

Boris Soukharev

Globale Erderwärmung und Migration

Der Klimawandel und seine
Auswirkungen auf die Migration in den
Norden



SACHBUCH



Springer

Globale Erderwärmung und Migration

Boris Soukharev

Globale Erderwärmung und Migration

Der Klimawandel und seine
Auswirkungen auf die Migration in
den Norden



Springer

Dr. Boris Soukharev 
Poznan, Polen

ISBN 978-3-662-68646-1 ISBN 978-3-662-68647-8 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-68647-8>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detailierte bibliografische Daten sind im Internet über <https://portal.dnb.de> abrufbar.

Übersetzung der englischen Ausgabe: „WHY GLOBAL WARMING CANNOT BE STOPPED AND HOW IT WILL LEAD TO MASS MIGRATION“ von Boris Soukharev, © Boris Soukharev 2022. Veröffentlicht durch Boris Soukharev. Alle Rechte vorbehalten.

Das eingereichte Manuskript wurde ins Deutsche übersetzt. Die Übersetzung wurde mit künstlicher Intelligenz erstellt. Um eine hohe Qualität der Übersetzung zu gewährleisten, wurde sie anschließend von den Autor*innen inhaltlich geprüft und ggf. überarbeitet. In stilistischer Hinsicht kann sie sich dennoch von einer herkömmlichen Übersetzung unterscheiden.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2024

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jede Person benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des/der jeweiligen Zeicheninhaber*in sind zu beachten.

Der Verlag, die Autor*innen und die Herausgeber*innen gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autor*innen oder die Herausgeber*innen übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Einbandabbildung: (c) Adobe Stock / sakepaint / Generiert mit KI

Planung/Lektorat: Simon Shah-Rohlf

Wissenschaftsredakteurin: Dr. Anita Zavodska (Barry University, U.S.A.)

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Wenn Sie dieses Produkt entsorgen, geben Sie das Papier bitte zum Recycling.

Meiner Frau Anna gewidmet, ohne deren endlose Geduld, große Hilfe und unglaublichen Glauben an mich dieses Buch nie geschrieben worden wäre

Vorwort: Worum geht es in diesem Buch?

Liebe Leser!

Dieses populärwissenschaftliche Buch richtet sich an allgemeine Leser¹ auf der ganzen Welt, die daran interessiert sind zu verstehen, was mit unserem Klima passiert, warum weitere globale Erwärmung und Klimaveränderungen unvermeidlich sind, welche die Hauptfolgen sind und was die Menschheit in dieser bedrohlichen Situation tun sollte.

Dieses Buch *unterscheidet sich erheblich* von den meisten der bestehenden Literatur über globale Erwärmung und Klimawandel. Es ist üblich, in den meisten Zeitungs- oder Zeitschriftenartikeln, populärwissenschaftlichen Büchern und sogar in vielen wissenschaftlichen Veröffentlichungen zum Klimawandel zu lesen, dass obwohl die globale Erwärmung durch menschliche Aktivitäten verursacht wird, die Menschen immer noch die Macht haben, zu verhindern, dass sie schlimmer wird. Die Autoren wiederholen normalerweise das gleiche Klimapolitik-Mantra – dass die Zeit knapp wird, aber wir können die globale Erwärmung noch stoppen, wenn wir jetzt handeln. Diese irreführende Idee wird endlos wiederholt und von einem Buch oder Artikel zum nächsten weitergegeben.

Im Gegensatz zur Literatur, die über Dinge spricht, die gut für das Klima sein könnten, aber in der Praxis unerreichbar sind, beschreibt dieses Buch

¹Anmerkung zur Übersetzung: Bei der Übersetzung von im Englischen nicht nach Geschlecht differenzierten Personenbezeichnungen wie „reader“, „scientist“ u. Ä. wurde im Deutschen meistens die männliche Form „Leser“, „Wissenschaftler“ u. Ä. verwendet, um den Text kürzer und besser lesbar zu machen. Selbstverständlich sind damit Personen jeden Geschlechts gemeint.

die Realität und präsentiert Beweise, die deutlich zeigen, dass die Menschheit die globale Erwärmung und den Klimawandel in absehbarer Zukunft nicht stoppen wird. Die Gründe dafür liegen nicht nur in der stetig wachsenden menschlichen Wirtschaftstätigkeit, die die anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen stetig erhöht. Es gibt ein noch größeres, weitaus schlimmeres Problem. Als Ergebnis der ständig zunehmenden industriellen Aktivitäten, die immer mehr Treibhausgase in die Atmosphäre abgeben und die damit verbundene globale Erwärmung verursachen, hat die Menschheit „schlafende Riesen“ – gefährliche mächtige natürliche positive (d. h., die die ursprüngliche Erwärmung erhöhen) Klimarückkopplungsprozesse geweckt, die sofort begannen, sich selbst in bösartigen Schleifen zu wiederholen, und die relativ bescheidene anfängliche anthropogene Erwärmung, die sie ausgelöst hat, zu verstärken. Vor der industriellen Revolution waren diese positiven Klima-Rückkopplungen inaktiv, da die Erde sich in einem Zustand natürlicher Strahlungsgleichgewicht befand, in dem die einfallende Energie von der Sonne durch die abgehende Energie von der Erde ausgeglichen wurde. Jetzt, mit dem ständig zunehmenden Energieungleichgewicht der Erde, sind diese natürlichen „Riesen“ erwacht, und das große Problem ist, dass sie, einmal erwacht, nicht wieder einschlafen werden, selbst wenn die Menschheit aufhört, Treibhausgase in die Atmosphäre auszustoßen. Dies liegt daran, dass die globale Erwärmung und positiven Klima- Rückkopplungen sich in einer sich selbst verstärkenden Schleife intensivieren: steigende Temperaturen verstärken die Klima-Rückkopplungen, während stärkere Klima- Rückkopplungen die Erwärmung noch mehr beschleunigen.

Die Aktivierung von mächtigen positiven, sich selbst verstärkenden Klima- Rückkopplungen verändert vollständig unser Verständnis davon, was mit dem Klima in der Zukunft geschehen wird, weil es bedeutet, dass die weitere globale Erwärmung *nicht mehr nur* von weiteren anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen abhängt, wie in der Vergangenheit, sondern auch von Klima-Rückkopplungen. Diese positiven Klima-Rückkopplungen sind wie ein sehr gefährlicher Dschinn, der bereits aus der Flasche gesprungen ist und jetzt nicht mehr zurückgedrängt werden kann. Selbst wenn die Menschheit früher oder später beginnt, die globalen Treibhausgas-Emissionen zu reduzieren (selbst wenn sie dies erheblich tut), werden die bereits eingeleiteten selbstverstärkenden Klima-Rückkopplungen immer noch zu einer weiteren globalen Erwärmung führen. Es ist daher wichtig zu erkennen, dass die Reduzierung von Emissionen die *globale Erwärmung verlangsamen* kann, aber *sie nicht stoppen* kann. Mit oder ohne anthropogene Emissionen werden die selbstverstärkenden Klima-Rückkopplungen weiterhin zu einer

erheblichen Erwärmung führen und unseren Planeten bis zum 21. Jahrhundert wahrscheinlich weit über die $\sim 3^\circ\text{C}$ globale Erwärmung hinausführen, die unter der aktuellen globalen Klimapolitik angenommen wird. Tatsächlich könnte die globale Erwärmung die vorindustriellen Werte um bis zu $4\text{--}5^\circ\text{C}$ bis zum Ende des 21. Jahrhunderts überschreiten.

Eine detaillierte Erklärung, was diese positiven Klima-Rückkopplungen sind, wie sie funktionieren und welche zusätzliche Erwärmung sie verursachen können, bildet einen großen und wichtigen Teil dieses Buches. Solche Informationen fehlen fast vollständig in einem Großteil der bestehenden Literatur zum Klimawandel, die sich hauptsächlich auf anthropogene Emissionen von Treibhausgasen konzentriert.

