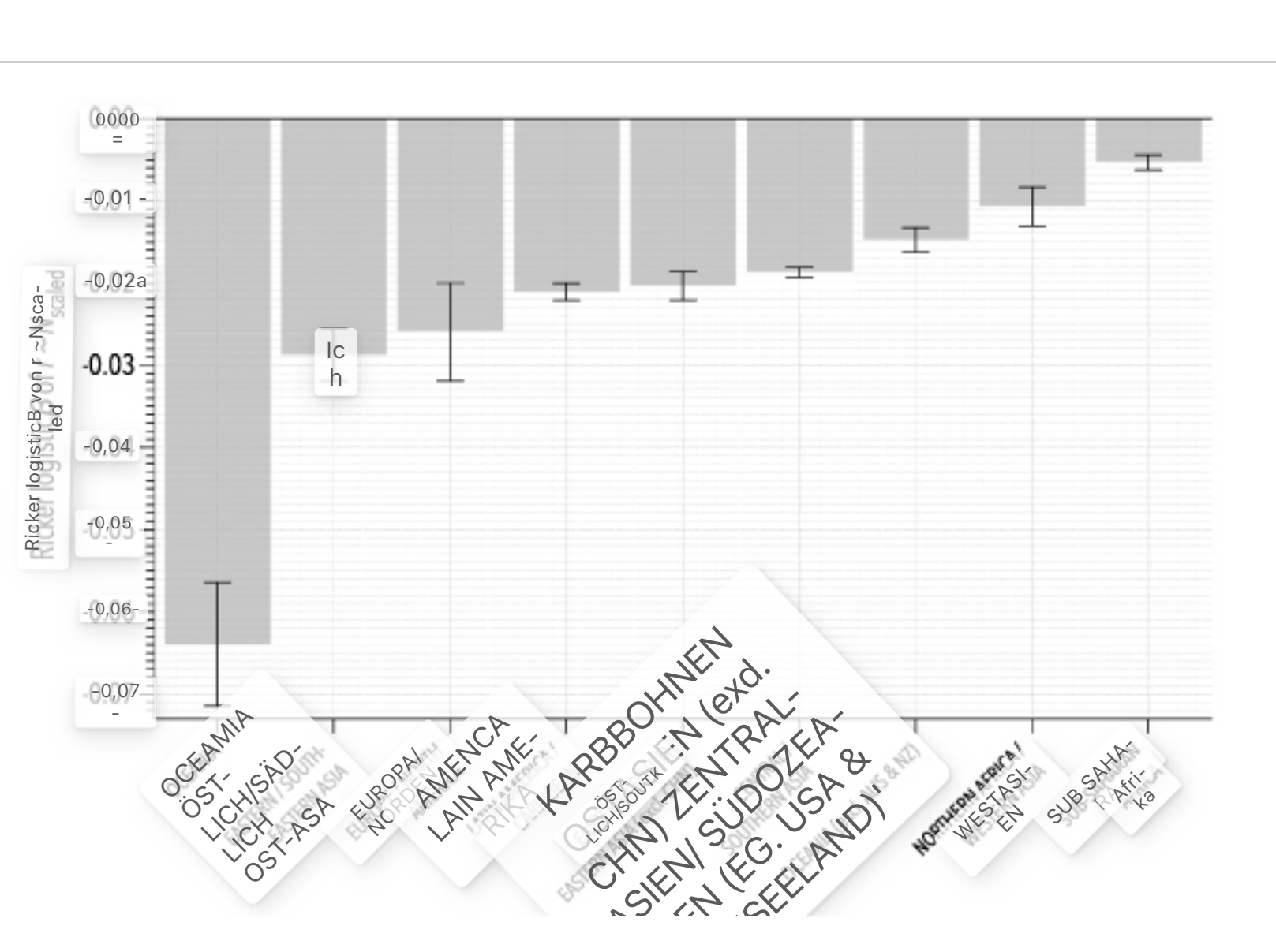


Vergrößern Herauszoomen Bildgröße zurücksetzen

Abbildung 3. Beziehung zwischen der momentanen (jährlichen) exponentiellen Veränderungsrate ($r = \log_e(N_{t+1}/N_t)$ und der Bevölkerungsgröße (N) (Ricker-Logistik) im Jahr t von 1950 bis 2023 für sieben große globale Regionen, sortiert nach absteigender Steigungsgröße (Abfallrate von r mit zunehmendem N; siehe auch Abbildung 4). Ebenfalls gezeigt sind die logistischen Beziehungen von Gompertz, und die Informationskriteriengewichte des Akaike (*wAICc*) für jedes Modell weisen meist auf eine dominante Unterstützung für das Ricker-Modell hin (oder eine fast identische Dynamik wie die Gompertz-Modells, wenn die *wAICc* dieses Modells höher ist). N für jede Region wird zuerst so skaliert, dass die Steigungen vergleichbar sind (Abbildung 4). (a) Ost- und Südostasien, (b) Europa und Nordamerika, (c) Lateinamerika und Karibik, (d) Zentral- und Südasien, (e) Ozeanien, (f) Nordafrika und Westasien, (g) Subsahara-Afrika. Die vertikale gepunktete Linie in jedem