

TEXTE

46/2024

Metaanalyse – Weltweite Lachgas/N₂O-Quellen

Bilanzierungen, Veränderungen, Berücksichtigung in
IPCC-Szenarien

von:

Susanne Schödel

Susanne Schödel GmbH, Wildberg-Sulz

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 46/2024

Projektnummer 180590

FB001427

Metaanalyse – Weltweite Lachgas/N₂O- Quellen

Bilanzierungen, Veränderungen, Berücksichtigung in
IPCC-Szenarien

von

Susanne Schödel

Susanne Schödel GmbH, Wildberg-Sulz

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Susanne Schödel
Susanne Schödel GmbH Environment Data
Ehinger 11
72218 Wildberg-Sulz

Abschlussdatum:

Februar 2024

Redaktion:

Fachgebiet V 1.1 Klimaschutz
Dr. Mathias Ulrich

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, März 2024

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin.

Kurzbeschreibung: Metaanalyse – Weltweite Lachgas/N₂O-Quellen

Das Umweltbundesamt hat eine grundlegende Analyse und Bewertung der Rolle überregionaler bis globaler sowie natürlicher und anthropogener Lachgasquellen im Klimasystem in Auftrag gegeben. Der vorliegende Bericht beschreibt dazu die Eigenschaften von Lachgas

(Distickstoffoxid, N₂O) als klimawirksamen Bestandteil der Erdatmosphäre und die unterschiedlichen Methoden zur Bilanzierung der Lachgasquellen und -senken. Die mengenmäßige Entwicklung verschiedener anthropogener sowie natürlicher Quellen wird sowohl global als auch regional geschildert und Optionen zur Minderung anthropogener Lachgasemissionen werden benannt.

Grundlage waren die aktuellen Sachstandsberichte des Weltklimarats, dort zitierte und weitere wissenschaftliche Literatur, sowie Informationen von relevanten internationalen Expert*innengruppen. Für die Bilanzierung der Lachgasemissionen wurde das „Globale N₂O-Budget“ des Global Carbon Project ausgewertet. Dieses Budget führt alle verfügbaren Daten für anthropogene und natürliche Emissionen auf globaler sowie regionaler Ebene strukturiert zusammen.

Lachgas hat, umgerechnet in CO₂-Äquivalente, einen Anteil von etwa fünf Prozent an allen anthropogenen Treibhausgasemissionen, aber ein fast dreihundertfaches globales Erwärmungspotential im Vergleich zu Kohlendioxid (CO₂). Seit 1980 sind die von Menschen verursachten Emissionen von Lachgas um fast 35 Prozent gestiegen. Hauptverursacher sind künstliche und tierische Stickstoffdünger in der Landwirtschaft sowie in der industriellen Fischzucht. Dies ist auch der wesentliche Faktor in der zunehmenden atmosphärischen Belastung durch Lachgas: Die weiteren direkten anthropogenen Quellen aus Industrie, fossilen Brennstoffen, der Verbrennung von Biomasse und Abwässern sowie die natürlichen Lachgasflüsse haben sich von 1980 bis 2020 in Summe nur geringfügig verändert. Regional betrachtet stiegen die Emissionen vor allem dort an, wo landwirtschaftliche Aktivitäten zugenommen haben; dazu zählen China und Südasien. Rückkopplungsmechanismen zum Beispiel durch den Klimawandel werden die Lachgasemissionen weiter forcieren.

Minderungsoptionen bestehen vor allem darin, Stickstoff in der Landwirtschaft effizienter einzusetzen und technische Möglichkeiten bei der Verbrennung von fossilen Brennstoffen und in der Industrie konsequent anzuwenden. Ein Teil der anthropogenen Emissionen wird jedoch weiterhin entstehen und muss durch verstärkte Reduzierung von CO₂- und Methanemissionen kompensiert werden.

Abstract: Meta-analysis - Global nitrous oxide/N₂O-sources: Inventories, trends, consideration in IPCC scenarios

The German Environment Agency has commissioned a thorough analysis and assessment of the transregional to global role of natural and anthropogenic sources of nitrous oxide (N₂O) within the climate system. This report describes the properties of nitrous oxide as a climate-relevant component of the earth's atmosphere and the different methods for the inventory of nitrous oxide sources and sinks. The quantified development of various anthropogenic and natural sources is described both globally and regionally, and options for reducing anthropogenic nitrous oxide emissions are outlined.

This work was based on the latest assessment reports of the Intergovernmental Panel on Climate Change, the scientific publications cited therein and additional scientific literature, as well as information from relevant international expert groups. The “Global N₂O Budget” of the Global Carbon Project was used to calculate nitrous oxide emissions. This budget consolidates in a systematic manner all available data for anthropogenic and natural emissions on a global and regional level.

Converted into CO₂ equivalents, nitrous oxide accounts for around five percent of all anthropogenic greenhouse gas emissions, but has nearly three hundred times the global warming potential of carbon dioxide (CO₂). Since 1980, man-made emissions of nitrous oxide have increased by almost 35 percent. The main causes are artificial and animal nitrogen fertilizers in agriculture and industrial aquaculture. This is also the main factor in the increasing atmospheric pollution caused by nitrous oxide: the other direct anthropogenic sources from industry, fossil fuels, the combustion of biomass and wastewater, as well as natural nitrous oxide fluxes, have changed only slightly overall between 1980 and 2020. From a regional perspective, emissions increased primarily in areas where agricultural activities have increased, including China and South Asia. Feedback mechanisms, for example due to climate change, will continue to drive up nitrous oxide emissions.

Emission reduction options consist primarily in using nitrogen more efficiently in agriculture and consistently applying technical possibilities for the combustion of fossil fuels and for the industrial sector. Some of the anthropogenic emissions will continue to be produced and must therefore be mitigated by reducing CO₂ and methane emissions.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	9
Tabellenverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis.....	11
Zusammenfassung	13
Summary	18
1 Vorgehensweise.....	22
2 N ₂ O als atmosphärisches Treibhausgas: Klimarelevanz und Entstehung.....	24
2.1 Bedeutung als Treibhausgas.....	24
2.2 Lachgas im natürlichen Stickstoffkreislauf der Erde	26
2.3 Anthropogene Quellen von Lachgas	27
2.4 Anthropogene Auswirkungen auf natürliche Lachgasflüsse	28
3 Bilanzierung der aktuellen und potenziellen N ₂ O-Quellen und -Senken	30
3.1 Vorbemerkung zu den Mengenangaben.....	30
3.2 Beschreibung von Prozessen	31
3.3 Lachgas im Verhältnis zu den weiteren anthropogenen Treibhausgasen.....	31
3.4 Vorbemerkung zu den Datenquellen	32
3.4.1 Bottom-up-Daten.....	33
3.4.1.1 Erdsystemmodelle.....	33
3.4.1.2 Nationale Treibhausgas-Inventare und deren Aggregierung auf internationaler Ebene.....	34
3.4.1.3 Einordnung der Bottom-up-Daten	37
3.4.2 Top-down-Daten	37
3.4.2.1 Einordnung der Top-down-Daten	38
3.5 Das Globale N ₂ O-Budget.....	38
3.5.1 Wesentliche Erkenntnisse	41
3.6 Regionale N ₂ O-Quellen und -Senken: Mengen und Trends	44
3.6.1 Direkte Emissionen aus Landwirtschaft und Aquakulturen	46
3.6.2 Direkte Emissionen aus fossilen Brennstoffen, Industrie, Abfällen und Abwässern sowie Biomasseverbrennung.....	47
3.6.3 Indirekte Emissionen.....	48
3.6.4 Gestörte Lachgasflüsse durch Veränderungen von Klima, CO ₂ -Gehalt und Landbedeckung.....	49
3.7 Natürliche Lachgasquellen.....	50

3.7.1	Überblick.....	50
3.7.2	Fließgewässer	51
3.8	Erkenntnisse zu Rückkopplungsmechanismen zwischen N ₂ O-Emissionen und Klimawandel	53
3.8.1	Modelle deuten auf Rückkopplung hin	53
3.8.2	Beispiele für Rückkopplungsmechanismen.....	53
3.9	Lachgasanteil in der Atmosphäre übersteigt bisherige Szenarien der Wissenschaft – zusätzliche Reduzierung von CO ₂ und Methan notwendig	56
4	Anthropogene N ₂ O-Emissionen und deren Eindämmung.....	59
4.1	Landwirtschaft einschließlich Aquakulturen	59
4.2	Verbrennung von Biomasse und Herstellung von Biokraftstoffen	62
4.3	Fossile Energieerzeugung sowie Industrie.....	63
4.4	Abwasser	64
4.5	Kosten und Potential von Minderungsmaßnahmen für Lachgas.....	65
4.5.1	Wesentliche Ergebnisse aus fünf Publikationen zu Grenzvermeidungskosten.....	66
5	Ausblick	68
6	Quellenverzeichnis	69
A	Anhang	74
A.1	Definition der 18 Regionen des Globalen N ₂ O-Budgets.....	74
B	Anhang	76
B.1	Tabellarische Darstellung des Globalen N ₂ O-Budgets	76
C	Anhang	79
C.1	Übersicht Daten und Modelle.....	79
D	Anhang	80
D.1	Unterteilung der Lachgasflüsse nach Quellen und Senken	80

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Zunahme von Lachgas in der Atmosphäre	25
Abbildung 2:	Die wichtigsten Formen von Stickstoff in der Umwelt.....	27
Abbildung 3:	Die globalen anthropogenen Nettoemissionen der wichtigsten Treibhausgase steigen laut Weltklimarat weiterhin an.....	32
Abbildung 4:	Bandbreite verschiedener Datenquellen am Beispiel der Kategorie „direkte Bodenemissionen“ aus der Landwirtschaft	37
Abbildung 5:	Globales N ₂ O-Budget 2010 bis 2019	42
Abbildung 6:	Globale anthropogene und natürliche Lachgasquellen für die 1980er-, 1990er-, 2000er-, 2010er- Jahre und das Jahr 2020 (nur Bottom-up-Daten)	43
Abbildung 7:	Anteil anthropogener und natürlicher Lachgasemissionen, nach Regionen 2010 bis 2019 (Bottom-up-Daten).....	45
Abbildung 8:	Direkte anthropogene Lachgasemissionen durch Verwendung von Stickstoff in der Landwirtschaft, nach Regionen 1980 bis 2020.....	46
Abbildung 9:	Direkte anthropogene Lachgasemissionen ohne die Landwirtschaft, nach Regionen 1980 bis 2020	48
Abbildung 10:	Indirekte anthropogene Lachgasemissionen, nach Regionen 1980 bis 2020.....	49
Abbildung 11:	Gestörte Lachgasflüsse durch Veränderungen von Klima, CO ₂ und Landnutzung, nach Regionen 1980 bis 2020	50
Abbildung 12:	Atmosphärischer N ₂ O-Anteil: bisherige und erwartete Werte laut den Repräsentativen Konzentrationspfaden (Representative Concentration Pathways, RCP) im CMIP6.....	57
Abbildung 13:	Atmosphärischer N ₂ O-Anteil: bisherige und erwartete Werte laut den Gemeinsam Genutzten Sozioökonomischen Pfaden (Shared Socioeconomic Pathways, SSP) im CMIP6	58
Abbildung 14:	Daten und Modelle für Bottom-up- und Top-down-Berechnungen von Lachgasemissionen.....	79
Abbildung 15:	Aufteilung der Lachgasflüsse (Quellen und Senken)	80

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht über die Kategorien anthropogener Lachgasflüsse und deren Datenquellen im Globalen N ₂ O-Budget (Bottom-up)	39
Tabelle 2:	Übersicht über die Gruppen natürlicher Lachgasflüsse und deren Datenquellen (Bottom-up)	40
Tabelle 3:	Übersicht über Top-down-Berechnungen der Lachgasflüsse..	40

Tabelle 4:	Bilanz der anthropogenen und natürlichen Lachgasflüsse (Bottom-up und Top-down).....	41
Tabelle 5:	Regionen im Globalen N ₂ O-Budget.....	44
Tabelle 6:	Liste der Staaten und Hoheitsgebiete zu den 18 Regionen.....	74
Tabelle 7:	Globales N ₂ O-Budget für die 1980er, 1990er, 2000er, 2010er Jahre und das Jahr 2020	76

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BU	Bottom-up-Daten
C	Kohlenstoff
CH₄	Methan
CLASSIC	Canadian Land Surface Scheme Including Biogeochemical Cycles
CLRTAP	UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution
CMIP6	Coupled Model Intercomparison Project Phase 6
CO₂	Kohlendioxid
DLEM	Dynamic Land Ecosystem Model
EDGAR	Emissions Database for Global Atmospheric Research, Emissionsdatenbank der Europäischen Kommission
EFDB	Emission Factor Database, zu Deutsch Datenbank für Emissionsfaktoren des IPCC
FAOSTAT	Food and Agriculture Organization Statistics
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe
GCP	Global Carbon Project
GFED	Global Fire Emissions Database
Gt	Gigatonne (1 Gigatonne = 1 Milliarde Tonnen)
GWP-100	Global Warming Potential, zu Deutsch „Globales Erwärmungspotential eines Treibhausgases über einen Zeitraum von 100 Jahren“
INI	International Nitrogen Initiative, zu Deutsch „Internationale Stickstoff-Initiative“
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change, Deutsch „Weltklimarat“
ISAM	Integrated Science Assessment Model (ISAM)
LULUCF	Land Use, Land Use Change, Forestry, zu Deutsch „Landnutzung, Landnutzungsänderungen, Forstwirtschaft“
Mt	Megatonne (1 Megatonne = 1 Million Tonnen)
N	Stickstoff
N₂O	Lachgas oder auch Distickstoffmonoxid oder Distickstoffdioxid
NMIP	N ₂ O Model Intercomparison-Project
NMIP2	N ₂ O Model Intercomparison-Project Phase 2
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration, die Nationale Wetter- und Ozeanografiebehörde der Vereinigten Staaten
ODP	Ozone depleting potential, zu Deutsch „Ozonzerstörendes Potential“

Abkürzung	Erläuterung
ORCHIDEE	Organizing Carbon and Hydrology in Dynamic Ecosystems
ppb	parts per billion, zu Deutsch „Teile pro Milliarde“, steht für den Faktor 10 ⁻⁹ , also ein Millardstel
ppm	parts per million, zu Deutsch „Teile pro Million“, steht für den Faktor 10 ⁻⁶ , also ein Millionstel
RCP	Representative Concentration Pathway, zu Deutsch „Repräsentativer Konzentrationspfad“
SRNM	Spatially Referenced Non-linear Model, zu Deutsch in etwa „Räumlich referenziertes nicht-lineares Modell“
SSP	Shared Socioeconomic Pathway, zu Deutsch „Gemeinsam genutzter Sozioökonomischer Pfad“
TD	Top-down-Daten
TFRN	Task Force on Reactive Nitrogen
THG	Treibhausgas
UBA	Umweltbundesamt
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change, zu Deutsch „Klimarahmenkonvention (der Vereinten Nationen)“
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe, zu Deutsch “Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa“
UNEP	United Nations Environment Programme, zu Deutsch „Umweltprogramm der Vereinten Nationen“
USEPA	United States Environmental Protection Agency, zu Deutsch „Umweltschutzbehörde der USA“
WCRP	World Climate Research Programme
WMO	World Meteorological Organization, zu Deutsch „Weltmeteorologische Organisation“

Zusammenfassung

Das Umweltbundesamt hat eine grundlegende Analyse und Bewertung der Rolle überregionaler bis globaler sowie natürlicher und anthropogener Lachgasquellen im Klimasystem in Auftrag gegeben. Ein entsprechender Sachstandsbericht soll auf Basis aller verfügbarer Daten eine Bilanzierung der aktuellen und potenziellen Lachgas/N₂O-Quellen und -Senken beinhalten, um die Entwicklung effektiver Minderungsstrategien zu erleichtern.

Der vorliegende Bericht beschreibt die Eigenschaften von Lachgas als klimawirksamen Bestandteil der Erdatmosphäre, die Methoden zu dessen Bilanzierung, die mengenmäßige Entwicklung verschiedener anthropogener sowie natürlicher Quellen sowohl global als auch regional, und Rückkopplungsmechanismen im Klimawandel. Abschließend werden Optionen zur Minderung anthropogener Lachgasemissionen und deren Potential beschrieben.

Grundlage waren die aktuellen Sachstandsberichte des Weltklimarats (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) sowie die dort zitierte Literatur, eigene Literaturrecherchen und Informationen von relevanten Expertengruppen in internationalen Organisationen wie zum Beispiel dem Umweltprogramm der Vereinten Nationen (United Nations Environment Programme, UNEP). Für die Bilanzierung der Lachgasemissionen wurde das „Globale N₂O-Budget“ des Global Carbon Project (GCP, <https://www.globalcarbonproject.org/>) ausgewertet. Dieses Budget führt alle verfügbaren Daten für anthropogene und natürliche Emissionen auf globaler sowie regionaler Ebene strukturiert zusammen.

Lachgas oder auch Distickstoffoxid (N₂O) ist ein Treibhausgas, das durch sehr unterschiedliche Prozesse auf natürliche Weise sowie durch Menschen verursacht wird. Nach Kohlendioxid (CO₂) und Methan (CH₄) kommt es als dritthäufigstes, sogenanntes gut durchmisches Treibhausgas (THG) in der Erdatmosphäre vor. Es besteht aus zwei Stickstoffatomen und einem Sauerstoffatom.

Obwohl die Konzentration von Lachgas tausendmal geringer ist, hat es im Vergleich zu CO₂ ein fast dreihundertmal so hohes globales Erwärmungspotential. Die Verweildauer in der Atmosphäre beträgt mehr als 100 Jahre. Die atmosphärische Konzentration, die für die Klimawirkung relevant ist, betrug 2022 durchschnittlich 335,65 parts per billion (ppb, zu Deutsch „Teile pro Milliarde“) und steigt weiterhin um etwas mehr als ein ppb pro Jahr an. Der Anteil an den globalen anthropogenen Gesamtemissionen von Treibhausgasen lag laut Weltklimarat im Jahr 2019, umgerechnet in CO₂-Äquivalente, bei etwa fünf Prozent. Seine Bedeutung ist also mehr als relevant und wird gemeinhin unterschätzt.

Stickstoff ist ein lebenswichtiges Element, zum Beispiel für das Pflanzenwachstum. Während die Erdatmosphäre zu 78 Prozent aus trägem, nicht-reaktivem Stickstoff besteht, kommt reaktiver Stickstoff in acht verschiedenen Formen vor, darunter auch Lachgas. Ammoniak und Nitrat sowie Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO₂) sind weitere Formen reaktiven Stickstoffs. Sie können sich von einer Form zu einer anderen verwandeln und zirkulieren zwischen Luft, Boden, Wasser und Organismen. Diese biogeochemischen Prozesse bilden den natürlichen Stickstoffkreislauf der Erde. Lachgas ist darunter das einzige langlebige Gas, das den Treibhauseffekt der Erdatmosphäre unterstützt.

Vom Menschen verursachte Einflüsse – zum Beispiel künstlich hergestellter Dünger in der Landwirtschaft, die Herstellung von Säuren als Vorprodukte für Dünger und Kunststoffe in der Industrie, der Einsatz fossiler Brennstoffe, Abwässer aus Kläranlagen, oder die Verbrennung von Biomasse – führen dem natürlichen Kreislauf zusätzlich Stickstoff zu. Anthropogene Quellen erhöhen somit direkt und indirekt die Lachgasemissionen in die Atmosphäre.

Das zusätzliche Lachgas verstärkt den Klimaeffekt anthropogener Treibhausgase und darüber hinaus auch die Zerstörung der Ozonschicht. Darüber hinaus werden die natürlichen Lachgasemissionen durch verschiedene, von Menschen direkt und indirekt verursachte Prozesse gestört und teilweise verstärkt. Dazu zählen der Klimawandel, der Anstieg von CO₂ in der Atmosphäre und sogenannte Landnutzungsänderungen wie zum Beispiel das Abholzen von alten Wäldern.

Während der absolute Anteil von Lachgas in der Erdatmosphäre durch eine standardisierte Methode sehr genau gemessen werden kann, ist die Quantifizierung von Lachgasemissionen ein komplexes Unterfangen. Die Mengen anthropogener sowie natürlicher Lachgasquellen und -senken werden deshalb auf nationaler und internationaler Ebene sowie in der Klimawissenschaft mithilfe von verschiedenen Daten und Modellen erfasst. Sie werden in sogenannte Bottom-up- (BU) sowie Top-down-Ansätze (TD) unterteilt. Die Bottom-up-Schätzungen beruhen auf der empirischen Hochskalierung von Punktmessungen, Treibhausgasinventaren sowie dynamischen Modellsimulationen. Top-down-Schätzungen basieren auf atmosphärischen Messungen sowie sogenannten inversen Modellen, in die Annahmen über den atmosphärischen Transport von Luftmassen einfließen. Top-down-Berechnungen unterscheiden nicht zwischen anthropogenen und natürlichen Verursachern von Lachgasemissionen.

Anthropogene Lachgasemissionen werden im Rahmen der international vereinbarten Treibhausgasbilanzierungen der Länder quantifiziert. Die jährlichen Emissionen werden dafür von den zuständigen Behörden anhand sogenannter Emissionsfaktoren und Daten zu den Herstellungs- oder Energiemengen bestmöglich quantifiziert. Referenz hierfür ist die Datenbank für Emissionsfaktoren des IPCC („Emission Factor Database“, EFDB), in der definiert wird, wie die Berechnungen erfolgen. So werden zum Beispiel die Lachgasemissionen in der Landwirtschaft anhand der verwendeten Menge Stickstoff berechnet. Allerdings hängen die tatsächlichen Emissionen in die Atmosphäre unter anderem von Boden- und Wetterbedingungen ab und können demnach von den Berechnungen in den Treibhausgasbilanzen abweichen.