Angesichts der bevorstehenden weiteren Klimaerwärmung, stellt sich die Frage, was sollte die Menschheit tun? Dieses Buch zeigt, dass die Menschheit keine andere Wahl hat, als sich auf das schlimmste Szenario einer Klimakrise vorzubereiten und sich an ein neues, viel weniger komfortables Klima anzupassen.

Wie der Leser aus diesem Buch ersehen kann, werden Länder in tropischen und subtropischen Breiten viel stärker vom Klimawandel betroffen sein als solche in gemäßigten und polaren Breiten. Dies ist eine grobe „Klima-Ungerechtigkeit“, denn obwohl die armen Entwicklungsländer im Globalen Süden (d. h. hauptsächlich die in Afrika, Asien und Lateinamerika) am wenigsten verantwortlich für die anthropogenen Treibhausgasemissionen sind, die den globalen Klimawandel verursachen, sind sie es, die am meisten unter dessen Auswirkungen leiden werden, die sich besonders in Bezug auf unerträgliche Temperaturen und verschlechternde Wasser- und Nahrungsmittelsicherheit bemerkbar machen werden (Abb. 1).

Deshalb wird es in vielen Regionen des Globalen Südens sehr schwierig sein, sich an den negativen Klimawandel anzupassen, während in einigen Gebieten eine Anpassung sogar unmöglich sein wird.

Wie dieses Buch erklärt, bereitet der Klimawandel durch den unvergleichlich größeren Schlag gegen den Süden als gegen den Norden sehr unterschiedliche Schicksale für den Süden und den Norden vor. In den kommenden Jahrzehnten werden die zunehmend schweren (in einigen Gebieten sogar katastrophalen) Auswirkungen des Klimawandels auf den armen und verwundbaren Globalen Süden ihn noch ärmer und instabiler machen, während der reiche Globale Norden noch reicher wird (da viele nördliche Wirtschaften sogar vom Klimawandel profitieren können). Das bedeutet, dass mit der Beschleunigung der globalen Erwärmung der Kontrast zwischen dem armen und instabilen Globalen Süden und dem reichen und sicheren Globalen Norden immer krasser wird. Dieser immer größer werdende



Abb. 1 Kein Essen, Turkana. Ost-Uganda. Credit: Rod Waddington. (Quelle: Flickr (unter CC BY-SA 2.0 Lizenz))

Kontrast wird der Haupttreiber für erzwungene Massenmigration vom Süden in den Norden sein – je schlechter die klimatischen, sozioökonomischen und sicherheitsrelevanten Bedingungen im Globalen Süden im Vergleich zum Globalen Norden sind, desto größer wird der Migrationsstrom von Süd nach Nord sein. Dieses Buch erklärt, warum diese massive Klimamigration vom Süden in den Norden bereits in den nächsten zwei Jahrzehnten beginnen könnte.

Wie gehen wir mit der bevorstehenden klimawandelbedingten sozioökonomischen und politischen Instabilität im Globalen Süden und der massiven, erzwungenen Migration in Richtung des Globalen Nordens um?

Wie können wir globale Destabilisierung und Chaos vermeiden?

Wie der Leser aus dem Buch erfahren wird, ist der einzige Weg, die globale Destabilisierung durch erzwungene Massenmigration zu vermeiden, die Welt um das Thema der geordneten Anpassung an den unvermeidlichen Klimawandel zu vereinen. Um eins zu werden, muss die Welt sich *ethisch* verändern, um gerechter, solidarischer und kooperativer zu werden. Gerechter und solidarischer, weil die Welt „Klimagerechtigkeit“ etablieren muss, um armen südlichen Ländern bei der Anpassung an den Klimawandel zu helfen, der durch die wirtschaftlichen Aktivitäten der reichen nördlichen Länder verursacht wird, und kooperativer, weil die Welt dringend eine enge Zusammenarbeit zwischen dem Westen und dem Osten benötigt, um die ständig wachsenden Migrationsströme aus dem Süden zu bewältigen. Nur eine solche *vereinte Welt wird in der Lage sein, die kommende Klimakrise und die daraus resultierende erzwungene Massenmigration ohne Abstieg ins Chaos zu überleben.*

Das Buch ist in sieben Kapitel unterteilt.

Das erste Kapitel betrachtet kurz die Anzeichen der globalen Erwärmung und erklärt, warum Menschen dafür verantwortlich sind.

Kap. 2 beschreibt, wie unser Klima in den kommenden Jahrzehnten des 21. Jahrhunderts aussehen wird. Insbesondere wird der Leser sehen, dass es bei der derzeit extrem hohen Rate des Klimawandels nur 10–20 Jahre dauern wird, bis unser Klimasystem zu den Bedingungen der mittleren Pliozän-Warmzeit zurückkehrt, die vor etwa 3,0–3,3 Mio. Jahren auftrat.

Sobald das Klima der Erde unter Bedingungen stabilisiert ist, die denen der mittleren Pliozän-Warmzeit ähnlich sind, wird es nur eine Frage der Zeit sein, bevor die Erde etwa die gleichen globalen Durchschnittstemperaturen (2–3 °C wärmer als jetzt) und Meeresspiegel (bis zu 25 Meter höher als heute) erreicht, wie sie während dieser vergangenen Warmzeit herrschten.

Darüber hinaus betrachtet Kap. 2 auch zukünftige Prognosen der globalen Erwärmung basierend auf verschiedenen Szenarien anthropogener Emissionen.

Kap. 3 beschreibt einige der wichtigsten positiven, selbstverstärkenden Klima-Rückkopplungen, wie Wasserdampf-Rückkopplung, Wolken-Rückkopplung, Eis- und Schnee-Albedo-Rückkopplungen und mehrere Kohlenstoffkreislauf-Rückkopplungen im Ozean und in der terrestrischen Biosphäre, und erklärt, warum ihre Aktivierung unsere laufende Klimakrise erheblich verschlimmern wird. Kap. 3 liefert auch Beweise dafür, dass diese gefährlichen Klima-Rückkopplungen bereits auftreten und die globale Erwärmung erheblich verschärfen.

Kap. 4 erklärt, warum die Menschheit, selbst in der hypothetischen Abwesenheit von positiven Klima-Rückkopplungen, die globale Erwärmung in den kommenden Jahrzehnten nicht stoppen könnte. Insbesondere erklärt dieses Kapitel, warum das jetzt sehr populäre „Netto-Null“-Konzept zur Beendigung der globalen Erwärmung nicht machbar ist. Es beschreibt auch, wie die Trägheit menschlicher sozioökonomischer und politischer Systeme die Welt daran hindert, die globalen Treibhausgasemissionen schnell zu reduzieren.

Kap. 5 erklärt, wie positive Klima-Rückkopplungen weitere globale Erwärmung verursachen werden, selbst wenn die anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen erheblich reduziert werden. Das Kapitel zeigt, dass positive Klima-Rückkopplungen erhebliche Erwärmung verursachen können, die in aktuellen Klimamodellen nicht vollständig berücksichtigt wird.

Kap. 6 erklärt, warum Anpassung entscheidend sein wird, weil die Menschheit nicht in der Lage sein wird, die weitere globale Erwärmung und

den Klimawandel in absehbarer Zeit zu stoppen. Der Leser wird auch sehen, dass in einigen Regionen des Globalen Südens die Anpassung sehr problematisch sein wird, und in einigen Gebieten unmöglich.

Und schließlich präsentiert Kap. 7 eine düstere Prognose für die kommenden Jahrzehnte – klimabedingte Destabilisierung des Globalen Südens könnte zu globaler Destabilisierung durch erzwungene Massenmigration vom Süden in den Norden führen. Die Welt kann nur Chaos vermeiden, wenn sie sich angesichts einer drohenden Klimakrise um die Herausforderung der geordneten Anpassung an den negativen Klimawandel vereint. Aber um vereint zu werden, muss die Welt sich ethisch verändern, um gerechter, solidarischer und kooperativer zu werden.