Panel zeigt den Beginn der Periode der negativen Phase (>1961) aus den globalen Daten an (Abbildung 2). Das Jahr, in dem die negative Phase in jeder Region begann, die in jedem Panel angezeigt wird. Rote (Ricker) und grüne (Gompertz) Schattierungen um logistische Anpassungen zeigen 95% Konfidenzintervalle an.

Download-Zeitzahl:

Standardbild Hochauflösendes Bild



Vergrößern Herauszoomen Bildgröße zurücksetzen

Abbildung 4. Resample (10 000 Iterationen) des Ricker-Logistikhangs β, wobei mehr negative Werte auf eine zunehmende Rückgangsrate der momentanen exponentiellen Rate des jährlichen Wachstums ($r = \log_e(N_{t+1}/N_t)$ im Verhältnis zur Bevölkerungsgröße (N, skaliert, aber nicht zentriert, unter Verwendung der *Skalenfunktion* in *R* hinweisen, um sicherzustellen $\hat{\beta}$ sind auf dem gleichen Maßstab) zum Zeitpunkt t pro großer globaler Region von 1950 bis 2023. Fehlerbalken zeigen 95 % Konfidenzintervalle an. Regionen, die von den meisten negativen β bis zu den wenigsten negativen β geordnet waren. Siehe auch Abbildung 3.