Die Quantifizierung im Rahmen von Modellierungen wiederum wird international von verschiedenen Forschungskonsortien durchgeführt, mit unterschiedlichen thematischen Schwerpunkten, die von den durchführenden wissenschaftlichen Institutionen gesetzt werden. Auch hier ist die räumliche und zeitliche Zuordnung von Lachgasemissionen sehr komplex, denn sie sind abhängig von verschiedenen Umweltfaktoren. Eine wiederkehrende Feststellung in der Forschung ist daher, dass mehr Messdaten notwendig sind, um Datenlücken zu schließen und dadurch auch die Modelle zu verbessern.

Am Beispiel der Treibhausgasbilanzen und der Modelle wird deutlich, welche Herausforderungen bestehen, um die Verursacher und die Mengen von Lachgasemissionen ausreichend genau zu beziffern. Derzeit gibt es mit dem „Global Carbon Project“ (GCP) weltweit nur eine Referenz, die sich darum bemüht, die verschiedenen Bottom-up- und Top-down-Daten zusammenzuführen und ein globales Lachgasbudget zu präsentieren.

Das GCP ist ein weltweites Forschungsprojekt der Organisation „Future Earth“ in Kooperation mit dem UNEP und der damit verbundenen „International Nitrogen Initiative“ (INI). Das GCP ist außerdem Forschungspartner des „World Climate Research Programme“ (WCRP), das wiederum von der Weltmeteorologischen Organisation (WMO) unterstützt wird. Die Berichte des GCP werden regelmäßig vom Weltklimarat zitiert.

Die aktuelle Veröffentlichung des Globalen N₂O-Budgets des GCP stammt aus dem Jahr 2023 und ist Grundlage für den hier vorgelegten Bericht. Das Budget umfasst den Zeitraum von 1980 bis

2020. Die Lachgasemissionen werden dort – mit Bezug auf die jeweiligen Datenquellen – in Bandbreiten von Minimal- und Maximalwerten benannt. Gemäß internationalen Konventionen werden die Emissionen in Tonnen Stickstoff benannt, der in Lachgas enthalten ist („N₂O-N“). Eine Tonne N₂O-N entspricht 1,57 Tonnen Lachgas, und diese Menge wiederum etwa 416 Tonnen CO₂-Äquivalenten, der Bezugs- und Vergleichsgröße in den standardisierten Treibhausgasbilanzen.

Die globalen N₂O-Emissionen beliefen sich nach dem Globalen N₂O-Budget für die Jahre 2010 bis 2019 auf durchschnittlich 18,2 Millionen Tonnen (Mt) N₂O-N pro Jahr (Bottom-up) beziehungsweise 17,4 Mt N₂O-N pro Jahr (Top-down). In der Bottom-up-Analyse liegt die Bandbreite der Datenquellen bei minimal 10,4 bis maximal 25,9 Mt, für die Top-down-Analyse bei 15,8 bis 19,2 Mt N₂O-N pro Jahr.

In der weiteren Betrachtung werden hier nur die Bottom-up-Daten verwendet, da sie vor allem für die anthropogenen direkten Emissionen auf einer nach Sektoren unterteilten Datenbasis beruhen. Für die Lesbarkeit werden darüber hinaus ausschließlich die Mittelwerte angegeben.

In den vier Jahrzehnten seit 1980 sind die von Menschen verursachten Emissionen um fast 35 Prozent auf 6,7 Mt N₂O-N im Jahr 2020 gestiegen. Hauptverursacher sind künstliche und tierische Stickstoffdünger in der Landwirtschaft sowie in der industriellen Fischzucht. Sie führen zu direkten Emissionen am Ausbringungsort sowie zu indirekten Emissionen, wenn zum Beispiel überschüssiger Stickstoff über Wasserläufe ausgewaschen wird und sich später durch biogeochemische Prozesse in Lachgas verwandelt. Die Verwendung von Stickstoff in der Landwirtschaft ist auch der wesentliche Faktor für die zunehmende atmosphärische Belastung durch Lachgas. Sowohl die weiteren direkten anthropogenen Quellen aus Industrie, fossilen Brennstoffen, der Verbrennung von Biomasse und Abwässern als auch die natürlichen Lachgasflüsse haben sich von 1980 bis 2020 in Summe nur geringfügig verändert.

Der Anteil anthropogener Emissionen an den globalen Gesamtemissionen von Lachgas beträgt zum Ende des Untersuchungszeitraums geschätzt 36 Prozent, etwas weniger als zwei Drittel entstehen also auf natürliche Weise.

Als Senke fungiert vor allem die Stratosphäre, in der Lachgas durch chemische Prozesse in Folgeprodukte zerfällt. Dabei wird auch Ozon zerstört. Die Schätzungen durch verschiedene Modelle und Methoden sind seit Ende der 1990er Jahre möglich und gehen davon aus, dass hier in den Jahren von 2000 bis 2019 jedes Jahr zwischen 12,2 und 13,4 Mt N₂O-N abgebaut wurden.

Netto verbleibt also jährlich eine zunehmende Menge von Lachgas in der Atmosphäre. Für die Jahre von 1990 bis 1999 wird sie auf 3,6 Mt N₂O-N geschätzt, für das Folgejahrzehnt 2000 bis 2019 auf 4,6 Mt, und für 2020 bereits auf 6,4 Mt N₂O-N. Diese überschüssige Menge verteilt sich in der Erdatmosphäre und erklärt auch den steigenden absoluten Anteil von N₂O.

Bei einer tiefergehenden Analyse nach Regionen und Ursachen zeigen sich deutliche Unterschiede:

Europa verzeichnete im Beobachtungszeitraum (1980 bis 2020) über alle Quellen hinweg mit 31 Prozent den größten Rückgang, der vor allem auf sinkende Emissionen aus fossilen Brennstoffen sowie aus der Industrie zurückgeführt wird. Auch die indirekten Emissionen sowie die der Landwirtschaft reduzierten sich. Allerdings hat sich dieser Trend seit den 2000er-Jahren nicht fortgesetzt: Die Emissionen stagnieren bei 1,0 Mt N₂O-N.

China (1,3 Mt N₂O-N) und Südasien (1,3 Mt N₂O-N) verzeichneten mengenmäßig den stärksten Anstieg um 81 beziehungsweise 92 Prozent von 1980 bis 2020. Den größten Anteil machen Stickstoffdünger in der Landwirtschaft aus, aber auch die weiteren direkten sowie indirekten anthropogenen Emissionen haben deutlich zugenommen.

Bemerkenswert sind die regionalen Unterschiede bei der Verteilung zwischen anthropogenen und natürlichen Lachgasemissionen. So betrug der Anteil natürlicher Emissionen in den Jahren von 2010 bis 2019 im nördlichen Südamerika durchschnittlich 93, in Brasilien 84 und in Äquatorialafrika 76 Prozent. Am geringsten war der Anteil natürlicher Emissionen im Mittleren Osten (15 Prozent), in China (21 Prozent) sowie in der Region Korea/Japan und in der EU mit jeweils 27 Prozent. Die Unterschiede können auf die geographischen Bedingungen, zum Beispiel den Umfang natürlicher, von Menschen unberührter Flächen zurückgeführt werden.

Im Globalen N₂O-Budget beschreiben und quantifizieren die Autor*innen auch den Zusammenhang zwischen Klimawandel, steigenden CO₂-Konzentrationen und Lachgasemissionen. Zum einen erhöhen der Klimawandel mit steigenden Temperaturen und die Verwendung von Stickstoffdüngern die Lachgasemissionen aus Böden. Zum anderen führen erhöhte CO₂-Konzentrationen wiederum dazu, dass das Pflanzenwachstum gestärkt und damit mehr Stickstoff gebunden wird, der sich dann nicht mehr durch bakterielle Prozesse in Lachgas verwandeln kann. Die Wechselwirkungen sind vielfältig und die Auswirkungen können nicht eindeutig quantifiziert werden, wie verschiedene, für den Bericht ausgewertete Studien zeigen. Allerdings ist davon auszugehen, dass die bereits stattfindenden Veränderungen des Klimas zu weiteren N₂O-Emissionen führen werden, die nicht direkt anthropogenen Ursprungs sind, sondern aus indirekten oder natürlichen Quellen stammen.

Ansatzpunkte für die Minderung von Lachgasemissionen sind vor allem die direkten anthropogenen Quellen. Fast 60 Prozent stammen aus der Landwirtschaft. Daher muss ein besonderes Augenmerk auf Minderungsmaßnahmen in diesem Sektor gelegt werden. Hier wird von Expert*innen angeregt, den Stickstoffkreislauf zu schließen und Verluste beim Einsatz in Ackerbau und Viehzucht zu vermeiden. Der Schwerpunkt sollte auf der effizienteren Verwendung von Stickstoff im gesamten Agrar- und Lebensmittelsystem unter Einsatz aller verfügbaren Maßnahmen liegen. Ergänzend wird vorgeschlagen, systemische Veränderungen in Betracht zu ziehen, die Stickstoffverluste reduzieren, zum Beispiel bei der Ernährung von Menschen und Tieren und dem Einsatz von Düngern. Konkrete Maßnahmen zielen darauf, die Stickstoffmengen zu reduzieren oder effizienter einzusetzen, wodurch auch die später folgenden Lachgasmengen sinken. Das reicht von proteinärmerer Ernährung bei Milch- und Fleischrindern sowie Schweinen über die zielgenauere Anwendung von stickstoffhaltigen Düngern im Ackerbau bis hin zur Behandlung von Gülle und speziellen Maßnahmen der Landschaftspflege.

Die Verbrennung von Biomasse – zum Beispiel auf abgeernteten Feldern, als Brennstoff in Öfen oder durch Brände in natürlichem Umfeld – machte 2020 etwa elf Prozent der anthropogenen Emissionen aus. Ansatzpunkte sind hier, die Biomasse auf dem Feld zu belassen, durch andere Brennstoffe zu ersetzen und die natürlichen Brände durch kontrolliertes Abbrennen zu reduzieren.

Die Emissionen aus fossilen Brennstoffen sowie aus der Industrie machten zuletzt etwa 15 Prozent der globalen Lachgasemissionen aus. Eine wirksame Reduzierung ist durch technische Maßnahmen bei den Verbrennungsprozessen machbar. Deren Einführung kann durch gesetzliche Vorgaben, internationale Vereinbarungen und die Aufnahme in Emissionshandelssysteme, wie es sie in der EU bereits gibt, forciert werden.

Lachgasemissionen aus Abwässern haben einen Anteil von etwa vier Prozent und sind vor allem an mehrstufigen Kläranlagen steuerbar. Hier besteht noch Forschungsbedarf, um die Prozesse zu optimieren.

Die indirekten anthropogenen Lachgasemissionen lassen sich reduzieren, indem die vorher beschriebenen Maßnahmen konsequent umgesetzt werden, da dann weniger Stickstoff als Ursache für Lachgas zur Verfügung steht.

Die Kosten und das Potential der hier beschriebenen Maßnahmen können mit Hilfe von Berechnungen der sogenannten Grenzvermeidungskosten (Englisch „marginal abatement cost“, abgekürzt MAC) eingeschätzt werden. Für Lachgas liegen hierzu nur wenige Publikationen vor. Einig sind sich die verschiedenen Autor*innen darin, dass Lachgas als eines der Nicht-CO₂-Treibhausgase gemindert werden kann und dies in der Klimaschutzpolitik integriert werden müsse (dazu auch Kanter et al. 2020). Ein Großteil der heute verfügbaren technischen Maßnahmen kann ohne oder zu geringen Mehrkosten umgesetzt werden. Einigkeit besteht zudem darin, dass die anthropogenen Lachgasemissionen allerdings nur in Teilen gemindert werden können, und vor allem in der Landwirtschaft und bei der Behandlung von Abwässern weiterhin entstehen werden. In der Konsequenz müssen also andere Treibhausgase wie CO₂ und Methan noch stärker als bisher geplant reduziert werden, um den Klimaeffekt der nicht vermeidbaren Lachgasemissionen auszugleichen.

Lachgas darf also als Treibhausgas nicht unterschätzt werden. Es ist absehbar, dass der absolute Anteil von Lachgas in der Atmosphäre und damit dessen Klimawirkung in den kommenden Jahrzehnten weiterhin ansteigen werden.

Diese Entwicklung kann umgekehrt werden, indem die technischen und politischen Maßnahmen, um Lachgasemissionen zu reduzieren, konsequent verwirklicht werden. Dazu müssen sie Bestandteil von politischem Handeln zum Klimaschutz werden, das den Fokus bisher primär auf Kohlendioxid und Methan legt.

Sowohl für die verlässlichere Berechnung der Lachgasemissionen und deren erfolgreicher Reduzierung als auch zukünftiger Entwicklungen im Rahmen von Szenarien und Modellen ist es wichtig, über bessere und genauere Eingangsdaten zu verfügen. Dazu ist es unter anderem notwendig, mehr und dauerhaftere Messkampagnen unter sehr unterschiedlichen Rahmenbedingungen durchzuführen, um die Ursachen und Mengen von Lachgasemissionen noch besser zu verstehen.

Summary

The German Environment Agency has commissioned a thorough analysis and assessment of the transregional to global role of natural and anthropogenic emissions of nitrous oxide (N₂O) within the climate system. Based on all available data, a corresponding status report should include an inventory of current and potential N₂O sources and sinks, in order to facilitate the development of effective mitigation strategies.

This report describes the properties of nitrous oxide as a climate-impacting component of the earth's atmosphere, the methods for its inventory, the quantitative development of various anthropogenic and natural sources both globally and regionally, and feedback mechanisms due to climate change. Finally, options for reducing anthropogenic nitrous oxide emissions are outlined together with their potential.

It is based on the latest assessment reports of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) as well as the publications cited therein, own literature research and information from relevant expert groups in international organizations such as the United Nations Environment Programme (UNEP). The “Global N₂O Budget” of the Global Carbon Project (GCP, <https://www.globalcarbonproject.org/>) was used to calculate nitrous oxide emissions. This budget consolidates all available data for anthropogenic and natural emissions on a global and regional level in a systematic manner.

Nitrous oxide is a greenhouse gas that is caused by a wide variety of natural and human processes. After carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄), it is the third most common, so-called well-mixed greenhouse gas (GHG) in the earth's atmosphere. It consists of two nitrogen atoms and one oxygen atom.

Although the concentration of nitrous oxide is thousands of times lower, it has almost three hundred times the global warming potential of CO₂. It remains in the atmosphere for over 100 years. The atmospheric concentration that is of relevance to its impact on the climate averaged 335.65 parts per billion (ppb) in 2022 and continues to rise by just over one ppb per year. According to the Intergovernmental Panel on Climate Change, the share of total global anthropogenic greenhouse gas emissions, converted into CO₂ equivalents, was around five percent in 2019. Its importance is therefore more than relevant and is generally underestimated.

Nitrogen is a vital element, for example in plant growth. While 78 percent of the earth's atmosphere consists of inert, non-reactive nitrogen, reactive nitrogen occurs in eight different forms, including nitrous oxide. Other forms of reactive nitrogen are ammonia and nitrate as well as nitrogen monoxide (NO) and nitrogen dioxide (NO₂). These can transform from one form to another and circulate between air, soil, water and organisms. These biogeochemical processes constitute the earth's natural nitrogen cycle. Among these, nitrous oxide is the only long-lived gas that sustains the greenhouse effect of the earth's atmosphere.

Man-made influences, for example artificially produced fertilizers in agriculture, the production of acids as preproducts for fertilizers and plastics in industrial processes, the use of fossil fuels, wastewater from sewage treatment plants or the burning of biomass, add additional nitrogen to the natural cycle and thus directly and indirectly increase nitrous oxide emissions into the atmosphere.

The additional nitrous oxide increases the climate effect of anthropogenic greenhouse gases and also the destruction of the ozone layer. Natural nitrous oxide emissions are also affected and, in some cases, intensified by various processes caused directly and indirectly by humans. These include the ongoing climate change, the increase in CO₂ in the atmosphere and changes in land-use, such as the clearing of long-standing forests.

While the exact amount of nitrous oxide in the earth's atmosphere can be measured very accurately using a standardized method, quantifying nitrous oxide emissions is a complex undertaking. The quantities of anthropogenic and natural nitrous oxide sources and sinks are therefore recorded at national and international level and within climate science, using various data and models. They are divided into bottom-up (BU) and top-down (TD) approaches. The bottom-up estimates are based on the empirical upscaling of point measurements, greenhouse gas inventories and dynamic model simulations, while top-down estimates are based on atmospheric measurements and inverse models, which incorporate estimates of the atmospheric transport of air masses. Top-down calculations do not distinguish between anthropogenic and natural sources of nitrous oxide emissions.

Anthropogenic nitrous oxide emissions are quantified as part of the internationally agreed greenhouse gas balances of each country. The annual emissions are quantified as best as possible by the responsible authorities using so-called emission factors and data on the incoming production or energy quantities. The reference for this is the IPCC Emission Factor Database, which defines how the calculations are made. For example, nitrous oxide emissions in agriculture are calculated based on the amount of nitrogen used. However, the actual emissions into the atmosphere depend on soil and weather conditions, among other things, and can therefore deviate from the calculations in the greenhouse gas balances.

Quantification in the context of modeling and simulations, in turn, are conducted internationally by various research teams, with different thematic focuses set by the scientific institutions carrying out the work. Here too, the spatial and temporal allocation of nitrous oxide emissions is very complex, as they are dependent on various environmental factors. A recurring observation in research is therefore that more measurement data is needed to close data gaps and thereby also improve the current models.

The example of greenhouse gas balances and models clearly shows the challenges that exist in order to quantify the sources and quantities of nitrous oxide emissions with sufficient accuracy. There is currently only one reference worldwide, the Global Carbon Project (GCP), which aims at bringing together the various bottom-up and top-down data and present a global nitrous oxide budget.

The GCP is a global research project of the organization “Future Earth” in cooperation with UNEP and the associated “International Nitrogen Initiative” (INI). GCP is also a research partner of the World Climate Research Programme (WCRP), which in turn is supported by the World Meteorological Organization (WMO). GCP reports are regularly referenced by the Intergovernmental Panel on Climate Change.

The current publication of the GCP's Global N₂O Budget dates from 2023 and is the basis for the report presented here. The budget covers the period from 1980 to 2020, in which nitrous oxide emissions are specified - with reference to the respective data sources - in ranges of minimum and maximum values. In accordance with international conventions, emissions are expressed in tons of nitrogen contained in nitrous oxide (“N₂O-N”). One ton of N₂O-N corresponds to 1.57 tons of nitrous oxide, which in turn corresponds to around 467 tons of CO₂ equivalents, the reference and comparative value in the standardized greenhouse gas balances.

According to the global N₂O budget for the years 2010 to 2019, global N₂O emissions amounted to an average of 18.2 million tons (expressed in Teragram, Tg respectively Megaton, Mt in German language) of N₂O-N per year (bottom-up) and 17.4 Tg of N₂O-N per year (top-down). In the bottom-up calculation, the range of data sources is a minimum of 10.4 to a maximum of 25.9 Tg, for the top-down calculation 15.8 to 19.2 Tg N₂O-N per year.

Only the bottom-up data is used here in the further assessment, as it is based on a database broken down by sector, particularly for direct anthropogenic emissions. For the sake of clarity, only the average values are given.

In the four decades since 1980, man-made emissions have risen by almost 35 percent to 6.7 Tg N₂O-N in 2020. The main causes are artificial and animal nitrogen fertilizers in agriculture and industrial fish farming. They lead to direct emissions at the site of use, as well as indirect emissions, for example when excess nitrogen is washed out via watercourses and later turns into nitrous oxide through biogeochemical processes. The use of nitrogen in agriculture is also the main factor in the increasing atmospheric pollution by nitrous oxide: Both other direct anthropogenic sources from industry, fossil fuels, the combustion of biomass and wastewater, as well as natural nitrous oxide fluxes have changed only slightly between 1980 and 2020.

Anthropogenic emissions accounted for an estimated 36 percent of total global nitrous oxide emissions at the end of the study period, meaning that slightly less than two thirds are produced naturally.

The main sink is the stratosphere, where secondary products of N₂O react with ozone and both are broken down as a result. Estimates based on various models and methods have been possible since the end of the 1990s and indicate that between 12.2 and 13.4 Tg of N₂O-N were depleted here every year between 2000 and 2019.

In net terms, therefore, an increasing amount of nitrous oxide remains in the atmosphere each year. For the years 1990 to 1999, it is estimated at 3.6 Tg N₂O-N, for the following decade 2000 to 2019 at 4.6 Tg, and for 2020 already at 6.4 Tg N₂O-N. This surplus quantity is distributed in the earth's atmosphere and also explains the increasing absolute proportion of N₂O.

A more in-depth analysis by region and causes reveals significant differences:

Europe recorded the largest decrease across all sources in the observation period (1980 to 2020) at 31 percent, which is primarily attributed to declining emissions from fossil fuels and industry. Indirect emissions and those from agriculture also decreased. However, this trend has not continued since the 2000s: Emissions have stagnated at 1.0 Tg N₂O-N.

China (1.4 Tg N₂O-N) and South Asia (1.3 Tg N₂O-N) recorded the strongest increase in terms of quantity by 81 and 92 percent respectively between 1980 and 2020. Nitrogen fertilizers in agriculture account for the largest share, but other direct and indirect anthropogenic emissions have also increased significantly.

The regional differences in the distribution between anthropogenic and natural nitrous oxide emissions are noteworthy. In the years from 2010 to 2019, the proportion of natural emissions averaged 93% in northern South America, 84% in Brazil and 76% in Equatorial Africa. The share of natural emissions was lowest in the Middle East (15 percent), China (21 percent) and the region Korea/Japan and in the EU at 27 percent each. The differences can be attributed to geographical conditions, for example the extent of natural areas untouched by humans.