Die Zukunft wird zeigen, ob die Welt Zeit haben wird, sich zu reformieren, bevor erzwungene massive Migration vom Süden in den Norden zu einer globalen Katastrophe führt. Wir wissen, dass ohne diese Art von Transformation eine echte Anpassung unmöglich sein wird und zum Klimawandel führen wird, der die ganze Welt destabilisiert, also hoffen wir, dass wir zusammenkommen können, um dies zu vermeiden, bevor es wirklich zu spät ist.

Danksagung

Dieses Buch wäre ohne das Wissen, das ich während meiner Karriere als Klimawissenschaftler an den Universitäten in drei verschiedenen Ländern – der Staatlichen Universität St. Petersburg in Russland, der Freien Universität Berlin in Deutschland und der University of Arizona in den Vereinigten Staaten – erworben habe, nicht möglich gewesen. Ich möchte daher zunächst meinen ehemaligen Kollegen an diesen Institutionen – Prof. Dr. Oleg Drozdov, Prof. Dr. Karin Labitzke und Dr. Lon Hood – danken, die ihr Wissen über Wissenschaft mit mir geteilt und mir nicht nur beigebracht haben, wie man Fakten analysiert, sondern auch, wie man über sie hinaus sieht.

Ich bin äußerst dankbar für die wissenschaftliche Redaktion des Buches durch Dr. Anita Zavodskaya von der Barry University in den Vereinigten Staaten, für ihre gründliche und durchdachte Überprüfung des gesamten Buches und Diskussion vieler wichtiger Aspekte davon, die das Endprodukt erheblich verbessert haben.

Ich schätze die Zeit, die Dr. Eugene Rozanov von der ETH Zürich, Schweiz, und Dr. Irina Gorodetskaya von der Universität Aveiro, Portugal, dem Lesen der Abschnitte gewidmet haben, die die Auswirkungen von sich selbst verstärkenden Rückkopplungen auf das Klima beschreiben. Ihre Kommentare halfen, den Text zu verbessern. Zusätzlicher Dank geht an Dr. Mark Zelinka vom Lawrence Livermore National Laboratory in den Vereinigten Staaten für seine nützlichen Einblicke in die Auswirkung der Wolkenrückkopplung auf das Klima.

Es hat mich über zwei Jahre gekostet, dieses Buch zu schreiben, daher gilt zusätzlicher Dank meinen Verwandten und Freunden, einschließlich Svetlana Koudria, Julia Afanasyeva, Sandy Cohen und Rajeev Wankar, für die notwendige moralische Unterstützung auf der langen Reise.

Ich bin meinen Eltern zu Dank verpflichtet für ihren unerschütterlichen Glauben an mich. Ich würde heute kein Schriftsteller sein, wenn es nicht die Führung und Weisheit meiner Mutter Tatiana Soukhareva gäbe, die selbst unsere Familienautorin ist, und die in meiner fernen Kindheit vor mehr als 50 Jahren sagte, dass sie glaubte, ich würde eines Tages Schriftsteller werden.

Schließlich bin ich meinen lieben Kindern, Alexey und Anna, für ihre grenzenlose Unterstützung und Begeisterung sehr dankbar, sie haben Teile des Buches gelesen und bei der Gestaltung und den Illustrationen geholfen. Sie und ihre Kinder, meine Enkelkinder Piotr und Ania, werden lernen müssen, in einem neuen, viel weniger günstigen Klima zu leben. Dieses Buch ist für sie und für alle jungen Menschen in der Welt, denn es sind die jungen Menschen, die den Willen und die Kraft finden müssen, vorausgesetzt, sie haben die Macht, unsere Welt in eine gerechtere, solidaritätsbasierte und kooperative Gesellschaft zu verwandeln, um die schlimmsten Auswirkungen der bevorstehenden Klimakrise zu vermeiden.

Inhaltsverzeichnis

DANKSAGUNG	XIII
1 ANZEICHEN DER GLOBALEN ERWÄRMUNG UND KLIMAWANDEL SIND ÜBERALL ZU SEHEN	1
1.1 Die beispiellose Rate der globalen Erwärmung und des Klimawandels	2
1.1.1 Die globale Oberflächentemperatur steigt rapide an	2
1.1.2 Extreme Hitzewellen werden noch extremer	7
1.1.3 Dürren werden häufiger und schwerwiegender	12
1.1.4 Die Ozeane werden wärmer	17
1.1.5 Der globale Meeresspiegel steigt	19
1.1.6 Durch Kohlenstoff verschmutzte Meere werden saurer und haben weniger Sauerstoff	22
1.2 Wie wissen wir, dass der Mensch für die globale Erwärmung und den Klimawandel verantwortlich ist, den wir beobachten?	27
2 WIE WIRD UNSER KLIMA FÜR DEN REST DES 21. JAHRHUNDERTS SEIN?	33
2.1 Nochmals Willkommen im Klima der Warmzeit des Mittleren Pliozäns: eine Lektion für unsere nahe Zukunft aus unserer fernen Vergangenheit	34
2.2 Zukünftige globale Erwärmungsprognosen basierend auf verschiedenen Szenarien anthropogener Emissionen	42

2.2.1	Haupt-Szenarien zukünftiger Treibhausgasemissionen	42
2.2.2	Prognosen der globalen Durchschnittstemperatur unter den verschiedenen zukünftigen Emissionsszenarien	48
3	WIE POSITIVE KLIMARÜCKKOPPLUNGEN DIE GLOBALE ERWÄRMUNG VERSTÄRKEN	53
3.1	Was sind positive Klimarückkopplungen und warum sind sie so schlecht?	54
3.1.1	Positive Wasserdampf-Klimarückkopplung: Die Menge an Wasserdampf in der Atmosphäre nimmt zu, was zu einem stärkeren Treibhauseffekt führt	56
3.1.2	Positive Eis-Albedo-Klimarückkopplung: Die Eisdecke des Polarmeeres schrumpft, was dazu führt, dass die Arktis mehr Sonnenlicht absorbiert	59
3.1.3	Positive Schnee-Albedo-Klimarückkopplung: Die Schneedecke nimmt weltweit ab, was dazu führt, dass die Landoberfläche mehr einfallende Sonnenstrahlung absorbiert	61
3.1.4	Positive Wolken-Klimarückkopplung: durch das Klima bedingte Veränderungen der Wolkendecke verstärken die globale Erwärmung	64
3.1.5	Positive Klimarückkopplungen in den Ozeanen: Die Ozeane erwärmen sich und werden saurer und stärker geschichtet, was zu einer schwächeren Kohlenstoffaufnahme aus der Atmosphäre führt	67
3.1.6	Positive Rückkopplung von Waldbränden auf das Klima: Waldbrände nehmen weltweit in Häufigkeit und Schwere zu, was zu erhöhten Kohlenstoffemissionen und schwächerer Kohlenstoffaufnahme durch Wälder führt	74
3.1.7	Positive Klimarückkopplungen in borealen Wäldern: Boreale Wälder verlieren ihre Fähigkeit, Kohlenstoff aus der Atmosphäre zu binden	78

3.1.8	Positive Dürre-Entwaldung-Klimarückkopplung im Amazonas: Ein degradierender Amazonas-Regenwald wird von den „grünen Lungen des Planeten“ zu einem Beitrag zur globalen Erwärmung umgewandelt	86
3.1.9	Positive Permafrost-Kohlenstoff-Klimarückkopplung: Kohlenstoffemissionen aus tauendem Permafrost nehmen zu	91
3.1.10	Positive Klimarückkopplung durch Methanhydrat: Methanemissionen von destabilisierten Methanhydraten auf dem Meeresboden nehmen zu	96
3.2	Je schlimmer es wird, desto schlimmer wird es: Wie positive Klimarückkopplungen die Arktis in eine Todes-Spirale treiben	101
3.3	Wie positive Klimarückkopplungen die Erde in einen „Treibhaus“-Zustand versetzen können	114
4	WARUM DIE MENSCHHEIT DIE GLOBALE ERWÄRMUNG IN DEN KOMMENDEN JAHRZEHNTE NICHT STOPPEN KÖNNTE, SELBST WENN ES KEINE KLIMARÜCKKOPPLUNGEN GÄBE	123
4.1	Angenommen, die weitere Erwärmung hängt nur von zusätzlichen anthropogenen Emissionen ab, was würde passieren, wenn die Menschheit die Emission von Treibhausgasen reduzieren oder sogar stoppen würde?	124
4.1.1	Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre <i>vs</i> Treibhausgasemissionen	125
4.1.2	Vergangene anthropogene Emissionen und die Rolle der thermischen Trägheit der Ozeane	127
4.1.3	Wie würde sich die globale Temperatur in einer hypothetischen Welt ohne Emissionen ändern?	130
4.1.4	Wenn null Emissionen unplausibel sind, können Netto-Null-Emissionen helfen?	136
4.1.5	Warum wird das Konzept der Netto-Null-Emissionen die globale Erwärmung nicht stoppen können?	145