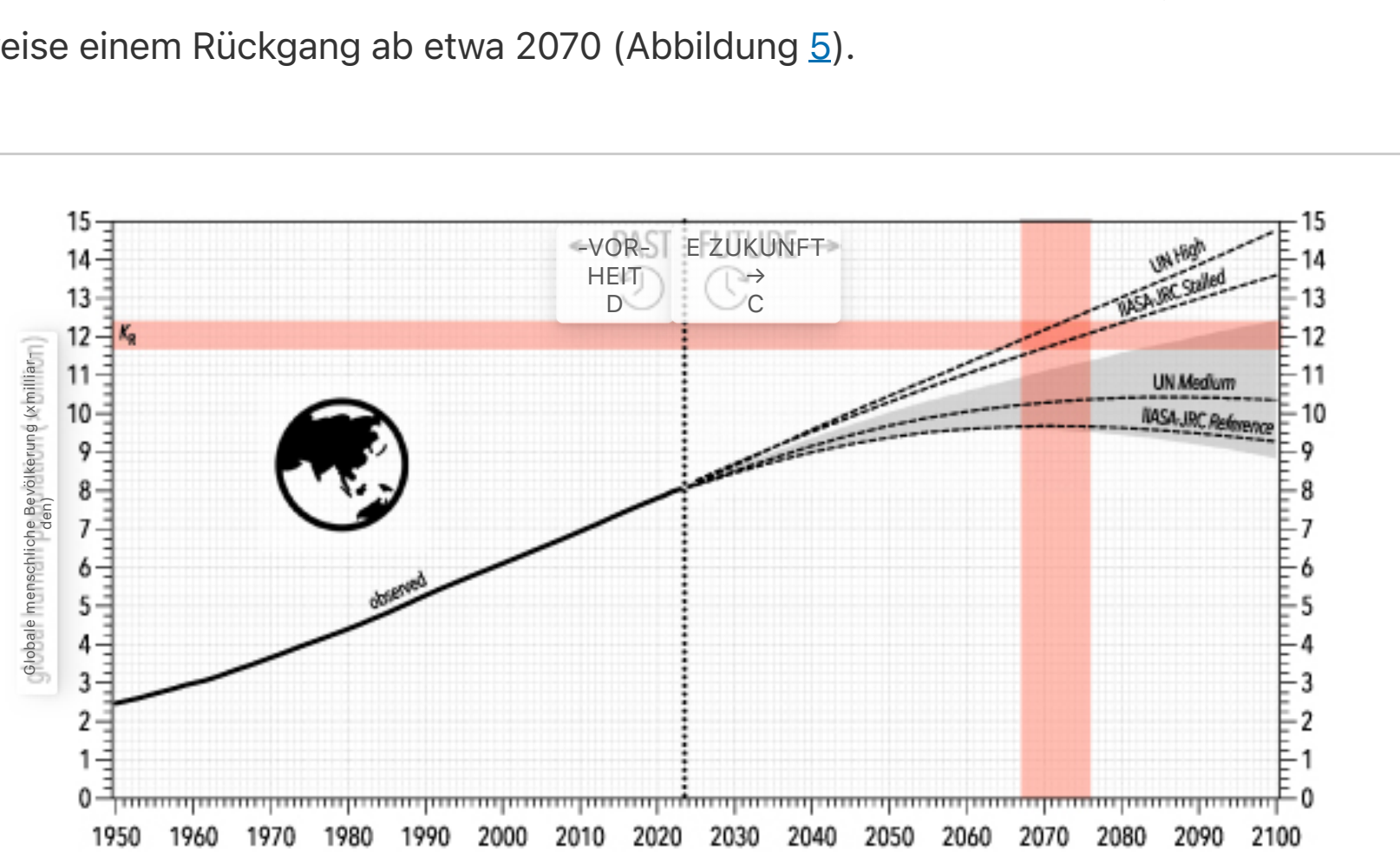
Download-Zeitzahl:

Standardbild Hochauflösendes Bild

Die Erweiterung der Ricker-Fits auf $r = 0$ für die negative Phase jeder Region berechnet KR für jede: 3,22–5,18 Milliarden für Subsahara-Afrika, 2,70–2,96 Milliarden für Zentral-/Südasien, 2,32–2,92 Milliarden für Ost-/Südostasien, 0,98–1,46 Milliarden für Europa/Nordamerika, 0,90–1,42 Milliarden für Nordafrika/Westasien, 0,78–0,84 Milliarden für Lateinamerika/Karibik und 0,02-0,11 Milliarden für Ozeanien (ergänzender Materialanhang IV, Abb. S11). Die Summe dieser Bereiche ergibt 10,92–14,89 Milliarden, was nur 7,3 % über dem KR liegt, den wir aus den globalen Daten zusammen (11,66–12,40 Milliarden; Abbildung 2(b)) berechnet haben. Obwohl wir auch in allen Regionen mindestens einen Moderationszeitraum identifiziert haben (Abbildung 3), gehen die regionalen Daten nur auf 1950 zurück und können nicht zuverlässig verwendet werden, um die Form des Ricker-Logistikmodells für die Erleichterungsphase abzuschließen. Die Entfernung Chinas aus Ost- und Südostasien hatte wenig Einfluss auf die Dynamik der Region, obwohl China allein die stärkste ($R^2 = 0{,}92$) berechnete Rückgangsrate von r mit zunehmendem N (Steigung = -0,0346) im Vergleich zu jeder anderen Region hatte (ergänzendes Material Anhang IV, Abbildung S12(c)).