In the Global N₂O Budget, the authors also describe and quantify the relationship between climate change, rising CO₂ concentrations and nitrous oxide emissions. On the one hand, climate change with rising temperatures and the use of nitrogen fertilizers increase nitrous oxide emissions from the soil. On the other hand, increased CO₂ concentrations in turn lead to increased plant growth and thus to more nitrogen being captured, which can then no longer be converted into nitrous oxide through bacterial processes. The interactions are multifaceted and the effects cannot be clearly quantified, as shown by various studies analyzed for this report. However, it can be assumed that the climate change already taking place will lead to further N₂O emissions that are not of direct anthropogenic origin but come from indirect or natural sources.

The main starting points for reducing nitrous oxide emissions are primarily the direct anthropogenic sources. Almost 60 percent are caused by agriculture. Special attention must

therefore be paid to reduction measures in this sector. Here, experts suggest closing the nitrogen cycle and avoiding losses during use in agriculture and livestock farming. The focus should be on more efficient use of nitrogen in the entire agricultural and food system, using all available measures. In addition, it is suggested to consider systemic changes that reduce nitrogen losses, for example in human and animal nutrition and in the use of fertilizers. Concrete measures are aimed at reducing the quantities of nitrogen or using it more efficiently, which would also reduce the subsequent quantities of nitrous oxide. These range from lower-protein diets for dairy and beef cattle and pigs to the more targeted use of nitrogenous fertilizers in arable farming, the treatment of liquid manure and special landscape management measures.

The combustion of biomass, for example on harvested fields, as fuel in stoves or due to fires in natural environment, accounted for around 11 percent of anthropogenic emissions in 2020. The starting points here are to leave the biomass in the field, replace it with other fuels and reduce natural fires through controlled burning.

Emissions from fossil fuels and from industry recently accounted for around 15 percent of global nitrous oxide emissions. An effective reduction is feasible through technical measures in the combustion processes. Their introduction can be accelerated by legal requirements, international agreements and inclusion in emissions trading systems, as already in existence in the EU.

Nitrous oxide emissions from wastewater account for around four percent and can be controlled, particularly at multi-stage wastewater treatment plants. There is still a need for research to optimize the processes.

Indirect anthropogenic nitrous oxide emissions can be reduced consistently by implementing the measures described above, as less nitrogen is then available as a source of nitrous oxide.

The costs and potential of the measures described here can be estimated with the help of marginal abatement cost (MAC) calculations. Only a few publications are available on this topic for nitrous oxide. The authors agree that nitrous oxide, as one of the non-CO₂ greenhouse gases, can be reduced from a technical and financial point of view and that this must be integrated into climate protection policies. The majority of the technical measures available today can be implemented at little or no additional cost. However, there is also consensus that anthropogenic nitrous oxide emissions can only be reduced in part, and that they will continue to be produced in agriculture and in the treatment of wastewater in particular. As a result, other greenhouse gases such as CO₂ and methane must be reduced even more than previously planned in order to compensate for the climate effect of unavoidable nitrous oxide emissions.

Nitrous oxide should therefore not be underestimated as a greenhouse gas. It is foreseeable that the absolute proportion of nitrous oxide in the atmosphere, and thus its impact on the climate will continue to rise in the coming decades.

This trend can be reversed if the technical and political measures that reduce nitrous oxide emissions are consistently implemented. To this end, they must become part of political action to protect the climate, which has so far focused primarily on carbon dioxide and methane.

It is important therefore to have better and more accurate input data for the more reliable calculation of nitrous oxide emissions and their successful reduction, as well as for future developments within the framework of scenarios and models. Among other things, it would be necessary to conduct more and increasingly permanent measurement campaigns under very different framework conditions in order to gain an even better understanding of the causes and quantities of nitrous oxide emissions.

1 Vorgehensweise

Das Umweltbundesamt hat eine grundlegende Analyse und Bewertung der Rolle überregionaler bis globaler, natürlicher und anthropogener, also von Menschen verursachter Lachgasquellen im Klimasystem in Auftrag gegeben. Ein entsprechender Sachstandsbericht soll auf Basis aller verfügbarer Daten eine Bilanzierung der aktuellen und potenziellen Lachgas/N₂O-Quellen und -Senken beinhalten und auf verschiedene Leitfragen eingehen.

Für den hiermit vorgelegten Bericht wurde daher wie folgt vorgegangen:

Zunächst wurde eine Literaturrecherche zu Daten und Erkenntnissen über Lachgasemissionen und deren Reduktionspotential durchgeführt. Ausgangspunkt waren der aktuelle, Sechste sowie der Fünfte Sachstandsbericht des Weltklimarats (IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change), die in den Jahren 2021/2022 sowie 2013/2014 sukzessive veröffentlicht wurden, sowie die dort zitierte Literatur. Beide Sachstandsberichte sind in unterschiedlicher Hinsicht relevant. Dies wird im jeweiligen Zusammenhang erläutert.

Speziell zu den Daten und zur Bilanzierung der Lachgasquellen und -senken wurde das „Globale N₂O-Budget“ des Global Carbon Project (GCP, <https://www.globalcarbonproject.org/>) analysiert, das zum ersten Mal im Jahr 2020 veröffentlicht und drei Jahr später aktualisiert sowie erweitert wurde. Das GCP ist ein weltweites Forschungsprojekt der Organisation „Future Earth“ in Kooperation mit dem Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP). GCP ist außerdem Forschungspartner des „World Climate Research Programme“, das wiederum von der Weltmeteorologischen Organisation (WMO) unterstützt wird. Das Globale N₂O-Budget wird auch vom Weltklimarat IPCC zitiert¹. Es enthält alle verfügbaren Daten seit 1980. Im Rahmen dieses Sachstandsberichts wurde auch die dort zitierte Literatur erfasst und den jeweiligen Kapiteln zugeordnet.

Weitere wissenschaftliche Literatur, die sich mit der Reduzierung von N₂O-Emissionen beschäftigt, wurde dahingehend geprüft, ob nützliche Erkenntnisse für den Bericht hier aufgenommen werden sollten.

Vorschläge zur Reduzierung von anthropogenen N₂O-Emissionen leiten regelmäßig zu Maßnahmen über, die im politischen Kontext umgesetzt werden müssen. Einen Schwerpunkt bildet hierbei die Landwirtschaft: Über die Hälfte der anthropogenen N₂O-Emissionen entstehen dort, weil stickstoffhaltige Dünger eingesetzt werden. Stickstoff ist daher ein übergreifendes Thema, unter dem auch Lachgas behandelt wird. So widmete sich ein Teil der Recherche den internationalen Institutionen und Netzwerken wie dem United Nations Environment Programme (UNEP), der dort angegliederten Arbeitsgruppe zu Stickstoff (UNEP Working Group on Nitrogen) sowie der separat entstandenen Internationalen Stickstoff-Initiative (INI – International Nitrogen Initiative). Im Rahmen des vorliegenden Sachstandsberichts wurden die dort vorgeschlagenen Programme zur Stickstoffreduzierung aufgenommen, sofern dadurch auch beabsichtigt ist, Lachgasemissionen zu senken.

Das folgende Kapitel 2 beschreibt zunächst N₂O als atmosphärisches Treibhausgas, seine Klimarelevanz und Entstehung. Zur Einordnung wird auch erläutert, welche biologischen und physikalischen Prozesse dabei eine Rolle spielen.

Kapitel 3 enthält ausgehend von der Arbeit des GCP die Bilanzierung der aktuellen und potenziellen N₂O-Quellen und -Senken auf Basis aller verfügbarer Daten. Da das Zahlenwerk, ebenso wie die Entstehung von Lachgas, sehr komplex ist, wird zunächst die Datengrundlage

¹ Im Kontext dieses Berichts darf dieses Budget nicht mit dem sogenannten Kohlenstoff- oder auch CO₂-Budget verwechselt werden, das die Restmenge an anthropogenen Emissionen definiert, um bestimmte Temperaturgrenzen in der globalen Erwärmung nicht zu überschreiten.

beschrieben und erläutert. Auf Basis des oben genannten „Globalen N₂O-Budgets“ werden die anthropogenen und natürlichen Quellen und Senken von Lachgas für die Jahre 2010 bis 2019 grafisch dargestellt. Textlich wird erläutert, wie sich die verschiedenen Quellen und Senken zueinander verhalten und wie sie sich regional unterschiedlich verteilen. Im Anhang erfolgt eine tabellarische Darstellung der Mengen seit 1980 in Zehn-Jahres-Schritten bis 2019 sowie für das jüngste verfügbare Jahr 2020.

Darüber hinaus wird auf verschiedene Leitfragen eingegangen, so zum Beispiel, welche Rolle natürliche Emissionsquellen, etwa Feuchtgebiete und Ozeane im globalen N₂O-Budget spielen, welche anthropogenen Quellen es gibt und wie hoch deren Beitrag ist. Zusätzlich wird betrachtet, ob zentrale Erkenntnislücken der atmosphärischen Chemie und des Transports von N₂O vorhanden sind, einschließlich seiner Senken und Quellen in verschiedenen Regionen und Jahreszeiten und wie sich diese Lücken schließen lassen. Schließlich wird die Frage beantwortet, welche Auswirkungen Klimaveränderungen (zum Beispiel Temperatur und Feuchtigkeit) auf den relativen Beitrag verschiedener N₂O-Emissionsquellen haben, wie mögliche Rückkopplungsmechanismen zwischen Klimawandel und N₂O-Emissionen aussehen und wie diese in globale Klimamodelle integriert werden können. Sofern möglich, wird herausgearbeitet, welche der analysierten Prozesse bisher in Erdsystem- und/oder Klima-Modellen nicht ausreichend berücksichtigt werden.

Kapitel 4 widmet sich den verschiedenen anthropogenen N₂O-Emissionen, untergliedert in die Bereiche Landwirtschaft, fossile Brennstoffe und Industrie, den indirekten Emissionen aus anthropogenen Stickstoffeinträgen, und den Vorschlägen aus der Wissenschaft sowie von internationalen Institutionen, wie diese gesenkt werden können. Der Bericht geht dafür auf verschiedene Leitfragen ein, zum Beispiel nach den Schlüsselfaktoren zur Eindämmung der N₂O-Emissionen aus verschiedenen Quellen, den effektivsten Strategien und Technologien zur Reduzierung von N₂O-Emissionen und deren Umsetzung in großem Maßstab. Darüber hinaus werden die Kosten und das Potential für verschiedene Maßnahmen zur Minderung von N₂O-Emissionen aufgeführt.

Kapitel 5 fasst in aller Kürze die wichtigsten Erkenntnisse zusammen und bietet einen Ausblick auf mögliche Prioritäten im politischen Handeln.

Fachspezifische englischsprachige Ausdrücke und Begriffe wurden mithilfe der Handreichung der deutschen IPCC-Koordinierungsstelle ins Deutsche übersetzt².

² „Vereinbarung für die Übersetzung englischer Fachbegriffe aus den Klimawissenschaften ins Deutsche“, online abrufbar unter <https://www.de-ipcc.de/270.php>.

2 N₂O als atmosphärisches Treibhausgas: Klimarelevanz und Entstehung

2.1 Bedeutung als Treibhausgas

Lachgas (Distickstoffoxid, N₂O)³ ist ein Treibhausgas, das durch sehr unterschiedliche Prozesse auf natürliche Weise sowie durch die Menschen verursacht wird. Nach Kohlendioxid (CO₂) und Methan (CH₄) kommt es als dritthäufigstes, sogenanntes gut durchmisches Treibhausgas (THG) in der Erdatmosphäre vor (IPCC 2021). Die fluorierten Chlor-Kohlenwasserstoffe (FCKW) sind weitere wichtige Treibhausgase, die aber seit dem Montreal-Protokoll⁴ 1987 deutlich reduziert wurden und damit weniger zum gesamten Treibhausgaseffekt beitragen. Daher hat Lachgas diese in der Bedeutung für das Erdklima überholt. Wasserdampf ist zwar mengenmäßig das wichtigste Treibhausgas, noch vor CO₂, hat aber nur eine atmosphärische Verweildauer von wenigen Tagen und verteilt sich zeitlich und räumlich sehr unterschiedlich. Er entsteht ganz überwiegend auf natürliche Weise. Daher zählt Wasserdampf nicht zu den gut durchmischten Treibhausgasen.

Gut durchmischt heißt hier, dass Lachgas über hundert Jahre in der Atmosphäre verbleibt und sich durch die Windströmungen gleichmäßig rund um den Planeten verteilt. Das durchschnittliche globale Mischungsverhältnis, also die durchschnittliche Zahl von N₂O-Molekülen in unserer Umgebungsluft, kann daher aus den Messwerten verschiedener Beobachtungsstationen bestimmt werden.

Die Zunahme dieser Treibhausgase, die seit etwa 1750 rekonstruiert wurde und seit den 1950er Jahren genau gemessen werden kann, ist eindeutig durch menschliche Aktivitäten verursacht. Die steigenden Treibhausgaskonzentrationen erhöhen den Strahlungsantrieb und erwärmen so das Klimasystem. Dadurch nehmen Hitzeextreme, Starkniederschläge sowie landwirtschaftliche und ökologische Dürren je nach Region zu (IPCC 2021).

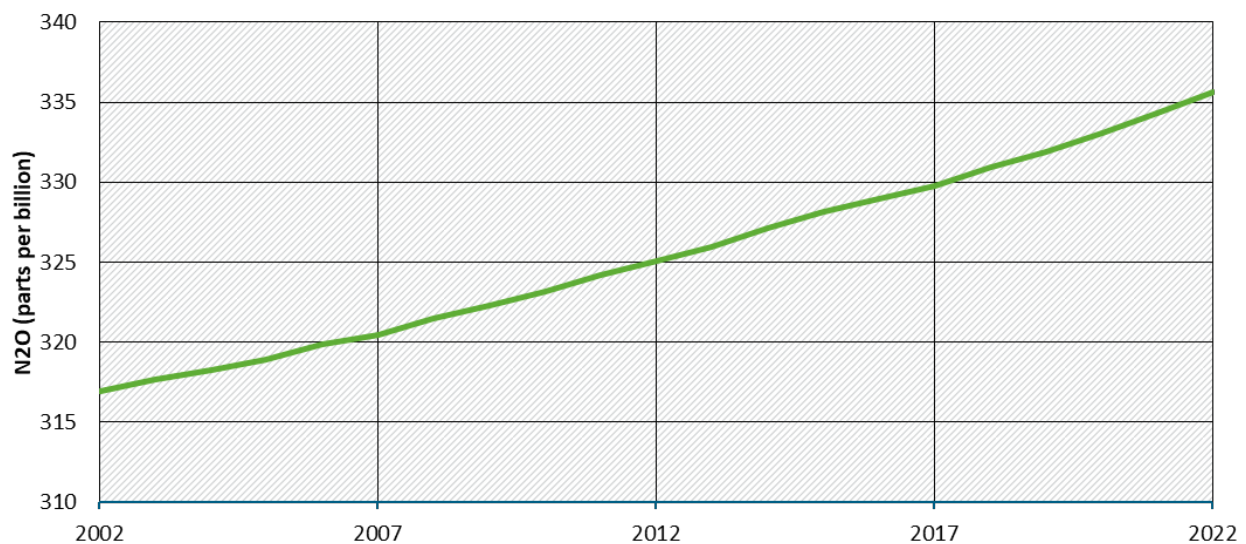
2019 lag die Konzentration von Lachgas in der Atmosphäre bei 332 parts per billion (ppb⁵), und damit 23 Prozent über dem vorindustriellen Niveau von 270 ppb. Der jährliche Anstieg beschleunigt sich und betrug in der Zeit von 2010 bis 2019 durchschnittlich etwa 0,95 ppb pro Jahr (IPCC 2021). Laut National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA; Nationale Wetter- und Ozeanografiebehörde der Vereinigten Staaten) wurden 2022 bereits über 335 ppb gemessen, bei einem jährlichen Zuwachs von mehr als 1,0 ppb pro Jahr (Lan et al. 2024).

³ Der Einfachheit und Verständlichkeit halber wird in diesem Bericht die weit verbreitete Bezeichnung Lachgas verwendet.

⁴ Weitere Informationen zum Montreal-Protokoll unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/fluorierte-treibhausgase-fckw/kaelteportal-rechtliche-grundlagen/internationale-abkommen#montrealer-protokoll>.

⁵ Der englische Ausdruck parts per billion (zu Deutsch „Teile pro Milliarde“) steht für den Faktor 10⁻⁹, also ein Milliardstel.

Abbildung 1: Zunahme von Lachgas in der Atmosphäre



Jährliche Mittelwerte verschiedener Messstationen, aufbereitet durch die NOAA.

Quelle: eigene Darstellung auf Grundlage der Daten von Lan et al. 2024 (https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_n2o/), Susanne Schödel.

Der jüngste Anstieg liegt oberhalb der erwarteten Werte aus den verschiedenen Klimaszenarien des IPCC und wird direkt auf die steigenden anthropogenen Emissionen zurückgeführt. Diese sind von 1980 bis 2020 um 40 Prozent gestiegen und ergeben 2020 knapp über ein Drittel aller N₂O-Emissionen (Tian et al. 2023a).

Die mittlere Lebensdauer von N₂O in der Atmosphäre wurde vom IPCC im Rahmen seines Fünften Sachstandsberichts aus dem Jahr 2013 auf 121 Jahre geschätzt. Der aktuelle Sechste Sachstandsbericht aus dem Jahr 2021 geht von 116 Jahren mittlerer Verweildauer aus (IPCC 2021).

Lachgas ist aus drei Gründen sehr klimarelevant:

- ▶ CO₂ kommt im globalen Mittel mehr als tausendmal so häufig in der Atmosphäre vor wie Lachgas, CH₄ mehr als fünfmal so häufig (Stand August 2023: CO₂ 416 ppm⁶, also 416.000 ppb, CH₄: 1.915 ppb, N₂O: 336 ppb (<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html>)). Lachgas hat jedoch eine deutlich höhere Klimawirkung als CO₂ oder CH₄: Das globale Erwärmungspotenzial über einen Zeitraum von 100 Jahren (GWP-100) wird fast 300mal so hoch eingeschätzt wie das von CO₂ (IPCC 2021: 273 ± 130; IPCC 2013: 265). Für die Treibhausgasbilanzierung der Länder für die UN-Klimaberichterstattung werden die Lachgasemissionen mithilfe des GWP-100 aus dem aktuell verwendeten Sachstandsbericht des IPCC in CO₂-Äquivalente umgerechnet. Zurzeit ist dies der Fünfte Sachstandsbericht. Für jede Tonne N₂O-Emissionen werden also 265 Tonnen CO₂-Äquivalente angesetzt.
- ▶ Lachgas steigt durch atmosphärische Prozesse bis in die Stratosphäre auf und zerfällt dort. Seine Folgeprodukte zerstören – wie auch die halogenhaltigen Treibhausgase – das dort vorhandene Ozon, das auf natürliche Weise vor der UV-Strahlung aus dem Weltraum schützt.
- ▶ Klimaveränderungen wie steigende Temperaturen oder höhere relative Luftfeuchte führen zu mehr Lachgasemissionen, was wiederum die Erderwärmung verstärkt.

⁶ Der englische Ausdruck parts per million (zu Deutsch „Teile pro Million“) steht für den Faktor 10⁻⁶, also ein Millionstel.

Diese Fakten unterstreichen, dass N₂O-Emissionen dringend genauer identifiziert und reduziert werden müssen.

2.2 Lachgas im natürlichen Stickstoffkreislauf der Erde

Die Erdatmosphäre enthält zu etwa 78 Prozent nicht-reaktiven, sogenannten elementaren Stickstoff in der Form von zwei miteinander verbundenen Stickstoffatomen (N₂). Daneben kommt reaktiver Stickstoff, der lebenswichtig ist, in verschiedenen Formen vor. So fördert zum Beispiel Nitrat (NO₃⁻) als eine Variante mineralischen Stickstoffs das Pflanzenwachstum – allerdings nur, solange nicht zu wenig oder zu viel davon vorhanden ist. Ammoniak (NH₃), Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO₂) sind weitere Beispiele für reaktiven Stickstoff (Abbildung 2). Sie können sich von einer Form zu einer anderen verwandeln und zirkulieren zwischen Luft, Boden, Wasser und Organismen⁷. Diese biogeochemischen Prozesse bilden den Stickstoffkreislauf der Erde.