4.2	Was hindert Menschen daran, Treibhausgasemissionen schnell zu reduzieren?	155
4.2.1	Das globale Bevölkerungswachstum erhöht die Nachfrage nach fossilen Brennstoffen	156
4.2.2	Trägheit im menschlichen sozioökonomischen System verzögert die Klimaschutzmaßnahmen	163
4.2.3	Trägheit im menschlichen politischen System als Beispiel für „Die Tragödie der Allmende“ bei der Minderung des Klimawandels	171
5	DIE NATUR SCHLÄGT ZURÜCK: SELBST WENN MENSCHENGEMACHTE EMISSIONEN REDUZIERT WERDEN, WERDEN POSITIVE KLIMARÜCKKOPPLUNGEN ZU WEITERER ERWÄRMUNG FÜHREN	189
5.1	Positive Klimarückkopplungen und die Entwicklung der anthropogenen globalen Erwärmung	191
5.2	Wie viel zusätzliche Erwärmung können positive Klimarückkopplungen verursachen?	201
5.2.1	Zusätzliche Erwärmung durch die positive Klimarückkopplung von Wasserdampf	203
5.2.2	Zusätzliche Erwärmung durch die positiven Klimarückkopplungen im Zusammenhang mit Meer und Landflächen und Eisschichten	206
5.2.3	Zusätzliche Erwärmung durch die Rückkopplungen von Permafrost-Kohlenstoff und Methanclathrat	213
5.2.4	Zusätzliche Erwärmung durch das Absterben der Amazonas- und borealen Wälder	223
5.3	Zusätzliche Erwärmung durch positive Klimarückkopplungen wird zukünftige Temperaturen in Richtung des oberen Endes der Erwärmungsprognosen treiben	228
5.4	Das endgültige Urteil für das Klima: Positive Klimarückkopplungen haben begonnen die Energieungleichgewicht der Erde zu beschleunigen, was eine weitere Erwärmung unvermeidlich macht	240
5.4.1	Wie schnell nimmt das Energieungleichgewicht der Erde zu?	242

5.4.2	Auswirkungen des wachsenden Energieungleichgewichts der Erde auf das zukünftige Klima	243
5.4.3	Wie positive Klimarückkopplungen das Energieungleichgewicht der Erde beschleunigen	245
5.4.4	Die Reduzierung der Luftverschmutzung wird das Energieungleichgewicht der Erde zusätzlich beschleunigen und noch höhere Raten der globalen Erwärmung unvermeidlich machen	251
6	DIE UNVERMEIDBARKEIT WEITERER ERWÄRMUNG BEDEUTET, DASS ANPASSUNG ENTSCHEIDEND IST, ABER WIRD DER GLOBALE SÜDEN SICH ANPASSEN KÖNNEN?	259
6.1	Die bittere Wahrheit über eine angenehme Lüge zu akzeptieren ist entscheidend – die Menschheit wird nicht in der Lage sein, die weitere globale Erwärmung und den Klimawandel zu stoppen in absehbarer Zeit. Anpassung wird von entscheidender Bedeutung sein	261
6.2	Warum wird es für den Globalen Süden sehr schwierig sein, sich an den Klimawandel anzupassen?	270
6.2.1	Der Globale Süden: Rasch zunehmender Hitzestress wird für den Menschen unerträglich werden	272
6.2.2	Der Globale Süden: Eine große Wasserkrise steht bevor	285
6.2.3	Der Globale Süden: Klimawandel und Bevölkerungswachstum werden zu einer Lebensmittelkrise führen	296
7	WIRD DIE WELT IN DER LAGE SEIN, GLOBALE DESTABILISIERUNG ZU VERMEIDEN, WENN DIE UNVERMEIDBARE ERZWUNGENE MASSENMIGRATION VOM SÜDEN IN DEN NORDEN BEGINNT?	313
7.1	Die Anpassung an den Klimawandel durch erzwungene Massenmigration aus dem Globalen Süden wird die größte Herausforderung der Menschheit im 21. Jahrhundert sein	314

7.2	Wann könnte die erzwungene Massenmigration vom Globalen Süden in den Globalen Norden beginnen?	335
7.3	Eine düstere Prognose für die kommenden Jahrzehnte – In den kommenden Jahrzehnten, könnte die klimabedingte Destabilisierung des Globalen Südens zu globaler Destabilisierung durch erzwungene Massenmigration führen	351
7.4	Kann die Menschheit eine durch den Klimawandel verursachte globale Destabilisierung vermeiden? Ja, aber nur wenn sie vereint ist	360
7.4.1	Klimagerechtigkeit in Bezug auf arme Entwicklungsländer im Globalen Süden	366
7.4.2	Die Welt hat keine andere Wahl, als sich um die Herausforderung zu vereinen, globales Chaos aufgrund unvermeidlicher negativer Klimaveränderungen zu verhindern	369
Schlussfolgerung		377
Literatur		387

1

ANZEICHEN DER GLOBALEN ERWÄRMUNG UND KLIMAWANDEL SIND ÜBERALL ZU SEHEN

Wenn wir von globaler Erwärmung sprechen, meinen wir einen stetigen und konstanten Anstieg der globalen Oberflächentemperatur der Erde (ein Durchschnitt aus Meeresoberflächen- und Luft-über-Land-Temperaturen) über viele Jahre, Jahrzehnte und sogar Jahrhunderte. Da die Temperatur eine Schlüsselvariable des Klimas ist, ist die globale Erwärmung einer der wichtigsten Aspekte des Phänomens des globalen Klimawandels, das nicht nur Temperaturänderungen, sondern viele andere Effekte umfasst, die aus der globalen Erwärmung resultieren, wie Gletscherschmelze, Meeresspiegelanstieg und Veränderungen in einigen extremen Klimaereignismustern.

„Die Erwärmung des Klimasystems ist eindeutig, und seit den 1950er Jahren sind viele der beobachteten Veränderungen über Jahrzehnte bis Jahrtausende hinweg beipielllos.“

– United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [1]

1.1 Die beispiellose Rate der globalen Erwärmung und des Klimawandels

1.1.1 Die globale Oberflächentemperatur steigt rapide an

Können wir mit absoluter Sicherheit sagen, dass die globale Erwärmung real ist und dass sich das Klima der Erde verändert? Ja, das können wir. Darüber hinaus ändert sich das Klima der Erde nicht nur, es ändert sich extrem schnell, viel schneller, tatsächlich, als es jemals in der Vergangenheit der Fall war. Wissenschaftliche Daten aus Baumringen und Eisbohrkernen zeigen, dass der jüngste Anstieg der globalen Oberflächentemperatur im Vergleich zum früheren Klimawandel beispiellos schnell ist.

Das Diagramm der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) in Abb. 1.1 zeigt, wie signifikant die globale Oberflächentemperatur in den letzten 143 Jahren, von 1880 bis 2023, gestiegen ist.