3.4. Korrespondenz mit Prognosen

Unsere berechnete Schätzung von KR aus dem auf die negative Phase angewendeten Ricker-Logistikmodell (Abbildung 2(b)) zeigt die beste Übereinstimmung mit den *High [1]*- und IIASA-JRC-*Starien der* Vereinten Nationen [54, 55], aber mit Plateau-Auftritten wie in den United Nations *Medium* und *Probabilistic* und den IIASA-JRC-*Referenzszenarien* (Abbildung 5). Diese Korrespondenz unterstützt die höheren Vorhersagen des Bevölkerungswachstums unter den *High*- und IIASA-JRC-*Stalled*-Szenarien der Vereinten Nationen, aber mit Stabilisierung und möglicherweise einem Rückgang ab etwa 2070 (Abbildung 5).



Vergrößern Herauszoomen Bildgröße zurücksetzen

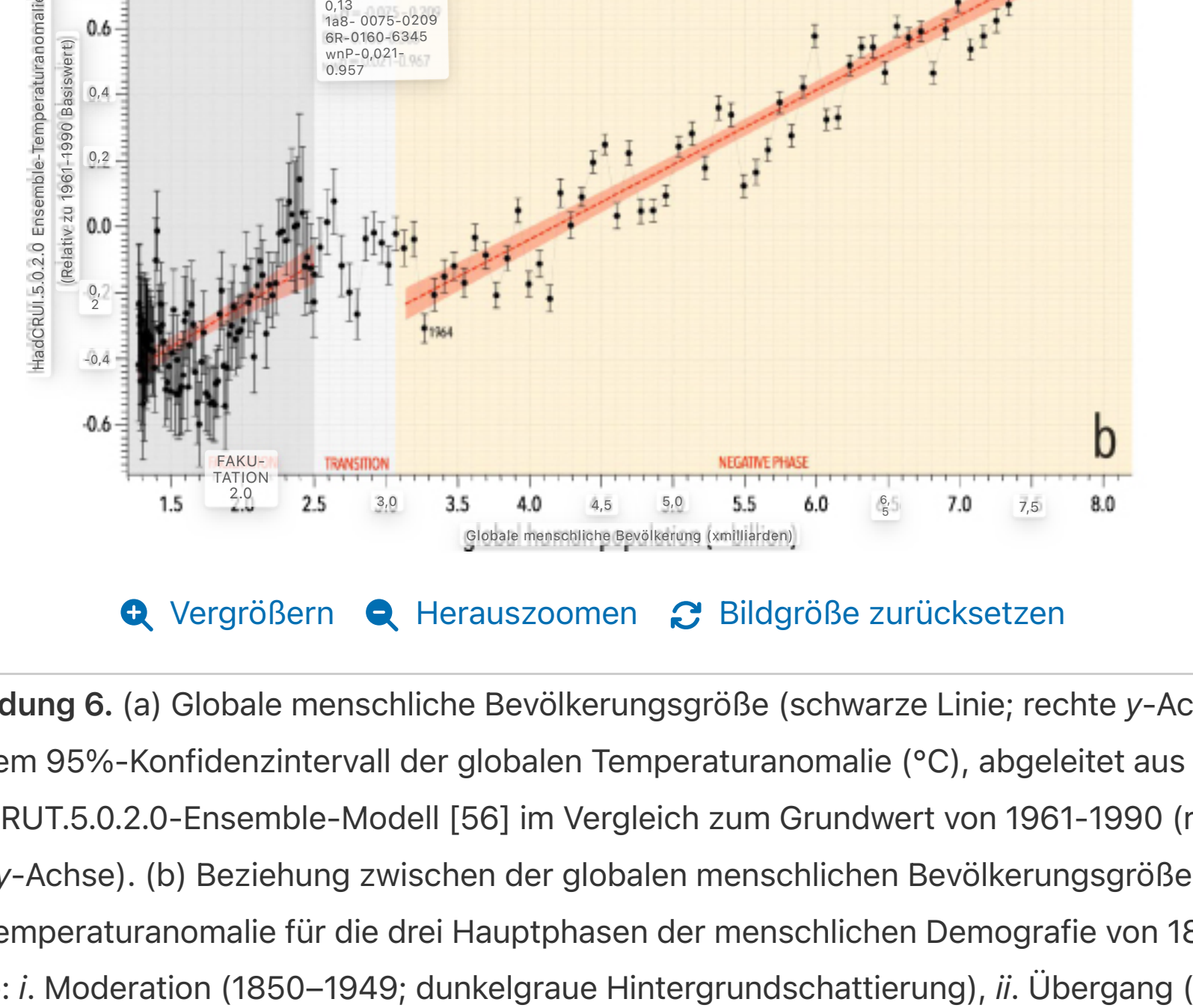
Abbildung 5. Vergangene Flugbahn und zukünftige Projektionen der globalen menschlichen Bevölkerung aus den plausibelsten [31] Modellen der Vereinten Nationen (UN) und IIASA-JRC. Gepunktete schwarze Linien sind die *mittleren* und *hohen* Szenarien der Vereinten Nationen [1] und die *Referenz*- und *Stand*-Szenarien des IIASA-JRC [54, 55]; der grau schattierte Bereich ist das 95%-Konfidenzintervall für die UN-*Probabilistische* Bevölkerungsprognosen [1]. Die rote Schattierung zeigt die maximale menschliche Tragfähigkeit an, die aus dem Ricker-Modell abgeleitet ist (KR = 11,66–12,40) und das Timing (2067–2076), das aus Abbildung 2(b) abgeleitet ist.