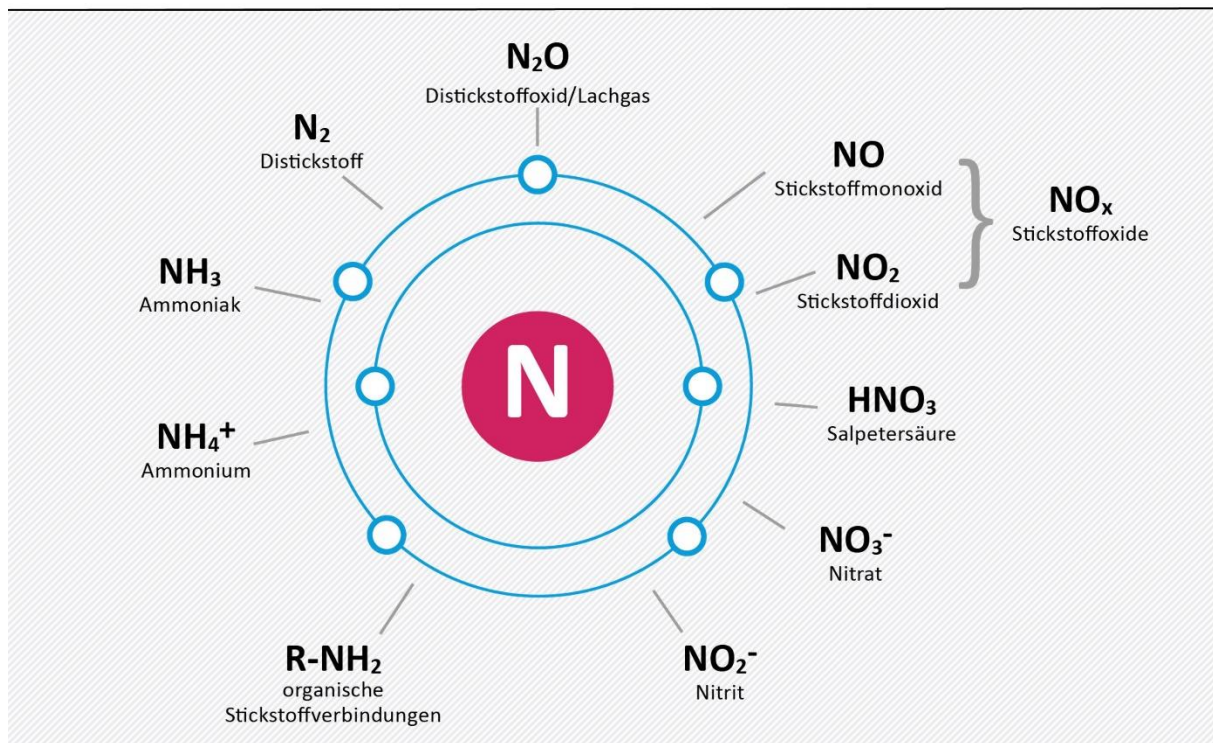
Lachgas zählt ebenfalls zu den reaktiven Stickstoffen und besteht aus zwei Stickstoffatomen und einem Sauerstoffatom. Im Gegensatz zum Beispiel zu Ammoniak, das in der Atmosphäre nach kurzer Zeit zerfällt, ist N₂O mit einer mittleren Verweildauer von über 100 Jahren sehr langlebig.

Es entsteht vor allem durch das Zusammenspiel von reaktiven Stickstoffen wie Ammoniak oder Nitrat mit Sauerstoff und Bakterien. Die komplexen Mechanismen dahinter werden als Nitrifikation und Denitrifikation bezeichnet. Sie finden sowohl in stickstoffhaltigen Böden als auch Binnengewässern und Ozeanen statt; das Ausmaß hängt von weiteren Rahmenbedingungen wie vorhandenem Sauerstoff, der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit ab.

Die Mengen natürlicher Lachgasquellen und -senken über Ozeanen und Landflächen werden in der Klimawissenschaft mithilfe von verschiedenen Daten und Modellen erfasst, siehe dazu auch Abschnitt 3.4.

⁷ Siehe dazu auch <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/wirkungen-von-luftschadstoffen/wirkungen-auf-oekosysteme/reaktiver-stickstoff-in-der-umwelt#formen-reaktiven-stickstoffs>.

Abbildung 2: Die wichtigsten Formen von Stickstoff in der Umwelt



Distickstoff (N₂) macht knapp 80 Prozent unserer Erdatmosphäre aus. Die weiteren Formen von Stickstoff werden häufig unter dem Begriff „reaktiver Stickstoff“ zusammengefasst. Lachgas (N₂O) ist der langlebigste reaktive Stickstoff.

Quelle: eigene Darstellung verändert nach an Sutton et al. 2022, Susanne Schödel.

2.3 Anthropogene Quellen von Lachgas

Spätestens seit Anfang des 20. Jahrhunderts prägt der Mensch den Stickstoffkreislauf der Erde spürbar, indem künstlich hergestellter Dünger auf Feldern ausgebracht wird, um die Produktivität bei der Herstellung von Lebensmitteln wie Weizen und Reis zu steigern. Dies wurde durch die beiden deutschen Chemiker Fritz Haber und Carl Bosch möglich, die atmosphärischen Stickstoff und Wasserstoff durch Katalyse zu Ammoniak verarbeiten konnten („Haber-Bosch-Verfahren“). Ammoniak wird zu verschiedenen Formen von Dünger weiterverarbeitet und bringt damit zusätzlichen reaktiven Stickstoff in die Biosphäre. Ein Folgeprodukt ist das klimarelevante Lachgas: Knapp 37 Prozent der globalen Lachgasemissionen in der Zeit von 2010 bis 2019 waren anthropogenen Ursprungs, davon geht mehr als die Hälfte auf stickstoffhaltige Dünger in der Landwirtschaft zurück (Tian et al. 2023a).

Der Einsatz von Dünger in der Landwirtschaft verursacht die Entstehung von Lachgas nicht nur direkt vor Ort, sondern auch indirekt: Ein Teil dieses Stickstoffs wird zum Beispiel durch Niederschläge ausgewaschen und gelangt dann in Wasserläufe, in denen durch bakterielle Prozesse erneut Lachgas entstehen kann (Englisch „leaching“ oder „run-off“).

Auch stickstoffhaltiger Viehdung auf Weiden und die weitere Bearbeitung von Ackerland und Waldflächen verursachen Lachgasemissionen, ebenso Aquakulturen, also die industrielle Fischzucht, sowie Anlagen zur Behandlung von Abwässern.

Eine weitere Quelle von Lachgas ist die Herstellung von Salpeter- und Adipinsäure. Diese Chemikalien sind stickstoffhaltige Zwischenprodukte zum Beispiel für Düngemittel, die Bearbeitung von Metallen und die Herstellung von Kunststoffen wie Nylon.

Lachgas gelangt auch durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen, sowie von Abfall und Biomasse zum Beispiel auf Ackerflächen oder in natürlicher Umgebung in die Atmosphäre (IPCC 2021).

Lachgas wird außerdem im medizinischen Bereich zur Narkose und Schmerzbehandlung zum Beispiel bei Zahnbehandlungen eingesetzt. Auch der Einsatz dieser Art von Lachgas als Rauschmittel in der Drogenszene ist bekannt. N₂O kommt zudem als Lebensmittelzusatz vor, um zum Beispiel, um Sahne aufzuschäumen. Dieses Lachgas wird unter anderem durch thermische Zersetzung von Ammoniumnitrat künstlich hergestellt.

Die hier genannten Arten, in denen Lachgas vorkommt, sind Gegenstand der Treibhausgasbilanzierungen der Länder. Die jährlichen Emissionen werden also von den zuständigen Behörden anhand sogenannter Emissionsfaktoren und spezifischer Daten zu den eingehenden Herstellungs- oder Energiemengen quantifiziert. Referenz hierfür ist die Datenbank für Emissionsfaktoren des IPCC, in der definiert wird, wie die Berechnungen erfolgen⁸. Die Berichterstattung wird durch die Länder in drei verschiedenen Detailtiefen durchgeführt, siehe dazu auch Abschnitt 3.4.1.2.

Lachgas wird auch als Oxidator in Raketenantrieben eingesetzt und beim Verbrennungsprozess in seine Bestandteile Sauerstoff und Stickstoff aufgelöst; diese Verwendung ist für die Betrachtung als Treibhausgas nicht relevant.

2.4 Anthropogene Auswirkungen auf natürliche Lachgasflüsse

Die anthropogenen Emissionen von CO₂ und Methan verändern den natürlichen Stickstoffkreislauf und damit auch die Entstehung von Lachgas:

- ▶ Der Anstieg von CO₂ in der Atmosphäre kann dazu führen, dass das Pflanzenwachstum gestärkt und dadurch mehr Stickstoff gebunden wird, der dann nicht mehr für mögliche Lachgasemissionen zur Verfügung steht.
- ▶ Wälder, die bereits ein hohes Lebensalter erreicht haben – zum Beispiel in den tropischen Regionen –, emittieren aufgrund von biogeochemischen Prozessen Lachgas. Wenn diese „reifen“ Wälder abgeholzt werden, reduziert sich diese Quelle.
- ▶ Die Abholzung von Wäldern, um sie zum Beispiel als Ackerland nutzbar zu machen, führt jedoch dazu, dass diese Böden zusätzliches Lachgas produzieren.
- ▶ Der Klimawandel bringt höhere Durchschnittstemperaturen mit sich. Dies wiederum begünstigt die Entstehung von Lachgas.

Diese Veränderungen werden in der Klimawissenschaft erforscht und anhand von verschiedenen prozessbasierten und datengestützten Modellen des Erdsystems quantifiziert. Diese Modelle bilden die Wechselwirkungen und Veränderungen in den Umweltsystemen der Erde ab. Sie werden in Abschnitt 3.4.1.1. genauer erläutert.

Die zusätzlichen anthropogenen Lachgasemissionen wirken sich außerdem nachteilig auf das lebensschützende Ozon in der Stratosphäre aus. Dort findet aufgrund der ungehinderten Sonneneinstrahlung die sogenannte Photolyse statt, eine chemische Reaktion, in der ein Molekül ein Photon absorbiert und dabei zerfällt. Ozon und Sauerstoff gehen hier verschiedene Verbindungen ein. Lachgas, das durch atmosphärische Strömungen in die Stratosphäre gelangt, zerfällt durch Photolyse ebenfalls. Ein Folgeprodukt ist unter anderem Stickstoffmonoxid (NO), das

⁸ Für weitere Informationen zur Datenbank der Emissionsfaktoren siehe <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/main.php>.

wiederum mit Ozon reagiert und es dadurch abbaut⁹. Je mehr Lachgas also in die Stratosphäre gelangt, desto mehr Ozon wird zerstört.

⁹ Siehe dazu auch <https://www.umweltbundesamt.de/umweltatlas/reaktiver-stickstoff/wirkungen/klima-ozonschicht/wie-wirkt-sich-lachgas-auf-die-stratosphaerische>.

3 Bilanzierung der aktuellen und potenziellen N₂O-Quellen und -Senken

3.1 Vorbemerkung zu den Mengenangaben

Bei der Messung des Gehalts in der Atmosphäre wird der aktuelle Anteil von Lachgas mit der Angabe parts per billion (ppb) erfasst, also als Anzahl der Moleküle pro Milliarde Luftteilchen. Solange dieser atmosphärische Anteil weiter ansteigt, wird auch die Klimawirkung zunehmen. Der Trend kann abgebremsst werden, indem die entsprechenden Emissionen gesenkt werden und damit weniger N₂O in die Atmosphäre gelangt. Für den Klimaschutz ist es wichtig, die Emissionen zuzuordnen und auch einordnen zu können, sowohl im Kontext der Quellen und Senken von Lachgas als auch in Bezug auf CO₂ als wichtigstem Treibhausgas.

Die Menge an Emissionen von Lachgas wird je nach Art der Berichterstattung auf verschiedene Weisen beschrieben und nachfolgend erläutert. Zahlenangaben zu Lachgasemissionen müssen also immer im jeweiligen Kontext betrachtet werden:

- Nationale Treibhausgas-Bilanzen und deren Aggregierung auf regionaler und globaler Ebene bei der EU und der UN: Die Bilanzen beziffern Treibhausgasemissionen grundsätzlich in CO₂-Äquivalenten, da CO₂ den weitaus größten Anteil in den Bilanzen ausmacht. Emissionen der anderen Treibhausgase, also auch von Lachgas, werden also in CO₂-Äquivalente umgerechnet. Der IPCC hat dazu im Jahr 2006 ausführliche Leitlinien veröffentlicht, die 2019 aufgrund neuer Erkenntnisse aktualisiert wurden¹⁰. Für Lachgas ist zum Beispiel Stickstoff in der Landwirtschaft ein wesentlicher Verursacher. Eine Tonne Stickstoff in Form von Dünger hat unter bestimmten Bedingungen einen N₂O-Emissionsfaktor von einem Prozent, führt also zu einer Emission von zehn Kilogramm Lachgas. Da in den Bilanzen immer CO₂ die Bezugsgröße ist, werden die N₂O-Mengen dann mit dem Faktor für das sogenannte Global Warming Potential über einen Zeitraum von 100 Jahren (GWP-100) multipliziert und damit als CO₂-Äquivalente angegeben. Im Fünften Sachstandsbericht des IPCC aus dem Jahr 2013 wird das GWP-100 für Lachgas mit 265 beziehungsweise 298 angegeben; der zweitgenannte Wert bezieht Rückkopplungseffekte im sich verändernden Klimasystem ein. Der Sechste Sachstandsbericht, der 2021 veröffentlicht wurde, geht von einem etwas veränderten GWP-100 von 273 (± 130) aus (IPCC 2021). Die Autor*innen führen dies auf neue Erkenntnisse zur Verweildauer und den indirekten chemischen Effekten im Erdsystem zurück. In den nationalen Treibhausgas-Inventaren wie dem des Umweltbundesamts für Deutschland¹¹ wird zurzeit gemäß internationalen Konventionen weiterhin der Umrechnungsfaktor aus dem Fünften Sachstandsbericht verwendet: Eine Tonne N₂O entspricht damit also 265 Tonnen CO₂-Äquivalenten. Generell können die Mengenangaben in Treibhausgasbilanzen also erst dann mit den Angaben zu N₂O-Emissionen an anderen Stellen verglichen werden, wenn die CO₂-Äquivalente für Lachgas wieder entsprechend zurückgerechnet werden.
- Teragram, Mega- und Gigatonnen: Für die Quantifizierung von Lachgasemissionen über alle Arten von Quellen und Senken hinweg werden die Mengen von N₂O-Emissionen in englischsprachigen Publikationen häufig in „Teragram“ angegeben – ein Teragram sind eine Million Tonnen beziehungsweise eine Megatonne (Mt). Zum Vergleich: Für CO₂ werden die

¹⁰ Für weitere Informationen zu den Leitlinien des IPCC: <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>.

¹¹ <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#emissionsentwicklung>.

wesentlich größeren Mengen direkt in „Gigatons“ angegeben – eine Gigatonne (Gt) sind eine Milliarde Tonnen.

- **Stickstoff und Lachgas:** In wissenschaftlichen Publikationen speziell zu Lachgas werden die Emissionen standardmäßig als Menge von N₂O-N pro Jahr angegeben, also als jährliche Menge an Stickstoff (N), die in N₂O enthalten ist. Eine Megatonne beziehungsweise eine Million Tonnen N₂O-N pro Jahr entsprechen 1,57 Millionen Tonnen N₂O pro Jahr. Wollte man diese Menge mit CO₂-Emissionen vergleichen, müsste dieser Wert – wie bereits erläutert – mit dem Faktor 265 (GWP-100) multipliziert werden, und ergäbe dann 416,05 Mt CO₂. Für die Lesbarkeit des hier vorgelegten Berichts sind die Lachgasmengen durchgängig in Megatonnen N₂O-N angegeben.

3.2 Beschreibung von Prozessen

Unter Emissionen wird generell die Abgabe von Substanzen in die Atmosphäre verstanden; sie werden durch eine Vielzahl von Faktoren in ihren Mengen beeinflusst. Daher werden in den Studien Emissionen nicht nur quantifiziert, sondern auch die dynamischen Prozesse analysiert, durch die Lachgas entsteht. Im Englischen werden diese übergreifend als „fluxes“ (Deutsch: Flüsse) zusammengefasst. Damit werden also die Quellen und Senken von Lachgas und die Übergänge dazwischen bezeichnet. Im Kontext dieses Berichts werden Wasserläufe, die auch N₂O-Quellen sein können, daher nicht als Flüsse, sondern als Fließgewässer bezeichnet, um Verwechslungen zu vermeiden.

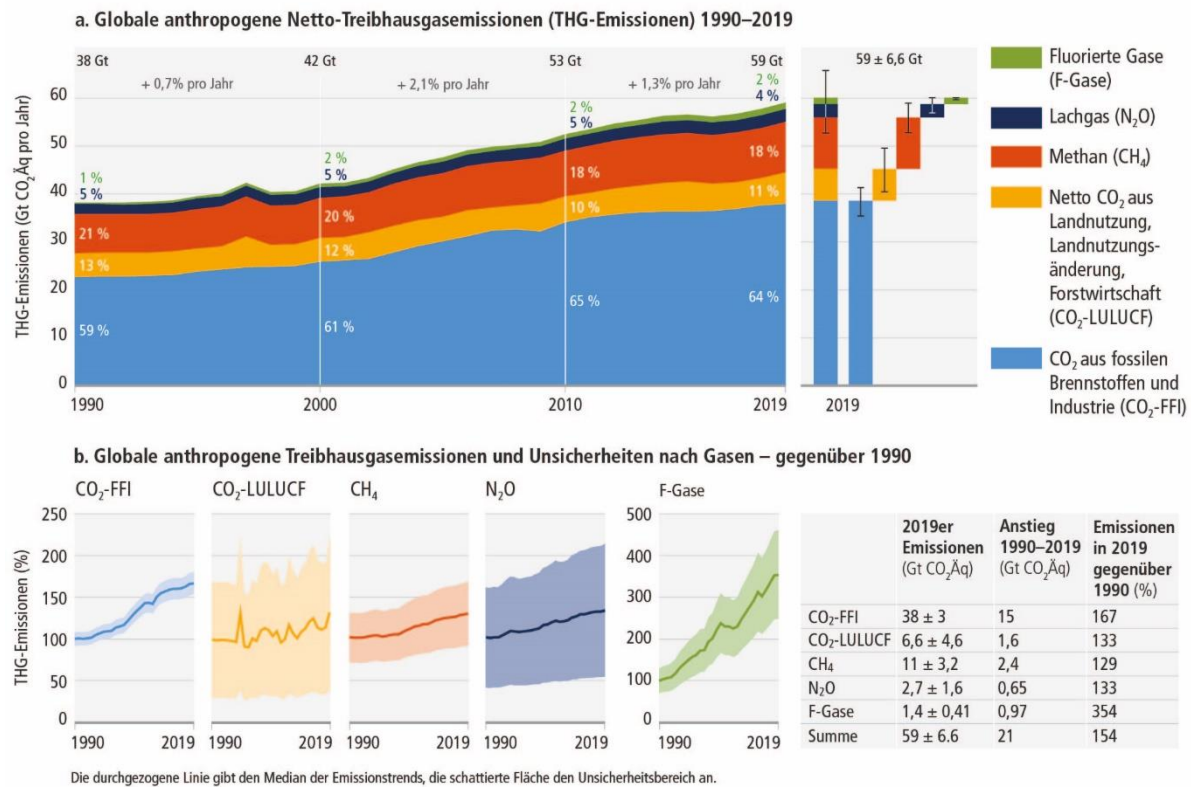
3.3 Lachgas im Verhältnis zu den weiteren anthropogenen Treibhausgasen

Für eine erste Einordnung von Lachgas im Verhältnis zu den anderen Treibhausgasen, die Gegenstand des Pariser Klimaabkommens sind, ist die folgende Übersicht über anthropogene Treibhausgasemissionen aus dem Sechsten Sachstandsbericht des Weltklimarats hilfreich (Abbildung 3). Lachgas wurde hier gemäß internationalem Standard in CO₂-Äquivalente umgerechnet.

Für das Jahr 2019 werden Lachgasemissionen in Höhe von 2,7 Gigatonnen CO₂-Äquivalenten mit einem Unsicherheitsbereich von plus/minus 1,6 Gt angegeben. Das entspricht, wie im vorherigen Abschnitt erläutert, etwas mehr als zehn Mt N₂O-Emissionen (geteilt durch den GWP-100 von 265), sowie 6,5 Mt N₂O-N (Umrechnungsfaktor 1,57). Der Unsicherheitsbereich liegt bei umgerechnet plus/minus 3,8 Mt N₂O-N. Auf diese Zahlen wird im Abschnitt 3.5.1 nochmals eingegangen, um sie mit den Ergebnissen zu den anthropogenen Emissionen im Globalen N₂O-Budget zu vergleichen.

Abbildung 3: Die globalen anthropogenen Nettoemissionen der wichtigsten Treibhausgase steigen laut Weltklimarat weiterhin an

Die globalen anthropogenen Netto-Emissionen sind in allen bedeutenden Treibhausgasgruppen weiter gestiegen.



Die Abbildung zeigt die gesamten globalen anthropogenen Treibhausgasemissionen in Gt CO₂-Äquivalenten pro Jahr von 1990 bis 2019, und ist dem Sechsten Sachstandsbericht des Weltklimarats aus dem Jahr 2022 entnommen. Die dargestellten Emissionen umfassen CO₂ aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe und aus industriellen Prozessen (CO₂-FFI), CO₂ aus Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft einschließlich etwaiger Senken (CO₂-LULUCF), Methan (CH₄), Lachgas (N₂O) und fluorierte Gase (H-FKW; PFC, SF₆, NF₃). Lachgas ist in dunkelblau angezeigt. Es ist deutlich zu erkennen, dass

- 1.) Lachgas mengenmäßig einen geringen Anteil – knapp fünf Prozent – im Verhältnis zu CO₂ und CH₄ hat,
- 2.) die anthropogenen Lachgasemissionen seit 1990 kontinuierlich ansteigen und
- 3.) der Unsicherheitsbereich insbesondere bei Lachgas relativ groß ist. Gründe sind unter anderem Datenlücken und Schwierigkeiten, die Verursacher und die Mengen ausreichend genau benennen zu können.

Quelle: Originalgrafik aus IPCC (2021), übersetzt durch die Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle (IPCC 2022c).

3.4 Vorbemerkung zu den Datenquellen

Für die Berechnung von Emissionsmengen werden sogenannte Bottom-up- (BU) sowie Top-down-Ansätze (TD) angewendet. Die Bottom-up-Schätzungen beruhen auf der empirischen Hochskalierung von Punktmessungen, Treibhausgasinventaren und dynamischen Modellsimulationen. Top-down-Schätzungen basieren auf atmosphärischen Messungen und sogenannten inversen Modellen, in die Annahmen über den atmosphärischen Transport von Luftmassen einfließen (IPCC 2021).