In Abb. 1.1 zeigt die schwarze durchgezogene Trendlinie, dass im Durchschnitt zwischen 1880 und 2023 die globale Oberflächentemperatur um fast 1,2 Grad Celsius ($^{\circ}\text{C}$) gestiegen ist. Obwohl während dieses 143-jährigen Zeitraums die durchschnittliche Rate der globalen Erwärmung nur $+0,08^{\circ}\text{C}$

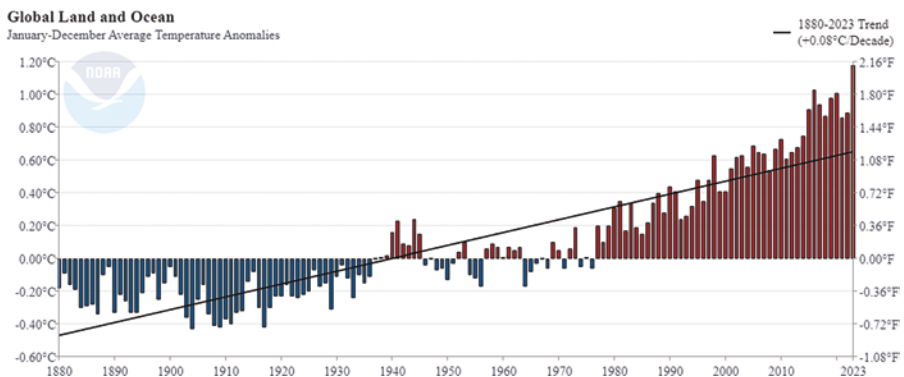


Abb. 1.1 Jährliche globale Oberflächentemperaturanomalien, von 1880 bis 2023. Anomalien werden berechnet in Bezug auf den Durchschnitt im 20. Jahrhundert. Die schwarze durchgezogene Linie bezeichnet einen linearen Trend in der globalen Temperatur (d. h., sie bezeichnet die allgemeine Richtung, in die sich die globale Temperatur verändert). (Quelle: NOAA National Centers for Environmental Information, Climate at a Glance: Global Time Series, veröffentlicht im Mai 2024, abgerufen am 31. Mai, 2024 von <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/global/time-series>)

pro Jahrzehnt betrug, hat sich die Erwärmungsrate in den letzten Jahrzehnten viel stärker erhöht als zuvor: Allein in den letzten 50 Jahren ist die globale Durchschnittstemperatur fast doppelt so schnell gestiegen. Das letzte Jahrzehnt (2011–2020) war das heißeste Jahrzehnt, das jemals aufgezeichnet wurde, und sendet ein deutliches Warnsignal an die Menschheit. Wie in Abb. 1.1 zu sehen ist, stechen die Jahre 2016, 2019, 2020 und 2023 durch ihre außergewöhnliche Wärme hervor.

Während Abb. 1.1 Veränderungen in der Oberflächentemperatur, gemittelt über den Globus, zeigt, ist es wichtig zu erkennen, dass die Erde nicht gleichmäßig erwärmt wird – die Lufttemperaturen über Land steigen viel schneller an als die Lufttemperaturen über dem Ozean. Daten von NOAAs National Centers for Environmental Information zeigen, dass die Luft über den Kontinenten der Welt doppelt so schnell erwärmt wird wie die Luft über den Ozeanen der Welt – zwischen 1880 und 2023 stieg die globale Landoberflächenlufttemperatur um etwa 1,6 °C, während die globale Meeresoberflächentemperatur nur um etwa 0,8 °C anstieg. Dieser Kontrast zwischen den Erwärmungsraten über Land und Ozean hat wichtige Auswirkungen für den Menschen, weil wir auf dem Land leben.

Der interessierte Leser mag sich fragen, warum die Temperaturen über Land viel schneller ansteigen als die Temperaturen über den Ozeanen. Einer der Gründe ist, dass die Ozeane eine viel größere Wärmekapazität haben als das Land, was bedeutet, dass die Ozeane mehr Wärme und mehr Zeit benötigt, um ihre Temperatur signifikant zu erhöhen. Ein weiterer Grund ist, dass die Verdunstung von Wasser aus den Ozeanen eine kühlende Wirkung auf die Ozeanoberfläche hat (Verdunstung verursacht Kühlung, weil dieser Prozess Wärmeenergie benötigt). Im Gegensatz zu den Ozeanen haben die Kontinente nicht viel Feuchtigkeit zum Verdunsten, und so sind Verdunstung und die entsprechende Abkühlung eingeschränkt. Während daher über den Ozeanen ein Teil der globalen Erwärmung in die Verdunstung geht, geht auf den Kontinenten viel mehr der globalen Erwärmung direkt in Temperaturerhöhung.

Eine wichtige Schlussfolgerung aus diesem Land-Ozean-Kontrast der globalen Erwärmung ist, dass bei Fortsetzung der globalen Erwärmung die Kontinente – wo Menschen leben – erwartet wird, dass sie sich viel mehr erwärmen als nur durch den globalen Durchschnitt.

Betrachtet man Abb. 1.1, die zeigt, dass seit dem Ende des 19. Jahrhunderts die globale Oberflächentemperatur um fast 1,2 °C gestiegen ist, könnten einige Leser fragen: Warum ist diese Änderung der globalen Temperatur ein Anliegen, wenn eine globale Erwärmung von 1,2 °C so klein erscheint?

Nun, zunächst einmal muss man sich daran erinnern, dass die $1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ Erwärmung nur eine durchschnittliche Schätzung der globalen Erwärmung ist und wie oben erwähnt, ist die Erwärmung über den Kontinenten höher als der globale Durchschnitt, der bereits etwa $1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ über den vorindustriellen Werten liegt. Außerdem erleben selbst auf den Kontinenten einige Regionen der Welt eine viel höhere Erwärmung als nur den Durchschnitt. Zum Beispiel hat sich die Arktis in den letzten Jahrzehnten mehr als 2–3-mal schneller erwärmt als der Rest der Welt – Wissenschaftler nennen dieses Phänomen die *Arktische Amplifikation*. Im Allgemeinen erwärmen sich polare und gemäßigte Breiten schneller als die Tropen, und Temperaturen über der Landoberfläche steigen viel mehr als Temperaturen über dem Ozean.

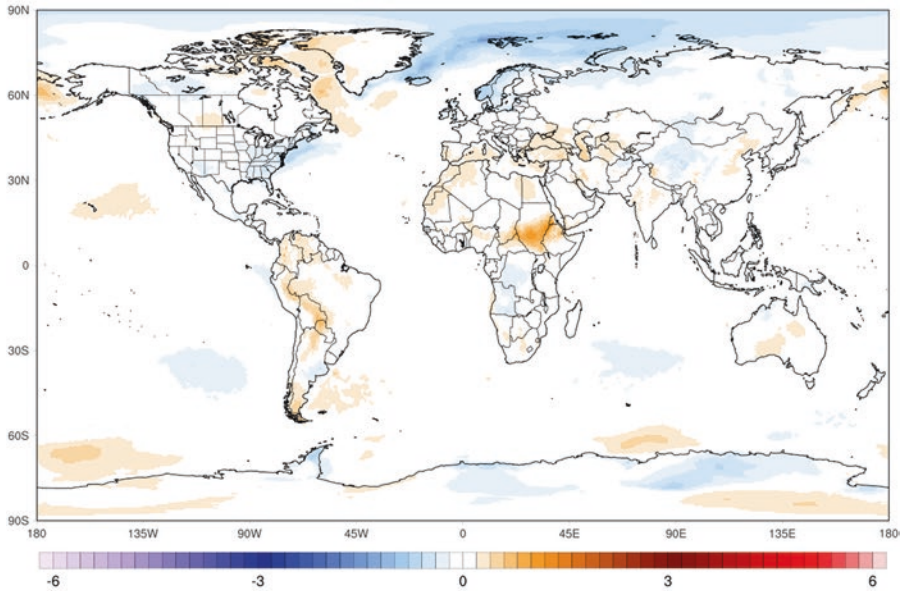
Zusätzlich müssen wir verstehen, dass eine scheinbar kleine Menge an globaler Erwärmung wirklich große Temperaturänderungen an einem bestimmten Ort widerspiegelt. Stellen Sie sich einen bestimmten Ort auf der Erde vor, wo tägliche Temperaturschwankungen während verschiedener Wetterereignisse in der Größenordnung von bis zu zehn Grad sein können. Wenn alle Messungen von täglichen Höchst- und Mindesttemperaturen von vielen Tausenden von Orten auf der ganzen Welt über ein Jahr gemittelt werden, dann schwankt die daraus resultierende einzelne Schätzung der globalen jährlichen Durchschnittstemperatur in der Regel nicht mehr als ein paar Hundertstel bis zwei Zehntel eines Grades von Jahr zu Jahr. Wenn eine solche global und jährlich gemittelte Temperatur um $1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ gestiegen ist, dann deutet dies auf eine wirklich erhebliche Erwärmung an Tausenden von spezifischen Orten auf der Erde hin. Dies wird gut in Abb. 1.2 veranschaulicht, die jährliche mittlere Oberflächentemperaturanomalien (bezogen auf den Durchschnitt von 1950–1980) im Zeitraum 1960–1970 und 50 Jahre später, im Zeitraum 2010–2020 zeigt.