Download-Zeitzahl:

Standardbild Hochauflösendes Bild

3.5. Indizes des globalen Wandels

Wie wir vermuteten, stellten wir fest, dass die globale Temperaturanomalie ab 1962 am stärksten und positivsten mit der globalen menschlichen Bevölkerungsgröße korrelierte ($_{\text{N-WR2}} = 0{,}911$–$0{,}928$; Abbildung6(b)), selbst nachdem die zeitliche Autokorrelation berücksichtigt wurde. Obwohl wir während der Erleichterungsphase auch eine positive Korrelation zwischen Temperaturanomalie und menschlicher Populationsgröße berechnet haben, ist sie schwächer ($_{\text{N-WR2}} = 0{,}197$–$0{,}353$; Abbildung 6(b)). Die menschliche Populationsgröße war auch ein stärkerer Prädiktor für Temperaturanomalie, globalen ökologischen Fußabdruck und jährliche Gesamt-CO2-e-Emissionen als der Pro-Kopf-Energieverbrauch (ergänzende Materialanhang III), obwohl wir anerkennen, dass dieses einfache Modell den komplexen Beitrag technologischer Innovationen ignoriert [79], der in einer Beziehung zwischen globalem Wandel und Bevölkerungsgröße und -verbrauch innewohnt [80].