Der folgende Abschnitt 3.4.1. beschreibt die Grundlagen für Bottom-up-Daten, Abschnitt 3.4.2 jene für Top-down-Daten.

3.4.1 Bottom-up-Daten

3.4.1.1 Erdsystemmodelle

Erdsystemmodelle sind aus Modellen entstanden, die Anfang des 20. Jahrhunderts erstellt wurden, um das aktuelle Wetter zu simulieren und daraus Vorhersagen für die folgenden Tage abzuleiten. Der Einzug immer leistungsfähigerer Computer ermöglichte es dann seit den 1960er Jahren, erste Atmosphäre-Ozean-Modelle der Erde zu entwickeln und diese für längerfristige Analysen zu nutzen (Englisch General Circulation Models, GCM). Die Modelle spannen ein dreidimensionales Gitternetz von Datenpunkten über die Erde, für die im zeitlichen Verlauf Messgrößen wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck und Windgeschwindigkeiten berechnet und prognostiziert werden. Seit etwa 2010 enthalten Erdsystemmodelle auch Daten zu Landoberflächen, zur Vegetation, zum Kohlenstoffkreislauf und weiteren Bestandteilen des Klimasystems. Sie ermöglichen es, die unterschiedlichen Aus- und Wechselwirkungen von Variablen wie der Sonneneinstrahlung, Aerosolen und Treibhausgasen zu untersuchen (IPCC 2021).

Für diese Modelle zeichnen mehrere Forschungseinrichtungen und -konsortien verantwortlich, die unterschiedliche Schwerpunkte setzen, zum Beispiel bei den verwendeten Eingangsdaten, der räumlichen Auflösung des Modells oder den Parametern, die das Modell beeinflussen. Die Ergebnisse der Modellrechnungen fallen dadurch unterschiedlich aus. Um diese zu vergleichen, entstanden in einem nächsten Schritt sogenannte internationale Klimamodellvergleichsprojekte vor allem für den Kohlenstoffkreislauf sowie für Methan. Das gängigste Projekt ist das „CMIP“ – Coupled Model Intercomparison Project –, das den jeweils aktuellen Stand der Wissenschaft berücksichtigt, um die Modelle zu vergleichen und die Ergebnisse einzuordnen. Diese fließen unter anderem in die Sachstandsberichte des Weltklimarats ein. Das aktuelle Klimamodellvergleichsprojekt wird als CMIP6 bezeichnet, da es in der sechsten Phase durchgeführt wird. Diese Modelle werden inzwischen seit einigen Jahrzehnten angewendet. Dadurch ist es auch möglich, sie mit den tatsächlichen Entwicklungen zu vergleichen und so weitere Anhaltspunkte zu erhalten, wie realistisch ein Modell ist und wie es verbessert werden könnte (Gidden et al. 2019, IPCC 2021).

Im Vergleich zu CO₂ und CH₄ hat die Entwicklung von Modellen für den Stickstoffkreislauf und Lachgas als Treibhausgas erst spät eingesetzt. Die Herausforderungen bestanden unter anderem darin, dass diese Emissionen je nach Bodenart und Zeiträumen sehr stark variieren und in globalen Modellen daher schwer reproduziert werden können. Die Modelle unterscheiden sich auch darin, wie sie den Stickstoffkreislauf und den Einfluss von Umweltfaktoren sowie biophysikalischen Eigenschaften abbilden. Analog zu den Vergleichsprojekten für CO₂ und Methan hat ein Forschungskonsortium ab dem Jahr 2014 das „NMIP“ – N₂O Model Intercomparison Project – ins Leben gerufen, das die vorhandenen Modelle für Lachgas vergleicht (Tian et al. 2018). Für das hier vorgestellte Globale N₂O-Budget läuft die zweite Phase des Vergleichsprojekts unter dem Titel „NMIP2“. Darin werden anhand von acht Modellen Schätzungen der Lachgasemissionen aus natürlichen und landwirtschaftlichen Böden für die Jahre 1850 bis 2020 berechnet. Sie berücksichtigen auf unterschiedliche Weise die relevanten Prozesse, in denen Stickstoff in Lachgas umgewandelt wird, zum Beispiel durch den Einsatz von Dünger sowie die Nitrifikation und Denitrifikation (Tian et al. 2023a).

Für die Emissionen aus Ozeanen werden im Globalen N₂O-Budget vier globale biogeochemische beziehungsweise klassische Erdsystemmodelle verwendet, die die Entstehung, den Abbau und die Zirkulation von ozeanischem Lachgas simulieren¹².

¹² Die Kurzbezeichnungen werden in Tabelle 2 auf Seite 40 aufgeführt.

Außerdem werden erstmals die Regionen der Kontinentalschelfe oder auch Festlandssockel als Lachgasquelle analysiert. Sie reichen von der Küste bis zu einer Linie in 300 Kilometern Abstand in den Meeren. Die Emissionen werden mit Hilfe von drei hochauflösenden Modellen und einer Datenbank berechnet, die die relevanten (Lachgas-)Messwerte von der Meeresoberfläche enthält¹³.

Die Modelle werden beständig weiterentwickelt und verbessert. Dazu haben die am NMIP beteiligten Wissenschaftler*innen 2020 Vorschläge veröffentlicht, die verdeutlichen, wie komplex diese Methode der Quantifizierung von Lachgasemissionen ist:

- ▶ Die biogeochemischen Prozesse würden in den Modellen bereits gut berücksichtigt, aber Frost- und Tauzyklen oder Störungen der Ökosysteme, die zu N₂O-Emissionen führen können, seien bisher nicht Bestandteil der Modelle.
- ▶ N₂O-Emissionen aus Böden könnten präziser simuliert werden, wenn die Eingangsdaten eine bessere Qualität hätten. In die Modelle sollten zum Beispiel die Menge und der Zeitpunkt von Stickstoffdüngungen aufgenommen werden sowie räumliche und zeitliche Veränderungen bei der sogenannten Landbedeckung, wenn etwa natürliche Vegetation in Ackerland umgewandelt wird.
- ▶ N₂O-Flussmessungen an einzelnen Standorten aus nationalen und globalen Netzwerken von Messstationen und -kampagnen könnten dazu verwendet werden, um die Qualität der Modelle zu validieren, und groß angelegte Modellsimulationen zu überprüfen (Tian et al. 2020).

Auch für die globalen Ozeanmodelle und deren Schätzung von N₂O-Emissionen gilt aus Sicht der Wissenschaft, dass diese weiter verbessert werden müssen, unter anderem mithilfe umfassenderer Messdaten (Bange 2022). Denn in den Ozeanen kann Lachgas durch viele verschiedene, zeitlich und räumlich unterschiedlich verteilte Faktoren entstehen: In einer sauerstoffreichen Meeresregion fällt Lachgas als Nebenprodukt an, wenn Ammonium zu Nitrat oxidiert wird. Wenn das Meerwasser jedoch wenig oder gar keinen Sauerstoff enthält, kann durch Denitrifikation von Nitrat zu gasförmigem Stickstoff in verschiedenen Phasen sowohl Lachgas erzeugt als auch abgebaut werden. Daher zeigen die Modelle eine sehr hohe Variabilität bei den Lachgasmengen an, und die Unsicherheiten in den Modellrechnungen sind für bestimmte Regionen der Ozeane höher als für andere (Tian et al. 2023a und 2023b).

3.4.1.2 Nationale Treibhausgas-Inventare und deren Aggregation auf internationaler Ebene

Die Nationalen Treibhausgasinventare zeichnen anthropogene Emissionen einschließlich Lachgas auf und werden jährlich durch die Regierungen der jeweiligen Länder anhand von international gültigen Richtlinien erstellt. Grundlage sind unter anderem die Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen von 1992, das 2005 in Kraft getretene Kyoto-Protokoll, sowie das Pariser Klimaabkommen aus dem Jahr 2015. Darin verpflichten sich die teilnehmenden Nationen, ihre Treibhausgasemissionen so zu reduzieren, dass die Erderwärmung auf deutlich unter zwei Grad Celsius gegenüber der vorindustriellen Zeit beschränkt wird. Als Bezugsgröße gelten mehrheitlich die Emissionen aus dem Jahr 1990. Um die Fortschritte zu dokumentieren, ist eine regelmäßige Berichterstattung über die anthropogenen Emissionsquellen und -senken notwendig.

¹³ Die Kurzbezeichnungen hierfür werden in Tabelle 2 auf Seite 40 aufgeführt.

Die derzeit gültigen Richtlinien zur nationalen Treibhausgas-Berichterstattung (Englisch „IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories“¹⁴) wurden erstmalig 2006 veröffentlicht, und 2019 ergänzt (Englisch „2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories“¹⁵). Verpflichtend anzuwenden ist die erste Ausgabe aus dem Jahr 2006. Die Anleitung für die Berichterstattung umfasst jeweils fünf Bände und deckt die anthropogenen Emissionen untergliedert in folgende Bereiche ab:

- ▶ Energie,
- ▶ Industrielle Prozesse und Verwendung von Produkten,
- ▶ Landwirtschaft, Forstwirtschaft und weitere Landnutzungsarten (Englisch „Agriculture, Forestry and Other Land Use“, abgekürzt AFOLU),
- ▶ Abfälle.

Die Emissionen werden überwiegend anhand von Verbrauchs- und Aktivitätsdaten sowie Emissionsfaktoren berechnet. Diese sind je nach Treibhausgas und Bereich unterschiedlich. Für die Nationale Berichterstattung werden die quantitativen Informationen in vereinheitlichten Tabellen (Englisch „Common Reporting Tables“) erfasst. Sie ermöglichen, dass die Emissionen von Land zu Land vergleichbar sind. Die Länder dokumentieren außerdem die Methoden, die bei der Berechnung angewendet wurden, ihre Datenquellen und Anpassungen im Vergleich zu vorherigen Berichten¹⁶.

Die 198 Länder, die sowohl das Kyoto-Protokoll als auch das Pariser Klimaabkommen ratifiziert haben, stellen ihre Treibhausgas-Inventare nicht alle in derselben Detailtiefe zur Verfügung. Das ist historisch bedingt: 1992 haben sich zunächst die sogenannten entwickelten Länder zur detaillierten Berichterstattung verpflichtet. Sie werden als Annex I-Parteien bezeichnet. Aktuell gehören 42 Staaten, darunter auch Deutschland, sowie die EU als Staatenbund dazu¹⁷. Die eingereichten Berichte sind online bei den Vereinten Nationen abrufbar¹⁸.

Parallel dazu haben internationale Organisationen und Forschungskonsortien Emissionsdaten der Länder in weiteren Datenbanken zusammengeführt. Sie beruhen teils auf den nationalen Inventaren, teils auf eigenen Berechnungen, und beziehen sich auch aufeinander. Gründe sind unter anderem, regionale Auswertungen zu ermöglichen, oder bestimmte Bereiche, zum Beispiel die Landwirtschaft, genauer zu analysieren.

Der IPCC hat 2022 eine Übersicht über die bis dahin bestehenden globalen, regionalen und nationalen Inventare von Treibhausgasemissionen veröffentlicht, die wiederum in einem Datensatz zusammengeführt wurden (IPCC 2022b und Minx et al. 2021). Demnach gab es bis 2019 insgesamt 22 Inventare mit verschiedener geographischer Reichweite und unterschiedlichem zeitlichem Horizont. Elf davon erfassen auch Lachgas:

- ▶ UNFCCC-CRF – die bereits beschriebene Berichterstattung an die Vereinten Nationen (Englisch „UNFCCC Annex I Party GHG Inventory Submission“),

¹⁴ Online abrufbar unter <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>.

¹⁵ Online abrufbar unter <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html>.

¹⁶ Für weitere Informationen siehe <https://unfccc.int/process-and-meetings/transparency-and-reporting/reporting-and-review-under-the-convention/greenhouse-gas-inventories-annex-i-parties/reporting-requirements>.

¹⁷ <https://unfccc.int/process/parties-non-party-stakeholders/parties-convention-and-observer-states>

¹⁸ <https://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2023>.

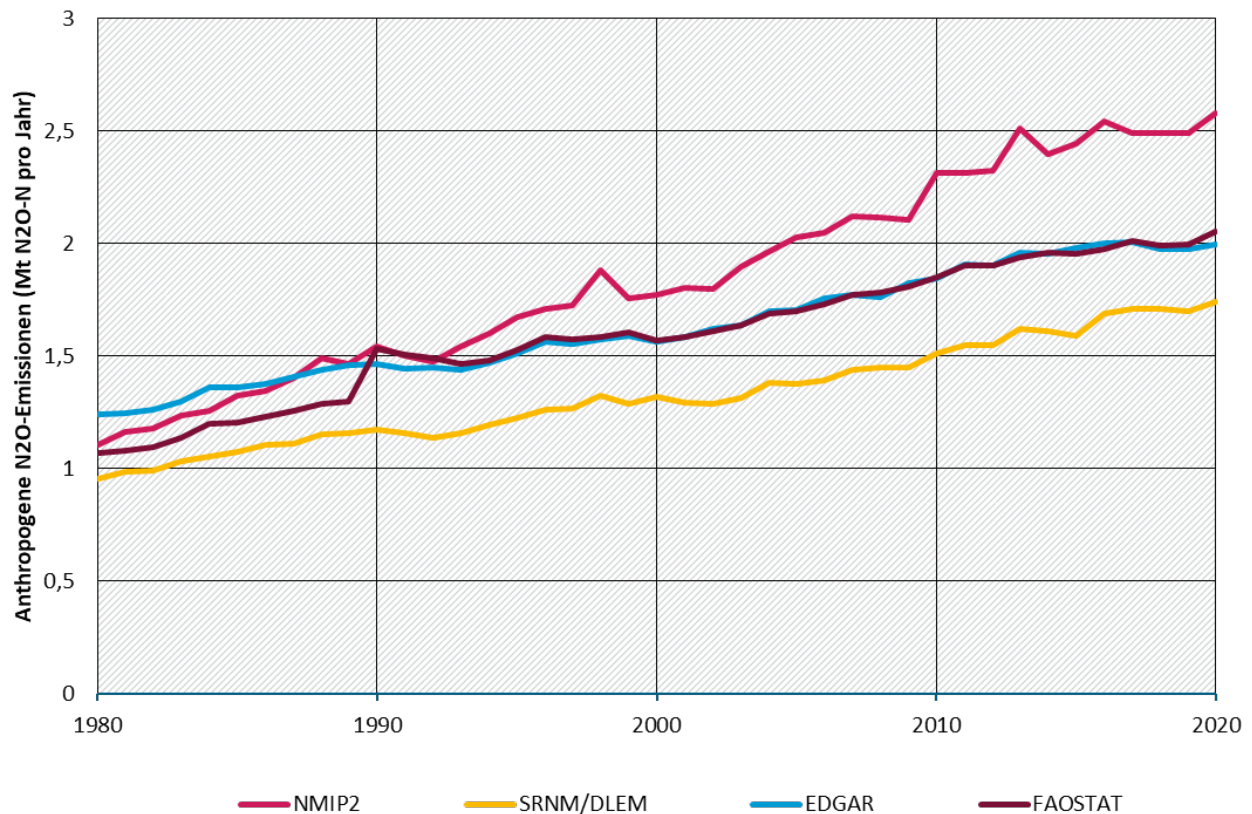
- ▶ EDGAR – „Emissions Database for Global Atmospheric Research“ der Europäischen Union,
- ▶ PRIMAP-hist – „Potsdam Real-time Integrated Model für probabilistic Assessment of emission Paths“ des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung,
- ▶ CEDS – „Community Emissions Data System“ des Energieministeriums der Vereinigten Staaten,
- ▶ GAINS – „The Greenhouse gas – Air pollution Interactions and Synergies Model“,
- ▶ US-EPA – „EPA-Global Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions“ der Umweltschutzbehörde der Vereinigten Staaten,
- ▶ FAOSTAT – „FAOSTAT – Emissions Totals“ von der Welternährungsorganisation (Englisch „Food and Agriculture Organization“, FAO), das Inventar enthält Emissionen ausschließlich zu Landwirtschaft, Forstwirtschaft und weiteren Landnutzungsarten, unterteilt in 15 Bereiche,
- ▶ vier Datenbanken, die Emissionen aus Bränden bis zum Jahr 2016 quantifizieren, darunter auch die „Global Emissions Fire Database“ (GFED),
- ▶ sowie das „Global Nitrous Oxide Budget“ des Global Carbon Project (GCP), das hier vorgestellt wird, weil es das derzeit umfassendste Inventar speziell für Lachgas ist. Es bezieht für die Analyse der anthropogenen Emissionen und Senken die hier genannten Datenbanken UNFCCC-CRF, EDGAR, FAOSTAT und GFED mit ein.

Während FAOSTAT und UNFCCC-CRF Daten auf Länderebene enthalten, stellen Datenbanken wie EDGAR und GFED die Daten mit hoher räumlicher Auflösung dar, um damit Emissionsquellen lokalisieren zu können und die Modellierung durch Forschungsprojekte zu erleichtern. Das entsprechende Gitternetz von EDGAR zum Beispiel enthält Datenpunkte je 0,1° mal 0,1° Grad, das entspricht einer Auflösung von etwas mehr als elf mal elf Kilometern.

Die Datenbanken kommen je nach Eingangsdaten und Methodik zu verschiedenen Ergebnissen. So zeigt ein Vergleich von vier globalen N₂O-Bilanzen (EDGAR, GCP, GAINS, FAOSTAT) eine Bandbreite von 8,8 bis 11,9 Mio. Tonnen N₂O anthropogener Emissionen für 2015 (Abbildung 4). Das entspricht umgerechnet 5,6 bis 7,58 Mt N₂O-N. Die größten Diskrepanzen bestehen in den Daten aus der Landwirtschaft, weil zum Beispiel Emissionen aus gedüngten Böden oder ausgebrachter Gülle kaum mengenmäßig genau erfasst werden können. Auch die biogeochemischen Abläufe, die zu Emissionen aus dem Boden führen, sind bisher für Lachgas nicht so gut erforscht wie für CO₂ oder Methan (IPCC 2022b).

Abbildung 4: Bandbreite verschiedener Datenquellen am Beispiel der Kategorie „direkte Bodenemissionen“ aus der Landwirtschaft

Vergleich der Datenquellen NMIP2, SRNM/DLEM, EDGAR, FAOSTAT.



Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Tian et al. 2023a, Susanne Schödel.

3.4.1.3 Einordnung der Bottom-up-Daten

Aus Sicht der Wissenschaft geben insbesondere nationale Inventare und deren Aufsummierung zu einer globalen Übersicht kein vollständiges Bild ab, weil natürliche N₂O-Quellen unberücksichtigt bleiben und die Methodik zur Zuordnung sowie die Berechnung von anthropogenen Quellen nur eingeschränkt funktioniert (Tian et al. 2020).

Aus der Beschreibung der Methodik bei Erdsystemmodellen und Treibhausgasinventaren wird ebenso ersichtlich: Anthropogene Emissionen können global und regional nicht eindeutig benannt werden können, sondern nur mithilfe von Bandbreiten zwischen Minimal- und Maximalwerten aus den verschiedenen Datenquellen sowie den Mittelwerten daraus.

Um einen weiteren Anhaltspunkt für die tatsächlichen Emissionen zu erhalten, werden in den Analysen des Weltklimarats wie auch des Globalen N₂O-Budgets diese Bottom-up-Werte durch sogenannte Top-down-Daten ergänzt.

3.4.2 Top-down-Daten

Top-down-Analysen kombinieren Messungen von N₂O-Anteilen in der Luft mit atmosphärischen Inversionsmodellen, die den weiteren Transport und Verbleib in den unteren Schichten der Erdatmosphäre berechnen. Dazu zählen die Troposphäre, die vom Erdboden bis etwa zwölf Kilometer Höhe reicht, und die daran anschließende Stratosphäre, die 50 Kilometer über dem Erdboden endet. Diese ist für die Berechnungen relevant, da hier wesentliche Mengen Lachgas

abgebaut werden, die Stratosphäre also eine Senke für Lachgas ist. Wie bereits unter 2.4 erläutert, wird dabei allerdings das lebenswichtige Ozon zerstört.

Für das Globale N₂O-Budget haben die Autor*innen vier voneinander unabhängige Inversionsmodelle verwendet, die in der Zeit von 2014 bis 2022 publiziert wurden und Berechnungen für die Zeit ab 1997 enthalten (Tian et al. 2023a).

3.4.2.1 Einordnung der Top-down-Daten

Auch die Top-down-Daten liefern keine eindeutigen Zahlen, sondern eine Bandbreite von Werten je nach Modell. Für das Globale N₂O-Budget werden daher auch hier lediglich Mittelwerte mit Unsicherheiten angegeben. Top-down-Berechnungen unterscheiden nicht zwischen anthropogenen und natürlichen Verursachern von Lachgasemissionen.

Ungenauigkeiten entstehen unter anderem aufgrund von systemischen Fehlern bei der Modellierung der atmosphärischen Verteilung von N₂O und der Stratosphäre als Senke. Sie kann nur durch Messungen in Verbindung mit atmosphärischen Modellen präzisiert werden und nicht durch Bottom-up-Methoden, in denen zum Beispiel Stickstoffmengen am Erdboden mit Emissionsfaktoren umgerechnet werden.

Die Inversionsmodelle sind auch abhängig von vorher zugrunde gelegten Messungen der Lachgasflüsse am Boden, also der Austauschprozesse zwischen Boden und Luft. Sie variieren aufgrund klimatischer und geographischer Bedingungen regional und zeitlich stark, und könnten nur durch ein dichtes Messnetz erfasst werden. Allerdings fehlen hier Standorte für kontinuierliche Messungen von Lachgas vor allem in Afrika, Südost-Asien, im südlichen Südamerika und über den Ozeanen.