Betrachtet man diese Abbildung, kann der Leser einen auffälligen Unterschied zwischen den Temperaturkarten sehen. Obwohl sie nur 50 Jahre auseinander liegen, sieht es so aus, als würden sie zwei völlig verschiedene Welten repräsentieren: eine kalte Welt mit großen Bereichen negativer Temperaturanomalien im Zeitraum 1960–1970 und eine viel wärmere Welt mit Bereichen von überwiegend positiven Temperaturanomalien im Zeitraum 2010–2020.

Dieser einfache Vergleich der beiden Temperaturkarten zeigt, wie bemerkenswert wärmer das Klima der Erde innerhalb von nur 50 Jahren geworden ist. Egal in welchem Land der Leser lebt, er oder sie muss sicherlich bereits einen großen Kontrast zwischen dem Klima der Kindheit und jetzt bemerkt haben. Es sieht so aus, als ob das Klima sich gerade vor unseren

TEMPERATURE ANOMALY RELATIVE TO THE 1950-1980 AVERAGE

1960-1970 time period



2010-2020 time period

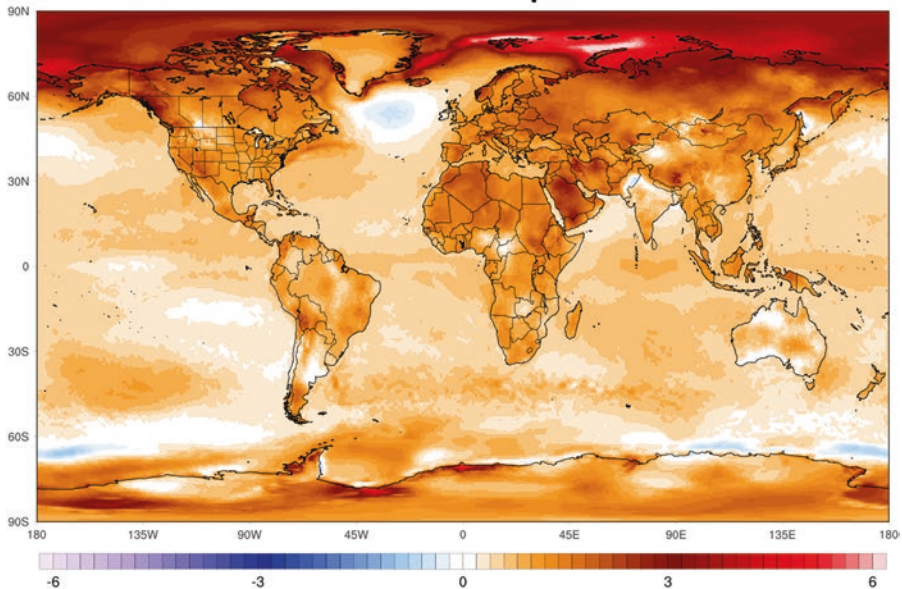


Abb. 1.2 Durchschnittliche Oberflächentemperatur-Jahresanomalie (in Grad Celsius), relativ zum Durchschnitt von 1950–1980: im Zeitraum 1960–1970 (oberes Panel) und fünfzig Jahre später, im Zeitraum 2010–2020 (unteres Panel). Basierend auf den Daten des ECMWF ERA5-Datensatzes. (Bilder von Climate Reanalyzer (<https://Climate-Reanalyzer.org>), Climate Change Institute, University of Maine, U.S.A. Veröffentlicht mit Genehmigung von Climate Reanalyzer)

Augen schnell verändert. Jeder und jede von uns sieht das, weil wir uns an das Klima aus unserer Kindheit erinnern und sehen, was jetzt passiert.

Der auffällige Unterschied zwischen den globalen Temperaturkarten in den Zeiträumen 1960–1970 und 2010–2020, der in Abb. 1.2 gezeigt wird, ist nicht verursacht durch eine ungewöhnliche natürliche Variabilität der globalen Temperatur in diesen beiden bestimmten Zeiträumen, sondern durch den unaufhaltsamen Anstieg der Oberflächentemperatur auf der ganzen Welt in den letzten Jahrzehnten. Die durchschnittlichen Jahrestemperaturen sind fast überall auf der Welt gestiegen, mit dem höchsten Anstieg in der Arktis (Erwärmung von 3 auf 6 °C) und in Europa, Nordafrika, dem Nahen Osten, den Vereinigten Staaten und Russland (Erwärmung von 1,5 auf 3 °C).

2020 war ein besonders warmes Jahr. Laut dem Bericht des Klimaüberwachungsdienstes der Europäischen Union [2], war im Jahr 2020 die durchschnittliche Oberflächentemperatur Europas etwa 2,2 °C über dem vorindustriellen Niveau und fast ein halber Grad über 2019, dem vorherigen Rekordjahr. Besonders spektakulär war im Jahr 2020 die Erwärmung der Arktis, mit Teilen von Nordsibirien und Teilen der Arktis selbst fast 7 °C über den Werten des mittleren 19. Jahrhunderts. [2].

Daher mag die durchschnittliche globale Erwärmungsrate – etwa 1,2 °C seit dem vorindustriellen Niveau – bescheiden erscheinen, sie ist in Wirklichkeit jedoch alles andere als das, da die beobachtete Erwärmungsrate in einigen spezifischen Regionen sehr erheblich ist. Darüber hinaus ist es wichtig zu beachten, dass die globale Erwärmung beschleunigt, was bedeutet, dass es weniger Zeit braucht, um neue Höchstwerte zu erreichen. In dieser Situation sind selbst Zehntelgrade zusätzlicher globaler Erwärmung wirklich wichtig für unser Klima und für die Menschheit. Mit kontinuierlich steigenden Treibhausgasemissionen (Wenn fossile Brennstoffe [Erdöl, Kohle, Erdgas und synthetische Brennstoffe] in der Luft verbrannt werden, wird der darin gespeicherte Kohlenstoff in Kohlendioxid umgewandelt, das aufgrund seiner Fähigkeit, Wärmestrahlung zu absorbieren, als „Treibhausgas“ bezeichnet wird. Menschen produzieren auch andere Treibhausgase durch verschiedene Aktivitäten.) ist die Menschheit definitiv auf dem Weg zu einer Erwärmung von 1,5 °C über dem vorindustriellen Niveau schon in den 2030er Jahren. Wenn die Rate der globalen Erwärmung so bleibt wie sie jetzt ist, wird sich die menschliche Zivilisation innerhalb von nur weiteren 15 bis 20 Jahren in einer Welt wiederfinden, die 2 °C wärmer ist, wo das Land zwei bis drei Mal wärmer sein kann als die durchschnittliche globale Erwärmung, die Arktis kann bis zu vier Mal wärmer sein (vielleicht mehr als 8 °C), und die Sommertemperaturen in

einigen Gebieten Asiens, des Nahen Ostens und Afrikas können so heiß werden, dass sie die physiologische Schwelle für die Anpassungsfähigkeit des Menschen überschreiten.