Vergrößern Herauszoomen Bildgröße zurücksetzen

Abbildung 6. (a) Globale menschliche Bevölkerungsgröße (schwarze Linie; rechte *y*-Achse) mit dem 95%-Konfidenzintervall der globalen Temperaturanomalie (°C), abgeleitet aus dem HadCRUT.5.0.2.0-Ensemble-Modell [56] im Vergleich zum Grundwert von 1961-1990 (rot; linke *y*-Achse). (b) Beziehung zwischen der globalen menschlichen Bevölkerungsgröße und der Temperaturanomalie für die drei Hauptphasen der menschlichen Demografie von 1850 bis heute: *i*. Moderation (1850–1949; dunkelgraue Hintergrundschattierung), *ii*. Übergang (1950-1961; hellgraue Hintergrundschattierung) und *iii*. Die negative Phase (1962–2023; Pfirsichhintergrundschattierung). Für jede Phase sind die 95%-Konfidenzintervalle für die linearen Modell-Evidenz-Verhältnisse (ER) und die Newey-West-Heteroskedastizitäts- und Autokorrelations-korrigierte Güte der Anfälle ($_{\text{N-WR2}}$), Steigungen ($_{\text{N-W}\beta}$) und die Wahrscheinlichkeiten eines Typ-I-Fehlers ($_{\text{N-Wp}}$) gezeigt. Die rote Schattierung zeigt ein 95 %-Konfidenzintervall der linearen Anpassungen in den Phasen *i* und *iii* an.

Download-Zeitzahl:

Standardbild Hochauflösendes Bild

4. Diskussion

Unsere Vorhersagen der globalen nachhaltigen Tragfähigkeit und der maximalen Populationsgröße basieren als erste allein auf Zeitreihen der menschlichen Bevölkerung und der Einfachheit phänomenologischer Modelle [20]. Eine Metaanalyse von van den Bergh und Rietveld [23] untersuchte 51 Studien, die 94 Schätzungen einer Grenze für die globale menschliche Bevölkerung ergaben. Ihre mediane Meta-Prognose aus diesen 51 Studien betrug 7,7 Milliarden Menschen, reichte aber von 650 Millionen unter der Annahme einer Low-Tech-Zukunft, in der die Verfügbarkeit von Wasser der wichtigste begrenzende Faktor ist, bis zu 288 Milliarden unter der Annahme der "besten" Zukunftstechnologie für alle Länder (wobei die meisten Schätzungen weit über der derzeit prognostizierten zukünftigen globalen Bevölkerungsgrößen liegen). Die Unsicherheit ergibt sich hauptsächlich aus den vielen verschiedenen Annahmen und Dimensionen, die in den Projektionen berücksichtigt werden, ein Problem, das wir vermieden haben, indem wir unsere Schätzungen der maximalen und nachhaltigen Tragfähigkeit allein auf die Bevölkerungsdaten stützen. Andere haben die multivariaten Beziehungen mehrerer menschlicher demografischer Raten und sozioökonomischer Faktoren relativ zur menschlichen Dichte auf verschiedenen räumlichen Skalen untersucht [2, 81–83]. Zum Beispiel fanden Lutz *et al [2]* starke Zusammenhänge zwischen der Gesamtfruchtbarkeitsrate auf Länderebene und der Bevölkerungsdichte (gemessen pro Fläche von Aklberland), aber nur eine schwache Beziehung zwischen *r* und Bevölkerungsdichte. Keine frühere Studie hat jedoch die Beweise für die Beziehungen zwischen *r* und *N* auf globaler oder regionaler Ebene untersucht, wie wir es hier getan haben.

Die Mechanismen, die das Phänomen eines Rückgangs von *r* innerhalb der wachsenden globalen menschlichen Bevölkerungsgröße vorantreiben, sind notwendigerweise komplex und umfassen wahrscheinlich sowohl direkte als auch indirekte Wege, die zu einem reduzierten Bevölkerungswachstum führen. Das Bevölkerungswachstum ist eine Ensemble-Eigenschaft, die sich in erster Linie aus zwei demografischen Hauptkomponentenraten entwickelt: Fruchtbarkeit und Überleben [20]. In modernen menschlichen Gesellschaften hat die Fruchtbarkeit die größte Wirkung auf das Bevölkerungswachstum [2] und ist in der Tat während der negativen Phase global und regional zurückgegangen (ergänzendes Material Anhang IV Abbildung S13). Im Gegensatz dazu nahm das Überleben (gemessen an der Lebenserwartung bei der Geburt) während der negativen *r* ~ *N*-Phase zu, obwohl das Bevölkerungswachstum gleichzeitig zurückging (ergänzender Materialanhang IV Abbildung S14). Obwohl der Beginn des Fruchtbarkeitsrückgangs gleichzeitig mit dem Beginn der negativen *r*~ *N*-Phase weltweit (Abbildung S14(a)) und in Ost-/Südostasien, Europa/Nordamerika und Lateinamerika/Karibik (Abbildungen S14(b)–(d)) gleichzeitig war, begannen sie früher als der Beginn der negativen Phase in Zentral-/Südasien, Ozeanien, Nordafrika/Westasien und Subsahara-Afrika (ergänzende materielle Zahlen S12(e)–(h)). Die Tatsache, dass die einkommensschwächsten Regionen der Welt ihren Abstieg in die negative *r*~ *N*-Phase später begannen als in Regionen mit höherem Einkommen (wo die Entwicklung früher begann), unterstützt auch die Vorstellung, dass die Intensität der Entwicklung durch die Ausbeutung fossiler Brennstoffe der Haupttreiber für den Übergang von der Erleichterung war.