Für genauere Daten müssen also sowohl die Modelle und die Schätzungen der Lachgasflüsse weiter deutlich verbessert werden, als auch mehr Messdaten zur Verfügung stehen (Reay et al. 2012, Smith 2017, Tian et al. 2020).

3.5 Das Globale N₂O-Budget

Das hier präsentierte Globale N₂O-Budget ist vom Global Carbon Project (GCP) entwickelt worden und wird auch in den Sachstandsberichten des Weltklimarats zitiert. Das GCP ist ein weltweites Forschungsprojekt der Organisation „Future Earth“ in Kooperation mit dem Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP). GCP ist außerdem Forschungspartner des „World Climate Research Programme“, das wiederum von der Weltmeteorologischen Organisation (WMO) unterstützt wird. Die International Nitrogen Initiative war ebenfalls an der Erstellung des Globalen N₂O-Budgets beteiligt.

Das N₂O-Budget wurde im Jahr 2020 zum ersten Mal veröffentlicht und drei Jahre später aktualisiert sowie erweitert. Es enthält alle verfügbaren Daten seit 1980 und gliedert diese nach insgesamt elf Kategorien anthropogener sowie natürlicher Quellen und Senken. Mithilfe der verwendeten Daten und Modelle berücksichtigt das N₂O-Budget die Wechselwirkungen zwischen zusätzlichem Stickstoff und den biochemischen Prozessen, die N₂O-Emissionen beeinflussen.

Diese Präsentation der globalen Lachgasemissionen ist insofern einzigartig, als sie die verschiedenen Bottom-up- und Top-down-Daten vergleicht, die Bandbreite der Werte aufzeigt und im Sinne einer Metaanalyse ein umfassendes Lachgas-Budget präsentiert, das 40 Jahre umfasst und eine globale wie auch regionale Analyse ermöglicht.

Auf der Bottom-up-Seite fließen Emissionsdaten aus aggregierten nationalen Treibhausgas-Inventaren ein, sowie die räumliche Modellierung von gemessenen Lachgasflüssen, die

Modellierung des Stickstoffhaushalts und die prozessbasierte Modellierung der Flüsse an Land und im Meer. Die verschiedenen Datenquellen sind im Abschnitt 3.3 erläutert worden.

Die Bottom-up-Schätzungen für anthropogene Lachgasflüsse werden in vier Kategorien mit insgesamt 14 Unterkategorien eingeteilt (Tabelle 1).

Tabelle 1: Übersicht über die Kategorien anthropogener Lachgasflüsse und deren Datenquellen im Globalen N₂O-Budget (Bottom-up)

Anthropogene Lachgasflüsse		Datenquellen
1. Landwirtschaft	Direkte Bodenemissionen	NMIP2, SRNM/DLEM, EDGAR, FAOSTAT
	Viehdung auf Weideland	DLEM, EDGAR, FAOSTAT
	Düngemittelmanagement	EDGAR, FAOSTAT
	Aquakulturen	Anwendung von drei Emissionsfaktoren 0,5%, 1,8%, 5%
2. Andere direkte anthropogene Quellen	Fossile Brennstoffe und Industrie	EDGAR, UNFCCC/EDGAR
	Abfall und Abwasser	EDGAR, UNFCCC/EDGAR
	Verbrennung von Biomasse	DLEM, FAO, GFED
3. Indirekte Emissionen durch anthropogene Stickstoffeinträge	Binnengewässer, Ästuare, Küstenvegetation	Prozessbasierte Modelle, EDGAR, FAOSTAT
	Atmosphärische Stickstoffdeposition auf Landflächen	EDGAR/NMIP2, NMIP2
	Atmosphärische Stickstoffdeposition auf Ozeanen	Suntharalingam et al. 2012
4. Gestörte Lachgasflüsse durch Klima/CO ₂ /Landbedeckungsänderung	Auswirkung durch CO ₂ -Anstieg	CLASSIC, DLEM, ELM, ISAM, LPXBern, OCN, ORCHIDEE, VISIT
	Auswirkung durch Klimawandel	CLASSIC, DLEM, ELM, ISAM, LPXBern, OCN, ORCHIDEE, VISIT
	Pulswirkung nach Entwaldung	DLEM, empirische Berechnungen
	Langzeitwirkung durch reduzierte reife Waldflächen	DLEM, empirische Berechnungen

Die Akronyme werden, soweit verfügbar, im Abkürzungsverzeichnis erläutert.

Quelle: eigene Darstellung auf Grundlage von Tian et al. 2023a, Susanne Schödel.

Bei den Bottom-up-Daten werden außerdem sechs Kategorien von Lachgasflüssen unterschieden, die nicht weiter unterteilt werden (Tabelle 2).

Tabelle 2: Übersicht über die Gruppen natürlicher Lachgasflüsse und deren Datenquellen (Bottom-up)

Natürliche Lachgasflüsse	Datenquellen
5. Natürliche Böden (Baseline)	CLASSIC, DLEM, ELM, ISAM, LPXBern, OCN, ORCHIDEE, VISIT
6. Offener Ozean (Baseline)	BERN-3D, NEMOv3.6-PISCESv2-gas, UVic2.9, NEMO-PlankTOM10.2
7. Kontinentalschelfe	MEM-RF, CNRM-0.25°, ECCO-Darwin und ECCO2-Darwin
8. Binnengewässer, Ästuare, Küstenvegetation	Unter anderem Modelle auf Basis von DLEM, Meta-Analyse von gemessenen N ₂ O-Flüssen
9. Blitze und atmosphärische Entstehung	Synthese aus publizierten Werten in wissenschaftlicher Literatur
10. Oberflächensenke (Böden, Feuchtgebiete)	Synthese aus publizierten Werten in wissenschaftlicher Literatur

Die Akronyme werden, soweit verfügbar, im Abkürzungsverzeichnis erläutert.

Quelle: eigene Darstellung auf Grundlage von Tian et al. 2023a, Susanne Schödel.

Daneben werden die Ergebnisse von Top-down-Analysen gestellt. Wie bereits erwähnt, kombinieren sie Messungen von N₂O-Anteilen in der Luft mit atmosphärischen Inversionsmodellen. Sie bieten einen Anhaltspunkt, ob die Lachgasemissionen aus den Bottom-up-Berechnungen realistisch sind. Geringe Abweichungen zwischen den beiden Arten der Kalkulation deuten darauf hin, dass die Datengrundlage gut genug ist, um eine realistische Schätzung der Emissionen zu erhalten (Tabelle 3).

In der Top-down-Analyse des Globalen N₂O-Budgets wird auch die große stratosphärische Senke für Lachgas quantifiziert; diese Daten sind erst ab 1997 verfügbar. Sie können durch Ergebnisse aus Satellitenmessungen und einem speziellen Modell überprüft werden, das die Aufspaltung von Ozon durch N₂O abbildet (Fachbegriff „Photolyse“). Dies ist seit 2005 technisch und methodisch möglich.

Tabelle 3: Übersicht über Top-down-Berechnungen der Lachgasflüsse

Kategorie	Datenquellen
Landflächen	INVICAT, PyVAR-CAMS, MIRO4-ACTM, GEOS-Chem
Ozeane	
11. Stratosphärische Senke	
Zum Vergleich: Atmosphärisch-chemisches Transportmodell	Satellitenmessungen und Photolysemodell

Die Akronyme werden, soweit verfügbar, im Abkürzungsverzeichnis erläutert.

Quelle: eigene Darstellung auf Grundlage von Tian et al. 2023a, Susanne Schödel.

Über alle anthropogenen und natürlichen Lachgasflüsse wird anschließend die Bilanz gebildet, aus der auch die Gesamtmenge an jährlichen Lachgasemissionen ersichtlich wird.

Tabelle 4: Bilanz der anthropogenen und natürlichen Lachgasflüsse (Bottom-up und Top-down)

Lachgasflüsse	Datenquellen
Anthropogen (BU)	Mittelwerte der Gruppen 1 bis 4 aus den verschiedenen Datenquellen
Natürlich (BU)	Mittelwerte der Gruppen 5 bis 10 aus den verschiedenen Datenquellen
Summe N ₂ O-Emissionen (BU)	Summe aus den vorgenannten anthropogenen und natürlichen Lachgasflüssen (BU)
Zum Vergleich: Summe N ₂ O-Emissionen (TD)	Summe aus anthropogenen und natürlichen Lachgasflüssen (TD)
Abzüglich stratosphärischer Senke	Mittelwert aus den verschiedenen Modellen der Gruppe 11
Rechnerisches Ergebnis: Nettoemissionen pro Jahr	Summe der N ₂ O-Emissionen (Gruppen 1 bis 10) abzüglich stratosphärischer Senke (Gruppe 11)
Zum Vergleich: Veränderung des atmosphärischen Vorkommens	Berechnung anhand der Messwerte von Bodenmessstationen: Aus der Erhöhung des Anteils von Lachgas innerhalb eines Jahres kann die Menge an globalen Lachgasemissionen abgeleitet werden.

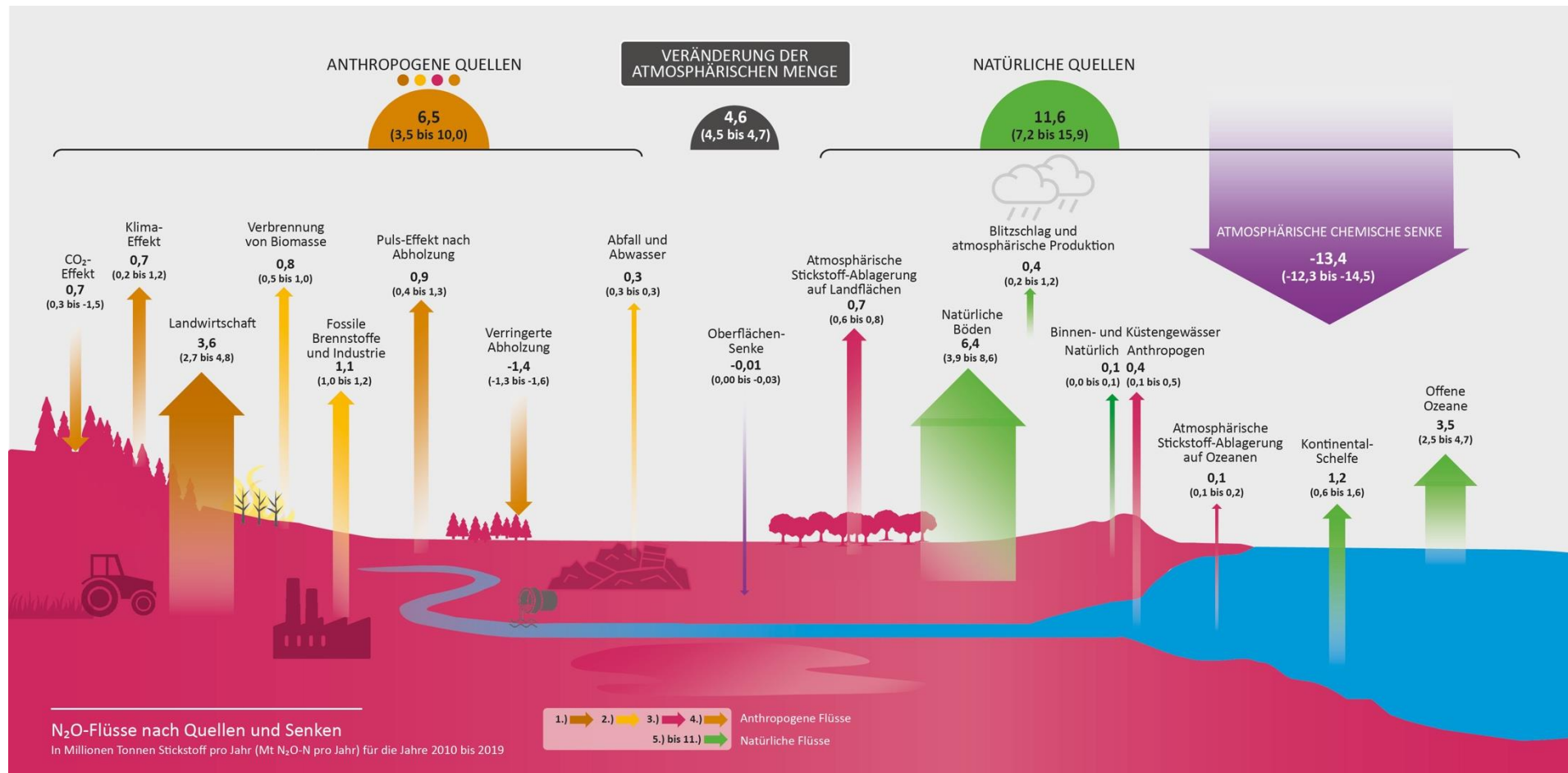
Quelle: eigene Darstellung auf Grundlage von Tian et al. 2023a, Susanne Schödel.

3.5.1 Wesentliche Erkenntnisse

Die Berechnungen der anthropogenen wie auch natürlichen Lachgasflüsse ist auf Grundlage der im vorherigen Abschnitt erläuterten Methoden für die Bottom-up-Berechnungen grafisch darstellbar (Abbildung 5):

Abbildung 5: Globales N₂O-Budget 2010 bis 2019

N₂O-Flüsse nach Verursacher in Megatonnen (Mt) Stickstoff pro Jahr. In Klammern Minimal- und Maximalwerte der jeweiligen Datenquellen.

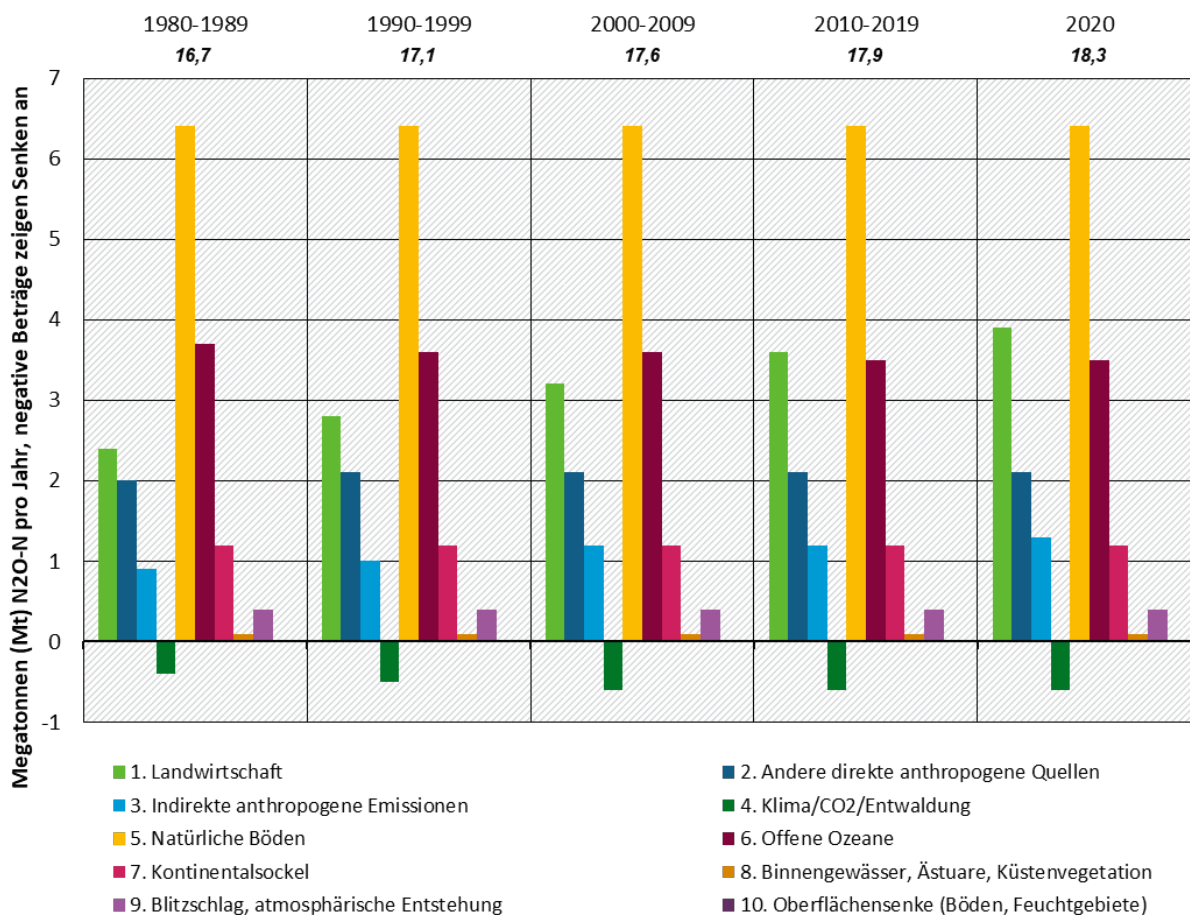


Die detaillierten Zahlen werden in der Tabelle im Anhang B.1 aufgeführt. Die Nummerierung von 1.) bis 11.) entspricht den Kategorien, die in den Tabellen 1 bis 3 genannt werden.
Quelle: leicht angepasste und übersetzte Darstellung in Anlehnung an Tian et al. 2023a, Susanne Schödel.

Die globalen N₂O-Emissionen beliefen sich nach dem Globalen N₂O-Budget für die Jahre 2010 bis 2019 auf durchschnittlich 18,2 Mt N₂O-N pro Jahr (Bottom-up) beziehungsweise 17,4 Mt N₂O-N pro Jahr (Top-down). Die Unsicherheiten, mit denen die Zahlen behaftet sind, werden anhand der Minimal- und Maximalwerte deutlich, die sich aus den verschiedenen Modellrechnungen und Datenbanken ergeben. In der Bottom-up-Analyse liegt die Bandbreite bei 10,4 bis 25,9 Mt, für die Top-down-Analyse bei 15,8 bis 19,2 Mt N₂O-N pro Jahr.

In den letzten vier Jahrzehnten sind die von Menschen verursachten Emissionen – vor allem durch Stickstoffdünger in der Landwirtschaft – um 30 Prozent auf 6,7 Mt N₂O-N im Jahr 2020 (Bandbreite von minimal 3,3 bis maximal 10,9 Mt) gestiegen. Das ist auch der wesentliche Faktor in der zunehmenden atmosphärischen Belastung (Abbildung 6).

Abbildung 6: Globale anthropogene und natürliche Lachgasquellen für die 1980er-, 1990er-, 2000er-, 2010er- Jahre und das Jahr 2020 (nur Bottom-up-Daten)



Die ersten vier Gruppen umfassen die menschlich verursachten Lachgasflüsse, deren Datenquellen in Tabelle 1 beschrieben werden. Zu erkennen sind die ansteigenden Emissionen aus der Landwirtschaft (1.), und die Senken (4.), die durch den Klimawandel, den CO₂-Anstieg und bei der Abholzung von Waldgebieten und anderen Änderungen der Landnutzung entstehen. Die Daten zu den natürlichen Lachgasflüssen (5. bis 10.) wurden in Tabelle 2 genannt. Die Emissionen und Quellen von Lachgas in natürlichem Umfeld verändern sich über die Jahrzehnte nur geringfügig. Die Emissionen aus Binnengewässern, Ästuaren und Küstenvegetation (8.) sowie die Oberflächensenke (10.) sind mit 0,084 Mt beziehungsweise -0,01 Mt N₂O-N so gering, dass sie in der Abbildung kaum beziehungsweise nicht zu erkennen sind. Die Summe der Lachgasflüsse steigt, wie auch aus den Summen ersichtlich wird, die unterhalb der Jahresangaben angegeben sind. Der Anstieg ist vor allem auf die anthropogenen Quellen zurückzuführen.

Quelle: eigene Auswertung auf Grundlage der Daten aus Tian et al. 2023a, Susanne Schödel.

Zur Erinnerung: Im Sechsten Sachstandsbericht des Weltklimarats wurden die anthropogenen Lachgasemissionen auf 6,5 Mt N₂O-N plus/minus 3,8 Mt N₂O-N beziffert; dies liegt also im Rahmen der Auswertungen des Globalen N₂O-Budgets (siehe Abbildung 3).

Der Anteil anthropogener N₂O-Emissionen an den globalen Gesamtemissionen beträgt geschätzt 36 Prozent, etwa 64 Prozent entstehen also auf natürliche Weise. Die Emissionen aus natürlichen Quellen werden in Abschnitt 3.7 näher erläutert.

Als Senke fungiert vor allem die Stratosphäre, wobei nicht nur N₂O abgebaut, sondern auch Ozon zerstört wird. Die Schätzungen durch die verschiedenen Modelle sind seit Ende der 1990er Jahre möglich und gehen davon aus, dass hier in den Jahren von 2000 bis 2019 jedes Jahr zwischen 12,2 und 13,4 Mt N₂O-N abgebaut wurden.

Netto verbleibt also jährlich eine zunehmende Menge von Lachgas in der Atmosphäre. Für die Jahre von 1990 bis 1999 wird sie auf 3,6 Mt N₂O-N geschätzt, für das Folgejahrzehnt 2000 bis 2019 auf 4,6 Mt und für 2020 bereits auf 6,4 Mt N₂O-N. Diese überschüssige Menge verteilt sich in der Erdatmosphäre und erklärt auch den steigenden absoluten Anteil von N₂O.

3.6 Regionale N₂O-Quellen und -Senken: Mengen und Trends

Für die regionale Analyse haben die Autor*innen des Globalen N₂O-Budgets die Landflächen der Erde in 18 Länder und Regionen unterteilt (Tabelle 5). Grundlage waren unter anderem bereits erprobte regionale Aufteilungen, die für Modellierungen und frühere Budgets für Methan und Lachgas verwendet wurden, sowie wichtige Emittenten wie China, Südasien und die USA.