Schon jetzt geht die beschleunigte globale Erwärmung einher mit einer deutlichen Zunahme der Häufigkeit und Intensität von extremen Hitzewellen, tödlichen Dürren, Überschwemmungen und Stürmen. Zum Beispiel erlebte man 2020 eine Rekordzahl an Hurrikanen im Atlantik – so viele, dass der Weltorganisation für Meteorologie (World Meteorological Organization, WMO) sogar die Buchstaben im Alphabet ausgingen, um sie zu benennen. [2]

1.1.2 Extreme Hitzewellen werden noch extremer

Die globale Erwärmung erhöht die Durchschnittstemperatur der Erdatmosphäre. Aufgrund dessen haben in den letzten Jahrzehnten steigende Durchschnittstemperaturen extreme Wetterereignisse wie tödliche Hitzewellen weltweit erheblich verschlimmert. Ein jüngstes Beispiel für eine solche extreme Hitzewelle, die Europa am 24. Juli 2019 traf, ist in Abb. 1.3 dargestellt.

Diese extrem starke Hitzewelle war eine von zwei ausgeprägten europäischen Hitzewellen, die im Sommer 2019 (im Juni und dann im Juli) auftraten, die Allzeithitzerekorde in Belgien, Deutschland, Luxemburg, den Niederlanden und dem Vereinigten Königreich aufstellten. [3].

Die Hitzewelle im Juni 2019 übertraf die vorherigen Rekorde um 3 °C in Belgien, um 0,3 °C in Luxemburg, um 2,1 °C in Deutschland und den Niederlanden, und um 0,2 °C im Vereinigten Königreich. Frankreich erlebte Temperaturen über 45 °C zum ersten Mal in der aufgezeichneten Geschichte. [4] Diese erste tödliche Hitzewelle tötete über 500 Menschen. Ende Juli 2019 führte die zweite Hitzewelle zum Tod von mehr als 800 Menschen in Frankreich sowie tausenden von Tieren, als die Belüftungssysteme überlastet waren. [5]

Ein weiteres relevantes Beispiel, das zeigt, dass der steigende Trend extremer Hitzewellen zu einem globalen Problem wird, ist der sehr dicht besiedelte Staat Kalifornien in den Vereinigten Staaten. Anfang September 2020 brach eine schwere Hitzewelle Temperaturrekorde in mehreren Gebieten Südkaliforniens. Die heißen Bedingungen trugen zu neuen und bereits bestehenden Bränden bei, die Zehntausende von Hektar Land zerstörten. Die Karte in Abb. 1.4 zeigt die Lufttemperaturen in den Vereinigten Staaten am 6. September 2020, als der Südwesten eine dramatische Hitzewelle erlebte.

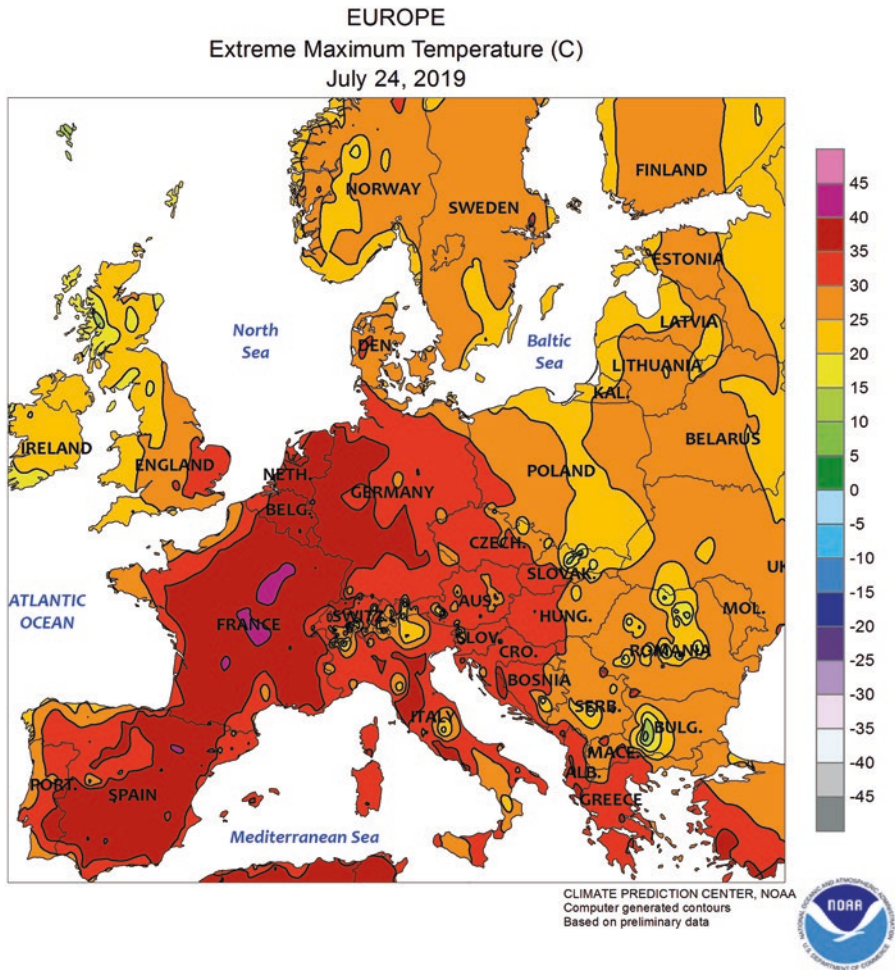


Abb. 1.3 Extreme Höchsttemperatur in Europa (°C) am 24. Juli 2019. (Nachweis: Climate Prediction Center, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Quelle: Wikimedia Commons/Public Domain)

Am 6. September 2020 registrierte das Los Angeles County seine höchste Temperatur aller Zeiten von 49 °C in Woodland Hills. Mehrere andere Städte, wie Paso Robles und Palmdale, erreichten ebenfalls Rekordhöhen.[6] Dieses extreme Hitzeereignis kam nur wenige Wochen nach einer weiteren rekordbrechenden Hitzewelle in Kalifornien. Im August 2020 erreichte das Death Valley 54 °C – möglicherweise die höchste jemals auf der Erde gemessene Temperatur.[6]

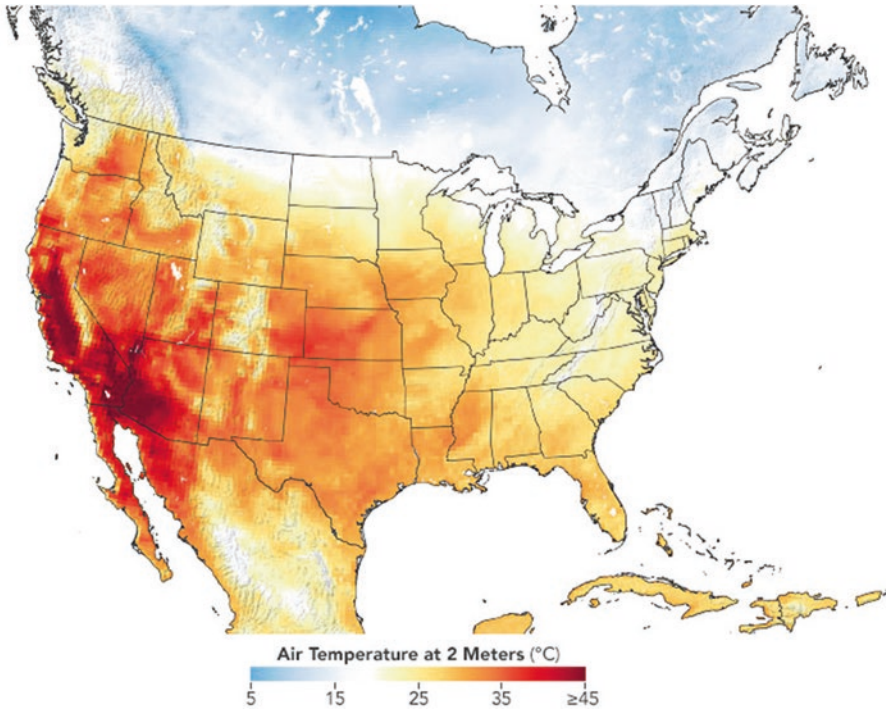


Abb. 1.4 Nahe Oberflächentemperaturen über den Vereinigten Staaten am 6. September 2020. (Quelle: NASA's (National Aeronautics and Space Administration's) Earth Observatory)