Das Ausmaß, in dem das menschliche Bevölkerungswachstum als Reaktion auf (*i*) Umweltbeschränkungen wie den Zugang zu ausreichend Land und die Effizienz, mit der wir frisches Wasser, Lebensmittel, Energie und andere materielle Ressourcen gewinnen und verbrauchen können [23], (*ii*) Verringerung der Fruchtbarkeit durch chemische Exposition [84] und (*iii*) Menschen, die sich dafür entscheiden, die Fruchtbarkeit zu reduzieren (z. B. nach den im Paradigma "demografischer Übergang" skizzierten Prinzipien) [85] ist kontextspezifisch. In der Tat ist jedes negative Feedback nicht erforderlich, um allein durch direkte biologische Mechanismen zu handeln, da selbst die Wahrnehmung von Auswirkungen auf die Bevölkerung [53] (z. B. Menschenmenge, Wettbewerb um Ressourcen, Konflikte) psychologische Determinanten der menschlichen Entscheidungen in Bezug auf Fruchtbarkeit [2, 25, 36], Empowerment und reduzierte Kindersterblichkeit sein können [86]. Diese Komponenten, die durch die Nutzung fossiler Brennstoffe (z.B. Haushaltsautomationstechnologien) verbessert werden, haben ironischerweise auch eine starke Rolle bei der weltweiten Verringerung der Fruchtbarkeit gespielt.

Der abrupte Übergang von einer positiven zu einer negativen Phase in der berechneten Beziehung zwischen *r* und *N* zeigt, dass menschlicher Einfallsreichtum, Technologie, Energieerzeugung und soziale Struktur seit den 1940er Jahren nicht zu einem höheren menschlichen Bevölkerungswachstum geführt haben. Während Schätzungen der menschlichen Tragfähigkeit, die aus logistischen Modellen abgeleitet werden, einfach und elegant sind, können sie nicht unbedingt die Zukunft vorhersagen. Unsere Schätzungen gehen davon aus, dass die Form des Ricker-Logistikmodells bis $r = 0$ konstant bleibt, aber globale Phänomene wie der unmilderte Klimawandel und der Umweltkollaps [87–89] könnten aufgrund kumulativer Effekte die berechnete lineare Beziehung zwischen *r* und *N* früher entkoppeln. Unser Ansatz geht auch davon aus, dass die Bevölkerungsgröße der *Dichte* (Individuen pro Flächeneinheit) entspricht, von denen letztere direktere mechanistische Einflüsse auf die menschliche Demografie wie Kindermorbidität und -sterblichkeit [90], Infektionskrankheiten [91] und Gesamtfruchtbarkeitsrate [2] als die Populationsgröße *an sich* hat. Nichtsdestotrotz ist die Ensemble-Signalstärke der negativen Phase eher unempfindlich gegenüber der Variation der Tragfähigkeit selbst, obwohl sie dazu neigt, Komponenteneffekte zu unterschätzen (d. h. wie empfindlich die demografischen Raten auf Veränderungen der Populationsgröße sind), wenn die Häufigkeit im Laufe der Zeit stark tendiert [20]. Angesichts der Tatsache, dass die globale menschliche Bevölkerung seit Tausenden von Jahren im Durchschnitt konstant zunimmt und immer noch eine der höchsten Anstiegsraten aufweist, ist die Rate des Rückgangs von *r* mit steigendem *N*, das wir in den globalen Daten beobachtet haben, wahrscheinlich eher unterschätzt als überschätzt. Dies deutet darauf hin, dass die negative Phase noch mindestens einige Jahrzehnte lang unvermindert andan wird.