Tabelle 5: Regionen im Globalen N₂O-Budget

Regionen		
USA	Europa	Mittlerer Osten
Kanada	Nördliches Afrika	China
Zentralamerika	Äquatoriales Afrika	Korea und Japan
Brasilien	Südliches Afrika	Südasien
Nördliches Südamerika	Russland	Südostasien
Südwestliches Südamerika	Zentralasien	Ozeanien

Für eine ausführliche Auflistung aller zu den jeweiligen Regionen zählenden Staaten und Hoheitsgebiete siehe Anhang A.1. Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Tian et al. 2023a, Susanne Schödel.

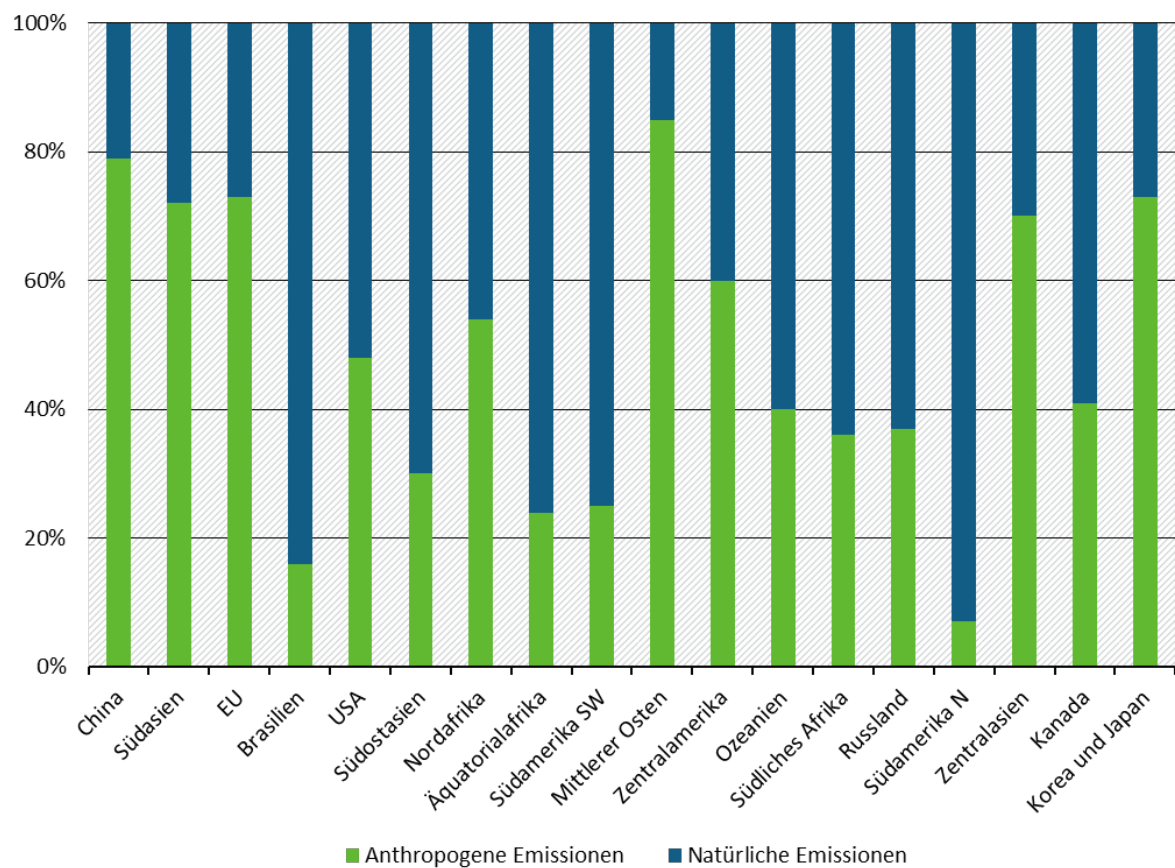
In der folgenden Auswertung werden nur die Bottom-up-Daten verwendet, da sie vor allem für die anthropogenen direkten Emissionen auf einer nach Sektoren unterteilten Datenbasis beruhen. Für die Lesbarkeit werden darüber hinaus ausschließlich die Mittelwerte angegeben.

Europa verzeichnete im Beobachtungszeitraum (1980 bis 2020) über alle Quellen hinweg mit 31 Prozent den größten Rückgang: Die Lachgasemissionen fielen um durchschnittlich etwas mehr als 11.000 Tonnen pro Jahr auf knapp 1,0 Mt N₂O-N. Diese Reduzierung kann vor allem auf sinkende Emissionen durch fossile Brennstoffe sowie in der Industrie zurückgeführt werden. Auch die indirekten Emissionen sowie die der Landwirtschaft reduzierten sich. Allerdings hat sich dieser Trend in Europa seit den 2000er-Jahren nicht fortgesetzt und die Emissionen stagnieren derzeit.

China und Südasien verzeichneten mengenmäßig den stärksten Anstieg um 81 beziehungsweise 92 Prozent von 1980 bis 2020. Die Lachgasemissionen stiegen dort von 1980 bis 2020 um durchschnittlich etwa 15.000 Tonnen auf zuletzt fast 1,4 beziehungsweise 1,3 Mt N₂O-N pro Jahr an. Den größten Anteil machen Stickstoffdünger in der Landwirtschaft aus, aber auch die direkten und indirekten anthropogenen Emissionen haben deutlich zugenommen.

Bemerkenswert sind die regionalen Unterschiede bei der Verteilung zwischen anthropogenen und natürlichen Lachgasemissionen (Abbildung 7). So betrug der Anteil natürlicher Emissionen in den Jahren von 2010 bis 2019 im nördlichen Südamerika durchschnittlich 93, in Brasilien 84 und in Äquatorialafrika 76 Prozent. Am geringsten war der Anteil natürlicher Emissionen im Mittleren Osten (15 Prozent), in China (21 Prozent) sowie in der Region Korea/Japan und in der EU mit jeweils 27 Prozent. Die Unterschiede können auf die geographischen Bedingungen, zum Beispiel den Umfang natürlicher, von Menschen unberührter Flächen zurückgeführt werden (siehe auch Kapitel 3.7).

Abbildung 7: Anteil anthropogener und natürlicher Lachgasemissionen, nach Regionen 2010 bis 2019 (Bottom-up-Daten)



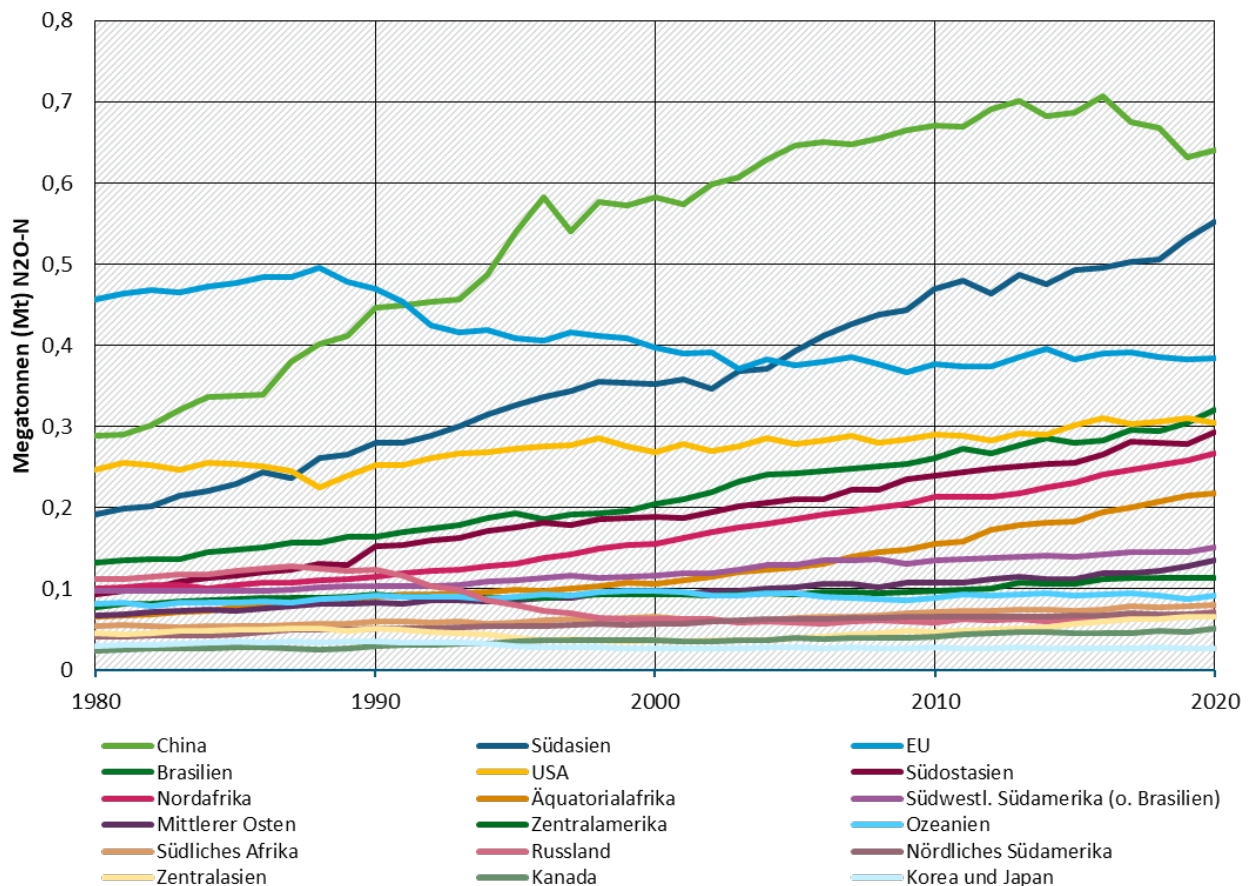
Quelle: eigene Darstellung auf Grundlage der Daten aus Tian et al. 2023a, Susanne Schödel.

3.6.1 Direkte Emissionen aus Landwirtschaft und Aquakulturen

In zwölf der 18 Regionen liegt der Anteil der Lachgasemissionen aus der Landwirtschaft an der Summe der anthropogenen direkten und indirekten Emissionen im letzten betrachteten Jahr 2020 bei über 50 Prozent. Im zeitlichen Verlauf seit 1980 ist zu erkennen, dass der zunehmende Einsatz von Stickstoff in der Landwirtschaft in der Mehrzahl der Regionen auch zu steigenden Lachgasemissionen geführt hat (Abbildung 8).

Abbildung 8: Direkte anthropogene Lachgasemissionen durch Verwendung von Stickstoff in der Landwirtschaft, nach Regionen 1980 bis 2020

Direkte Bodenemissionen durch Düngemittel, Viehdung auf Weideland, Düngemittelmanagement, Aquakulturen. Bottom-up-Daten.



Quelle: eigene Auswertung auf Grundlage der Daten aus Tian et al. 2023a, Susanne Schödel.

Die zehn größten Emittenten aus der Landwirtschaft im Jahr 2020 sind China mit über 0,6 Mt N₂O-N, gefolgt von Südasien, der EU, Brasilien, den USA, Südostasien, Nordafrika, Äquatorialafrika, dem südwestlichen Südamerika und dem Mittleren Osten. In China sind die Emissionen seit 2016 leicht gesunken. Dazu beigetragen hat nach Einschätzung von Cui et al. (2018) und Shang et al. (2019) unter anderem ein landesweites Programm, in dem zunächst der Nährstoffbedarf der Böden geprüft wurde, um die Menge an Düngemitteln darauf anzupassen. Dies hat in Summe dazu geführt, dass weniger Dünger eingesetzt wurde.

In der EU und in Russland sind die Emissionen aus der Landwirtschaft seit 1980 deutlich gesunken: auf weniger als 0,4 Mt beziehungsweise 0,1 Mt N₂O-N pro Jahr. In der EU wird dies im Wesentlichen auf politische Maßnahmen zurückgeführt, die den Einsatz von Stickstoffdünger in der Landwirtschaft reduzieren, in Russland auf den Zusammenbruch des landwirtschaftlichen Genossenschaftssystems seit den 1990er Jahren.

Von 1980 bis 2020 haben sich die Lachgasemissionen aus der Landwirtschaft in Äquatorialafrika und Südostasien mehr als verdreifacht und in sechs Regionen mehr als verdoppelt: Süd-asien, Nordafrika, Brasilien, China, Kanada und Mittlerer Osten.

In der vorherigen Publikation des Globalen N₂O-Budgets aus dem Jahr 2020 wird – mit einer etwas anderen regionalen Aufteilung – erwähnt, dass in Süd- und Südostasien, Europa sowie Nordamerika vor allem synthetische Dünger die Emissionen verursachten; dort werden über 80 Prozent der weltweit eingesetzten Menge auf Ackerland verwendet. Im Gegensatz dazu stammen die direkten landwirtschaftlichen Emissionen aus Afrika und Südamerika hauptsächlich aus Viehdung, der auf Weideflächen ausgebracht wird. Auch hier nehmen die Mengen weiterhin zu, da die Nachfrage nach Fleisch- und Milchprodukten global wächst.

Ebenso hat die steigende Nachfrage nach Fisch dazu geführt, dass der Industriezweig der Aquakulturen vor allem im asiatischen Raum seit den späten 1980er Jahren um 500 Prozent gewachsen ist (Yuan et al. 2019). Durch Dünger und stickstoffhaltige Futter hat sich damit auch die weltweite N₂O-Emissionsmenge in diesem Wirtschaftszweig vervielfacht. Es wird erwartet, dass dieser Trend sich fortsetzt (Tian et al. 2020). Der Anteil an den gesamten anthropogenen und natürlichen N₂O-Emissionen beträgt bisher etwas mehr als zwei Prozent.

3.6.2 Direkte Emissionen aus fossilen Brennstoffen, Industrie, Abfällen und Abwässern sowie Biomasseverbrennung

Der zweite analysierte Bereich direkter anthropogener Emissionen umfasst Emissionen durch fossile Brennstoffe, Industrie, Abfälle und Abwässer sowie Biomasseverbrennung.

Zu den fünf größten Emittenten zählten hier im Jahr 2020 China und die Länder in der Äquatorregion Afrikas mit jeweils etwa 0,26 Mt N₂O-N, sowie die USA, die EU und die Länder im südlichen Afrika mit jeweils unter 0,2 Mt N₂O-N. In China als auch in Süd-asien haben sich die Lachgasemissionen seit 1980 mehr als verdoppelt, in Zentralamerika sogar verfünffacht. In Süd-asien und Zentralamerika lag die jährliche Menge zuletzt bei knapp 0,15 Mt N₂O-N. Für den Mittleren Osten fällt auf, dass sich die Emissionen fast verdreifacht haben auf fast 0,1 Mt N₂O-N im Jahr 2020 (Abbildung 9).

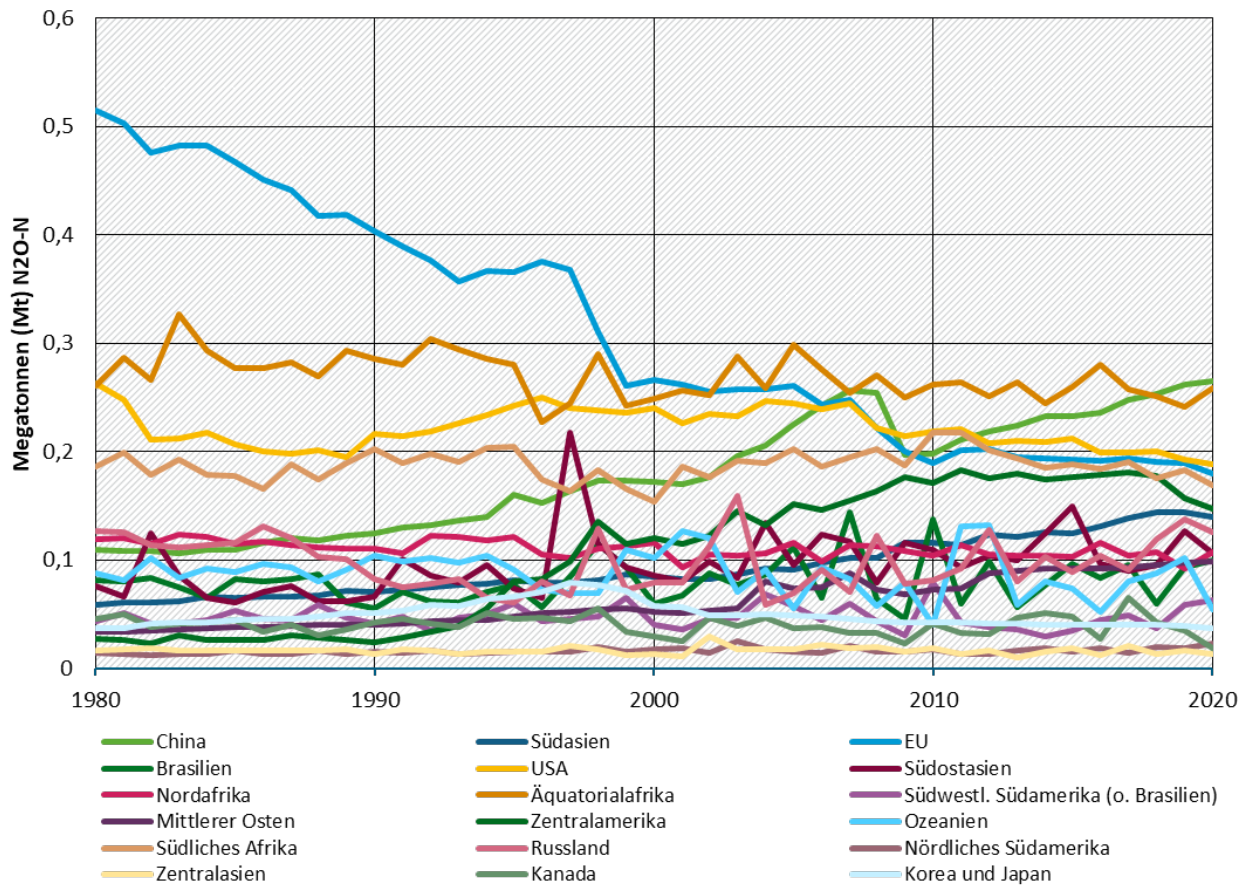
Der deutliche Rückgang der Lachgasemissionen in der EU aus diesem Bereich ist vor allem auf den Industriesektor zurückzuführen: Die Hersteller von Salpeter- und Adipinsäure setzen technische Minderungsmaßnahmen im großen Maßstab ein. Sie unterliegen dem Emissionshandelssystem EU-ETS – genauso wie die fossilen Brennstoffe.

Die Unsicherheiten bei der Quantifizierung der Emissionen aus der Verbrennung von Biomasse sind sehr groß, und in Summe ist keine deutliche Tendenz erkennbar. Auffällig ist die Spitze der Emissionen 1997 für Südostasien. Dies dürfte im Wesentlichen auf die großflächigen Brände insbesondere in Indonesien zurückzuführen sein, die während einer Dürreperiode in der El Niño-Phase 1997 entstanden (Page et al. 2002).

Dagegen steigen die globalen Emissionen aus Abwässern und Abfällen kontinuierlich an, wofür die zunehmende Urbanisierung verantwortlich gemacht werden kann.

Abbildung 9: Direkte anthropogene Lachgasemissionen ohne die Landwirtschaft, nach Regionen 1980 bis 2020

Fossile Brennstoffe, Industrie, Abfall und Abwasser, Biomasse-Verbrennung. Bottom-up-Daten.



Quelle: eigene Auswertung auf Grundlage der Daten aus Tian et al. 2023a, Susanne Schödel.

3.6.3 Indirekte Emissionen

Der dritte analysierte Bereich umfasst die indirekten anthropogenen Lachgasemissionen. Sie entstehen, wie bereits erläutert, durch Stickstoffe vor allem aus Düngern, die sich in Binnen- und offenen Gewässern, auf Landflächen sowie in der Atmosphäre ablagern und weit entfernt vom Ausbringungsort Lachgas verursachen. Die absoluten Mengen sind geringer im Vergleich zur Landwirtschaft und den anderen direkten anthropogenen Emissionen.