Obwohl die jüngsten extremen Hitzewellen auf der ganzen Welt neue Rekorde in ihrer Intensität brachen, sind sie für Klimatologen überhaupt nicht überraschend. Da die globalen Durchschnittstemperaturen steigen, werden extreme Hitzeereignisse wie die in den Abb. 1.3 und 1.4 dargestellten, voraussichtlich häufiger, intensiver und zerstörerischer werden. Sie werden größere Gebiete abdecken und länger andauern. Hitzeextreme werden noch extremer. Sie werden große negative Auswirkungen auf Gesellschaft, Wirtschaft, Ökosysteme und auf die menschliche Gesundheit haben, und sie können natürliche und menschliche Systeme viel mehr beeinflussen als das durchschnittliche Klima.[7]

Schon jetzt werden heiße Tage auf der ganzen Welt heißer und häufiger, während kalte Tage weniger kalt und seltener werden. In den kontinentalen Vereinigten Staaten sind in den letzten zehn Jahren tägliche Rekordtemperaturen doppelt so häufig aufgetreten wie Rekordtiefs, im Vergleich zu einem nahezu 1:1-Verhältnis in den 1950er Jahren.[8] In einer kürzlich

veröffentlichten Studie[9] in der Zeitschrift *Earth's Future*, eine Gruppe von Wissenschaftlern unter der Leitung von Dr. Glynn Hulley, einem Klimaforscher am Jet Propulsion Laboratory der NASA (National Aeronautics and Space Administration), zeigte, dass Hitzewellen in Kalifornien zwischen 1950 und 2020 häufiger, intensiver und länger anhaltend geworden sind (Abb. 1.5).

Der stärkste Anstieg der Hitzewellenaktivität wurde in Binnenstädten wie dem Los Angeles County festgestellt. Die Forscher vermuten, dass ein Hauptgrund für die Zunahme der Hitzewellen wärmere Nachttemperaturen sind. Die nächtlichen Temperaturen während Hitzewellen kombiniert mit hoher Luftfeuchtigkeit steigen seit den 1980er Jahren mit einer extrem hohen Rate von $\sim 1^\circ\text{C}/\text{Jahrzehnt}$, was das Hitzestress- und Sterberisiko für gefährdete städtische Gemeinschaften erhöht.

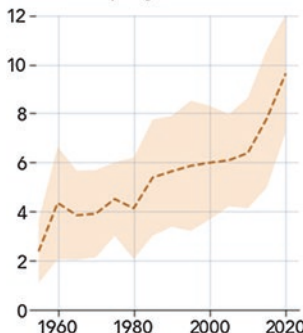
„Die Hitzewellen, die dazu führen, dass viele Menschen sterben, sind wirklich warme, feuchte Hitzewellen in der Nacht, und diese werden häufiger auftreten. Die Nacht ist normalerweise die Zeit, sich abzukühlen, doch ab jetzt gibt es weniger Erleichterung.“ [6]

- Dr. Brian Kahn, Wissenschaftler am Jet Propulsion Laboratory der NASA und Mitautor der Studie [9].

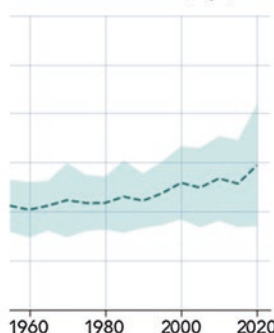
More, Longer, and Hotter

Heatwaves affecting inland, urban California are on the rise

Heatwaves per year



Heatwave duration (days)



Heatwave intensity ($^\circ\text{C}$)

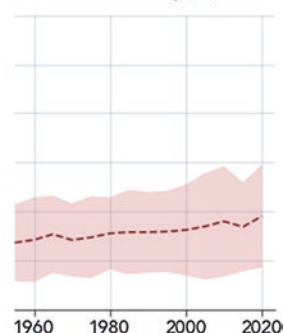


Abb. 1.5 Die Diagramme zeigen die Anzahl der Hitzewellen pro Jahr, die Dauer und die Intensität für Binnenstädte in Kalifornien von 1950 bis 2020. Die gestrichelten Linien repräsentieren die Durchschnittswerte. Die schattierten Bereiche zeigen die Standardabweichung. (Quelle: NASA's Earth Observatory)

Dr. Hulley und seine Kollegen zeigten auch[9], dass Hitzewellen in Südkalifornien nun früher auftreten und länger in das Jahr hinein andauern, was zu einer längeren Hitzewellensaison führt. Im Vergleich zur Mitte des 20. Jahrhunderts, als die Hitzewellensaison typischerweise im Mai begann und im August endete, beginnen Hitzewellen heute im März und enden erst im September bis Oktober.

Jetzt schauen wir uns Afrika an.

Afrika ist der Kontinent, der mehr als jeder andere den ungünstigen Folgen der globalen Erwärmung und des Klimawandels ausgesetzt ist. Abb. 1.6 veranschaulicht, wie sich das extreme Temperaturregime von Hitzewellen in Afrika in den letzten Jahren (1981–2015) verändert hat. Hitzewellen in dieser Abbildung wurden quantifiziert[10] mit dem *Heat Wave Magnitude Index daily (HWMId)*, der die Dauer und die Intensität von extremen Temperaturereignissen in einen einzigen numerischen Index zusammenfasst. Der *HWMId* ermöglicht einen Vergleich zwischen Hitzewellen zu unterschiedlichen Zeiten und Orten und wurde auf Höchsttemperaturrekorde angewendet.[10] Die in Abb. 1.6 dargestellten Ergebnisse haben sieben Karten, wobei jede Karte einen Zeitraum von 5 Jahren darstellt. In der ersten Karte, die dem

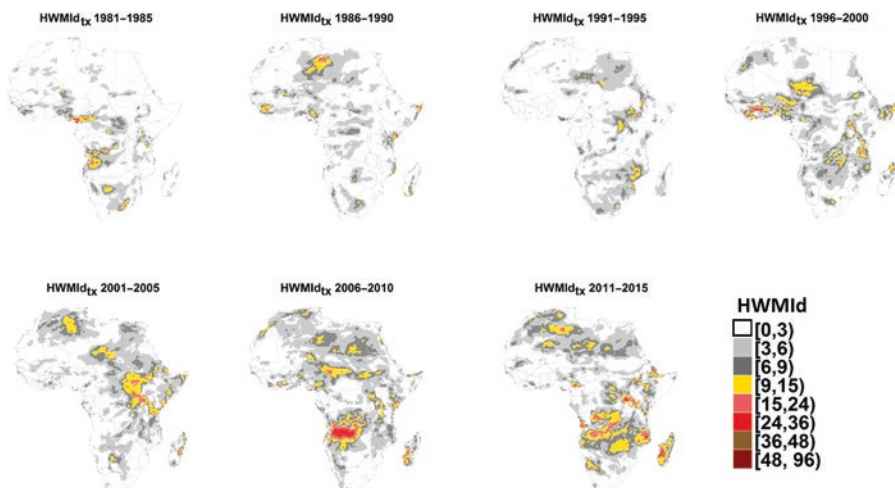


Abb. 1.6 Magnitude des Hitzewellenindex der Höchsttemperatur (HWMId_{tx}) für 5-Jahres-Zeiträume von 1981 bis 2015. Das Histogramm in der linken unteren Ecke zeigt die räumliche Verteilung der Magnitudenindexklassen für jeden 5-Jahres-Zeitraum. (Quelle: Abbildung 4 in: Ceccherini, G., Russo, S., Amezttoy, I., Marchese, A. F., und Carmona-Moreno, C.: Hitzewellen in Afrika 1981–2015, Beobachtungen und Reanalyse, Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions, 17, 115–125, 2017, <https://doi.org/10.5194/nhess-17> 115–2017. [10]; unter CC-BY 3.0 Lizenz)