Unabhängig davon ist klar, dass die Erde die zukünftige menschliche Bevölkerung oder sogar die heutige Bevölkerung nicht ohne eine umfassende Überarbeitung der soziokulturellen Praktiken für die Nutzung von Land, Wasser, Energie, Biodiversität und anderen Ressourcen nicht erhalten kann [22]. Daher erscheint eine Form der gesellschaftlichen Herabstufung [sensu 22] unvermeidlich, ob aktiv erreicht oder als Reaktion auf den anhaltenden Rückgang des Bevölkerungswachstums [27]. Anstatt sich auf eine "maximale" Tragfähigkeit zu konzentrieren, ist die Zahl der Menschen, die sicher in die Umwelt eingedrängt werden können, eine Funktion sowohl der Bevölkerungsgröße als auch des Pro-Kopf-Verbrauchs [26, 80], die beide weiter steigen [53]. Daher muss jede Form der zukünftigen Entwicklung unter dem Dach der "Nachhaltigkeit" die Bedürfnisse und Bestrebungen der gegenwärtigen Gesellschaften erfüllen und gleichzeitig sicherstellen, dass zukünftige Generationen ihre eigenen erfüllen können [37]. Dies kann nicht erreicht werden, wenn man eine maximale Bevölkerungsgröße anstrebt, egal wie gut definiert, insbesondere wenn man bedenkt, dass kleinere Bevölkerungsgruppen mehr individuelle und ökologische Vorteile haben [53]. Die heutigen Volkswirtschaften, die auf ununterbrochenem Wachstum beruhen, erkennen anscheinend [92] die regenerativen Zwänge einer anhaltenden Bevölkerungsexpansion nicht, da fossile Brennstoffe den Unterschied künstlich ausmachen [93]. Die Volkswirtschaften rechnen auch nicht mit der drohenden Reduzierung der Regenerationskapazität, da sich die Klimastörungen verstärken [92]. Die Tragödie ist, dass menschliche Bemühungen die letztendlich unvermeidlichen korrigierenden Feedback-Schleifen, die die Tragfähigkeit auferlegt, kurzgeschlossen haben, ohne sie durch humane und umweltfreundliche Korrektur-Feedbacks zu ersetzen.

Anerkennung

Das Kids Research Institute Australia und Population Matters unterstützten verschiedene Aspekte des Projekts.

Datenverfügbarkeitserklärung

Die Daten, die die Ergebnisse dieser Studie unterstützen, sind unter folgender URL/DOI offen verfügbar:https://doi.org/10.5281/zenodo.10951676 [94].

Referenzen anzeigen

IOPSCIENCE
Zeitschriften
Bücher
IOP-Konferenzreihe
Über IOPscience
Kontaktieren Sie UNS
Zugang zu Entwicklungsländern
IOP Publishing Open-Access-Richtlinie
Zugänglichkeit

IOP-VERÖFFENTLICHUNG
Urheberrecht 2024 IOP Verlagswesen
Allgemeine Geschäftsbedingungen
Haftungsausschluss
Datenschutzbestimmung und Cookie-Richtlinie
Text- und Data-Mining-Richtlinie

PUBLIKTIERUNGSUNTERSTÜTZUNG
Autoren
Tester
Konferenzveranstalter

IOP-Veröffentlichung
ZURÜCK ZUM SEITENANFANG