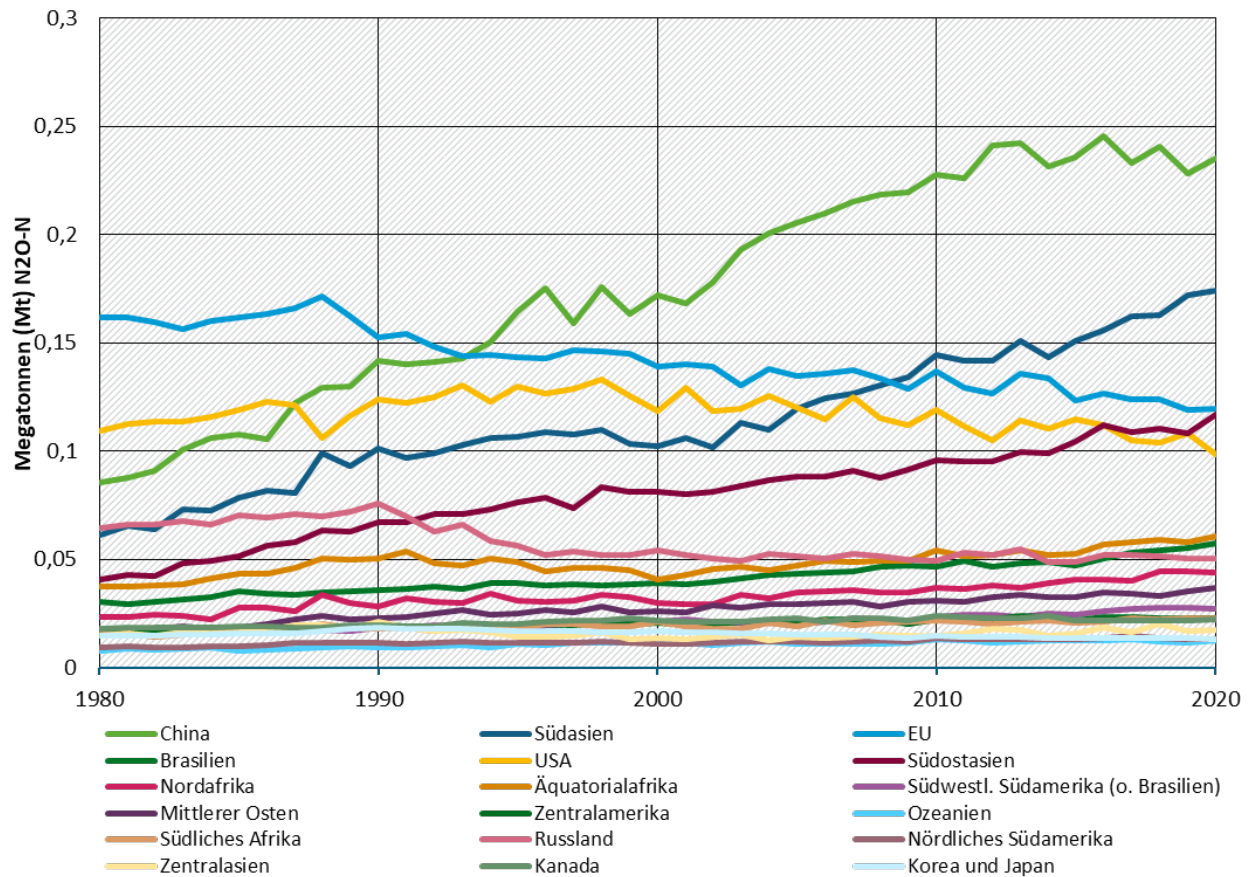
China verzeichnete hier im Jahr 2020 die höchsten Emissionen mit 0,2 Mt N₂O-N, sie haben sich seit 1980 damit fast verdreifacht. Gleiches gilt für Südasien sowie Südostasien mit zuletzt 0,2 Mt beziehungsweise 0,1 Mt N₂O-N (Abbildung 10).

In der EU und in Russland sind die indirekten Lachgasemissionen von 1980 bis 2020 um etwa ein Viertel gesunken auf 0,1 Mt und 0,05 Mt N₂O-N.

Da die indirekten Emissionen im Wesentlichen durch den Einsatz von Stickstoff als Dünger bestimmt werden, folgt deren Entwicklung den Veränderungen im Bereich der Landwirtschaft.

Abbildung 10: Indirekte anthropogene Lachgasemissionen, nach Regionen 1980 bis 2020

Bottom-up-Daten.



Quelle: eigene Auswertung auf Grundlage der Daten aus Tian et al. 2023a, Susanne Schödel.

3.6.4 Gestörte Lachgasflüsse durch Veränderungen von Klima, CO₂-Gehalt und Landbedeckung

Der vierte Bereich, der in die Analyse anthropogener Emissionen einfließt, umfasst die Veränderungen, die sich durch den Klimawandel, den steigenden CO₂-Gehalt in der Atmosphäre und Landnutzungsänderungen zum Beispiel durch Abholzungen von Wäldern ergeben. So verursacht einerseits der Klimawandel zusätzliche Emissionen, während andererseits die Zunahme von CO₂ die Lachgasemissionen reduzieren wird (siehe Kapitel 3.8.2). Ein dritter Aspekt betrifft das Roden von Wäldern. Zunächst entsteht durch die veränderte Bodennutzung ein sogenannter Pulseffekt mit zusätzlichen Lachgasemissionen. Insbesondere bei alten Wäldern wird vermutet, dass deren Folgenutzung langfristig weniger Emissionen erzeugen kann als zu der Zeit, in der die Wälder noch standen. Das ist vor allem dann der Fall, wenn diese Flächen nach einigen Jahren nicht mehr landwirtschaftlich genutzt, also nicht gedüngt werden. Dies wird als negativer Beitrag bilanziert.

Nennenswerte Effekte zeigen sich in Äquatorialafrika, Brasilien, Südostasien, den USA, China und dem südlichen Afrika mit einer Brandbreite von 0,4 bis 0,2 Mt N₂O-N negativen Emissionen.

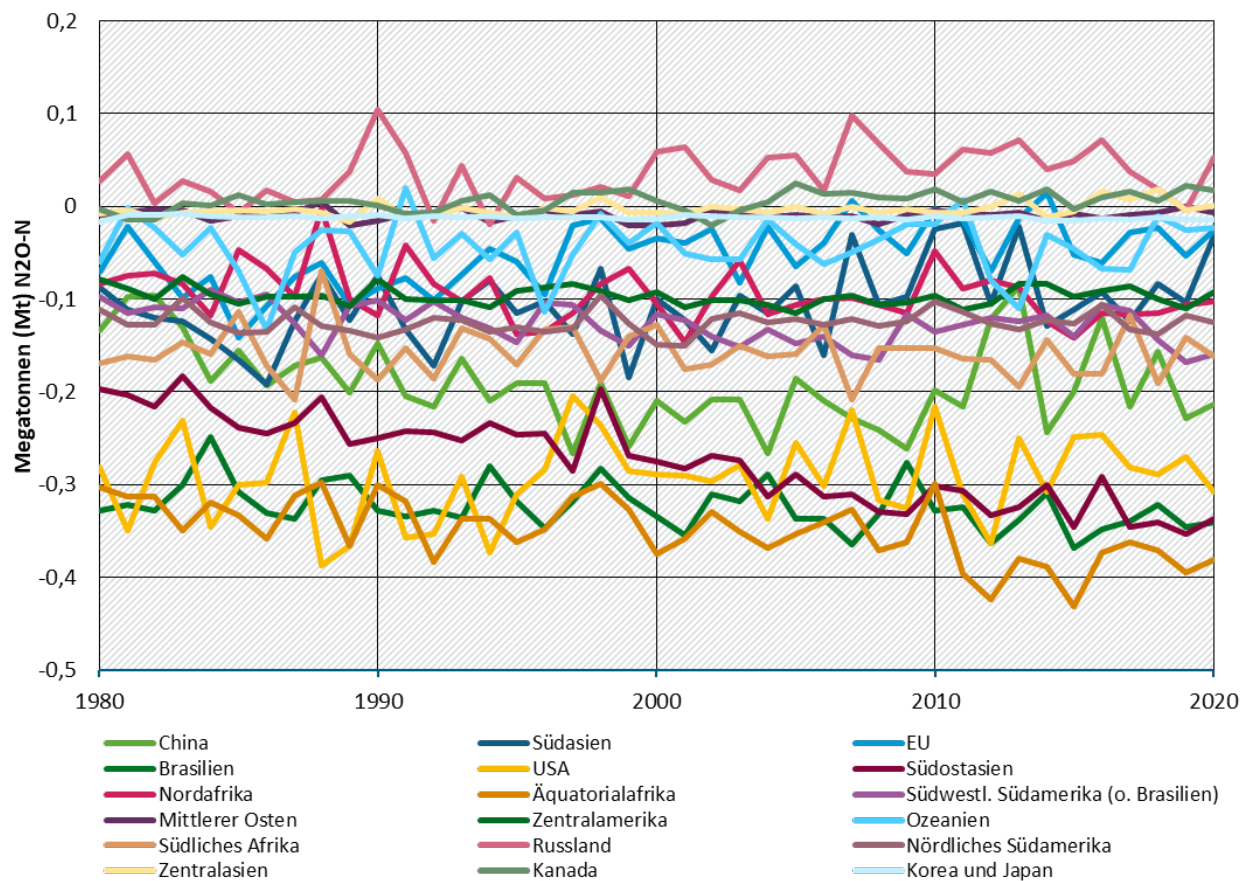
In den meisten Regionen sind über den Zeitraum von 1980 bis 2020 keine größeren Veränderungen erkennbar (Abbildung 11). Im Vergleich zu der vorherigen Studie zum Globalen N₂O-Budget aus dem Jahr 2020 wurde ein weiterentwickeltes NMIP2-Modell verwendet, das die Schätzung der Mengen stark verändert hat. Während 2020 noch davon ausgegangen wurde, dass aus diesem Bereich für den untersuchten Zeitraum 2007 bis 2016 durchschnittlich 0,2 Mt

N₂O-N zusätzliche Emissionen pro Jahr entstanden sind, ergeben die neuen Berechnungen für 2010 bis 2019, dass die Emissionen sich nicht erhöht haben, sondern um 0,6 Mt N₂O-N pro Jahr gesunken sind.

Allerdings bestehen hier große Unsicherheiten, da die Prozesse, durch die diese N₂O-Flüsse entstehen, noch nicht vollständig erforscht sind. Dies wird auch durch die Bandbreite an Ergebnissen deutlich, die für 2010 bis 2019 genannt werden. Sie belaufen sich auf -2,1 bis +1,2 Mt N₂O-N pro Jahr, also könnten de facto auch positive Emissionen denkbar sein.

Abbildung 11: Gestörte Lachgasflüsse durch Veränderungen von Klima, CO₂ und Landnutzung, nach Regionen 1980 bis 2020

Bottom-up-Daten.



Quelle: eigene Auswertung auf Grundlage der Daten aus Tian et al. 2023a, Susanne Schödel.

3.7 Natürliche Lachgasquellen

3.7.1 Überblick

Die Menge der natürlichen Quellen und Senken veränderten sich in Summe in den Jahren von 1980 bis 2020 nur geringfügig. Sie wurden zuletzt auf durchschnittlich 11,7 Mt N₂O-N pro Jahr geschätzt, mit einem Unsicherheitsbereich von 7,2 bis 16,0 Mt N₂O-N.

Natürliche Böden emittierten von den 1980er-Jahren bis 2020 durchschnittlich 6,4 Mt N₂O-N pro Jahr. Global gesehen betragen sie etwa 55 Prozent der natürlichen Emissionen. Regionale Schwerpunkte befinden sich unter anderem über den Landflächen in der Äquatorregion. Allerdings zeigen die verschiedenen Modelle ansonsten kein einheitliches Bild, und auch die Schätzungen der globalen Gesamtmenge reichen von 3,9 bis 8,7 Mt N₂O-N pro Jahr.

Ozeane trugen im ersten untersuchten Jahrzehnt ab 1980 im Mittel 3,7 Mt pro Jahr bei, im Jahrzehnt von 2010 bis 2019 waren es 3,6 Mt N₂O-N pro Jahr. Die Bandbreite bei den Berechnungen liegt bei minimal 2,5 Mt und maximal 4,6 Mt N₂O-N pro Jahr.

Regional sind die Emissionen in Äquatorregionen und den Küstengebieten höher als in anderen Bereichen und variieren jahreszeitlich stark. So hat eine Studie aus dem Jahr 2016 die Emissionen für den östlichen äquatorialen Atlantik genauer untersucht. Demnach steigen die Lachgasemissionen in den Monaten Mai bis Juli deutlich an, wenn das Meerwasser sich durch natürliche Abläufe abkühlt (Arévalo-Martínez et al. 2017). Auch der Sauerstoffgehalt ist für die Entstehung von Lachgas relevant, allerdings besteht hier noch Forschungs- und Datenbedarf, um die Emissionen aus sauerstoffarmen oder -reichen Meeresregionen besser quantifizieren zu können (Bange 2022).

Von den im Globalen N₂O-Budget ausgewerteten Modellen geht eines von steigenden Emissionen aus, während die anderen drei sinkende Emissionen ausweisen (Tian et al. 2023a). Der IPCC bezieht sich im Sechsten Sachstandsbericht auf zwei Studien, nach denen die Emissionen aus den Ozeanen von 2005 bis 2100 um vier bis zwölf Prozent beziehungsweise unter dem besonders ungünstigen Szenario RCP8.5 bis zum Jahr 2100 um 24 Prozent sinken könnten, gerechnet ab dem Beginn der Industrialisierung Mitte des 18. Jahrhunderts (zu den Szenarien siehe Kapitel 3.9). Allerdings gibt der IPCC hierzu nur ein geringes Vertrauensniveau (Englisch „low confidence“) an, unter anderem deshalb, weil bisher nur sehr wenige Modelle diese Prozesse untersucht haben (IPCC 2021). Die Unsicherheiten in den Prognosen beruhen grundsätzlich auf einem Mangel an längerfristigen und räumlich verteilten Messdaten für N₂O-Flüsse zwischen der Meeresoberfläche und der Atmosphäre, sowie auf der geringen Anzahl und mangelnder Detailtiefe der Modelle (Bange et al. 2019).

Für Kontinentalschelfe werden im Untersuchungszeitraum gleichbleibende Emissionen angesetzt. Sie belaufen sich auf 1,2 Mt N₂O-N pro Jahr.

Die weiteren natürlichen Quellen aus Binnengewässern, Flussmündungen (Ästuaren) und der Küstenvegetation werden ebenfalls gleichbleibend auf durchschnittlich etwas weniger als 0,1 Mt pro Jahr geschätzt. Es wird jedoch damit gerechnet, dass diese Emissionen durch den Klimawandel zukünftig ansteigen werden, zum Beispiel durch das Auftauen der Permafrostböden, wodurch auch Lachgas freigesetzt wird (zum Beispiel Voigt et al. 2020).

Lachgas entsteht auch durch Blitzschlag in Verbindung mit reaktivem Stickstoff in der Atmosphäre sowie direkt durch gasförmiges Ammoniak. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass die Erdoberfläche Lachgas global gesehen kleine Mengen abgibt oder aufnimmt. Hier liegen keine aktuelleren Ergebnisse vor; im Globalen N₂O-Budget wird diese Menge daher auf 0,04 beziehungsweise -0,01 Mt N₂O-N pro Jahr geschätzt.

3.7.2 Fließgewässer

2020 wurde eine Analyse veröffentlicht, in der ein neuer Ansatz gewählt wurde, um die N₂O-Emissionen aus Fließgewässern in der Zeit von 1900 bis 2016 abzuleiten (Yao et al. 2020). Die Autor*innen sind auch im globalen N₂O-Budget des Global Carbon Project involviert. Hier werden nachfolgend die wichtigsten Informationen aus dieser Analyse zusammengefasst.

Bisher wurden Emissionsfaktoren – ausgedrückt als Verhältnis von N₂O-Emissionen zu anorganischem Stickstoff in Wasserläufen – verwendet, die auf örtlichen Experimenten unter freiem Himmel beruhen. Diese sehr unterschiedlichen Emissionsfaktoren führen dazu, dass die Schätzungen von N₂O-Emissionen aus Fließgewässern hohe Diskrepanzen aufweisen – sie reichen von 0,3 Mio. Tonnen Stickstoff pro Jahr bis zu 2,0 Mio. Tonnen.

Anstelle von Emissionsfaktoren schlagen die Forscher*innen hier ein Modell vor, das sowohl von einem kontinuierlichen Austausch zwischen den Landflächen und den Ozeanen ausgeht als auch die Stickstoffmengen und daraus resultierenden N₂O-Emissionen speziell in Bächen und Flüssen betrachtet. Um die natürlichen und anthropogenen Einflüsse zu berücksichtigen, rechnet das Modell verschiedene Faktoren ein. Dazu gehören klimatische Bedingungen wie die Menge an kurzweilliger Sonneneinstrahlung (die für die Wechselwirkung zwischen Erdboden und Luft wichtig ist), Niederschlagsmengen, Lufttemperatur, Landnutzung und -bedeckung. Ebenso einbezogen werden Stickstoffeinträge durch Dünger und Ablagerungen, Gülle und Abwässer. Anschließend werden verschiedene Datensätze für die Stickstoffeinträge und die geschätzte Oberfläche von Flussläufen in das Modell eingespeist und die Ergebnisse durch Beobachtungen und Experimente erfolgreich überprüft.

In Summe gehen die Forscher*innen davon aus, dass 1900 global insgesamt etwas über 70.000 Tonnen N₂O-Stickstoff aus Flussläufen emittiert wurden (ausgedrückt in N₂O-N), 2016 waren es bereits 291.000 Tonnen N₂O, also knapp unter 0,3 Mt. Dieser Wert bewegt sich am unteren Ende der bis dahin publizierten und oben erwähnten Schätzungen von minimal 0,3 Mt bis maximal 2,0 Mt Stickstoff. Die jährliche Zuwachsrate in der Zeit von 1900 bis 2016 wurde auf durchschnittlich 1.920 Tonnen pro Jahr geschätzt, und variiert stark über den Untersuchungszeitraum. Bis zur Jahrtausendwende zeigt sich der zunehmende Einsatz von Stickstoffdünger auch in entsprechenden höheren Zuwachsraten für N₂O-Emissionen aus Fließgewässern. Für die Zeit von 2010 bis 2016 sanken diese Emissionen jedoch nach Ansicht der Wissenschaftler*innen aufgrund von zwei Faktoren:

Zum einen wurde in den entwickelten Ländern in Nordamerika, Europa, Ozeanien und im Nahen Osten weniger Stickstoffdünger eingesetzt, weil die unerwünschten Nebeneffekte klarer und die Einsatzmöglichkeiten präziser geworden sind.

Zum anderen führt der steigende absolute CO₂-Gehalt in der Erdatmosphäre dazu, dass Pflanzen besser wachsen und damit mehr Stickstoff in der Biomasse gebunden wird. Dadurch gelangt weniger Nitrat (NO₃-) in Grund- und Oberflächenwasser, aus dem dann später Lachgas entstehen kann.

Wie hoch sich dieser CO₂-Effekt auf den Stickstoffkreislauf auswirkt, ist in der Wissenschaft allerdings noch nicht abschließend geklärt.

Anthropogene Stickstoffeinträge und die Umwandlung von Landflächen in Ackerland machen den größten Anteil im Zuwachs der N₂O-Emissionen in Fließgewässern aus. Der Anstieg insbesondere in China, Südasien und Südostasien seit den 1980er-Jahren wird vor allem auf das dortige Bevölkerungswachstum zurückgeführt. Dadurch steigt die Nachfrage nach Nahrung und Industriegütern, was wiederum zu einem höheren Einsatz von Stickstoffdünger und Viehdung führt. In der Zeit von 2007 bis 2016 hat China etwa 30 Prozent des weltweiten Stickstoffdüngers verbraucht, obgleich es über nur sieben Prozent der globalen Ackerfläche verfügt.

In der hier zitierten Studie wird davon ausgegangen, dass 85 Prozent der Emissionen in den 2000er-Jahren aus Wasserläufen stammen, die zur sogenannten ersten bis dritten Ordnung zählen, also Quellbäche und Wasserläufe am Anfang ihres Einzugsgebietes. Gründe sind unter anderem, dass dort die sogenannte Austauschzone zwischen Grundwasser und Oberflächenwasser größer ist und dadurch mehr N₂O entstehen kann. Im Vergleich zu größeren Fließgewässern haben insbesondere Wasserläufe mit direkter Verbindung zum Grundwasser höhere Anteile an gelöstem N₂O sowie steilere Gefälle und damit höhere Fließgeschwindigkeiten, was insgesamt zu höheren Austauschraten der relevanten Gase führt. Erwähnenswert ist noch, dass kleinere Wasserläufe etwa 80 Prozent der weltweiten

Fließgewässer ausmachen und damit die größte Emissionsquelle für Lachgas aus Fließgewässern sind.

Die Studie hat außerdem gezeigt, dass die Emissionsfaktoren, die für die Berechnung von N₂O-Emissionen aus Wasserläufen angesetzt werden, zu ungenau sind und daher die Emissionsmengen überschätzen. Die Modelle sollten verbessert werden, in dem die hydrologischen und biogeochemischen Prozesse an und unter der Oberfläche von Wasserläufen und deren Randregionen genauer abgebildet werden. Auch Messungen und die Anwendung verschiedener Parameter, zum Beispiel Niederschläge oder Gasaustauschraten sowie Nitrifikation und Denitrifikation, müssen genauer einbezogen werden.

Der Anteil der Emissionen aus Wasserläufen an jenen über Landflächen insgesamt im globalen N₂O-Budget beträgt drei Prozent. Allerdings steigen diese Emissionen dreimal so schnell an wie die restlichen Lachgasemissionen über Landflächen. Deshalb sollten nach Ansicht der Forscher*innen Daten und Modelle dazu genutzt werden, um den Einsatz von Stickstoff als Dünger im Ackerbau zu optimieren. Das wiederum würde den Überschuss – also die Abgabe von zu viel Stickstoff, der nicht von den Pflanzen aufgenommen werden kann – und die daraus folgenden Umwelteinflüsse wie eben die Lachgasemissionen verringern (Yao et al. 2020).

3.8 Erkenntnisse zu Rückkopplungsmechanismen zwischen N₂O-Emissionen und Klimawandel

3.8.1 Modelle deuten auf Rückkopplung hin

In der Klimawissenschaft werden, wie im Abschnitt 3.4 erläutert, Modelle eingesetzt, um das Klimasystem und sein Verhalten unter verschiedenen zeitlichen und räumlichen Bedingungen zu untersuchen. Anthropogene Emissionen von Treibhausgasen wie N₂O spielen hier eine Rolle, weil sie einen zusätzlichen Strahlungsantrieb verursachen, der zur weiteren Erwärmung des Klimas führt und dies wiederum Auswirkungen wie Extremwetter verursachen kann.

Die auf Basis der Modelle entwickelten Szenarien können laut Weltklimarat zwar nur Tendenzen und keine Gewissheiten aufzeigen. Dies gilt insbesondere für regionale Entwicklungen. Allerdings sei davon auszugehen, dass die bereits stattfindenden Veränderungen des Klimas zu mehr N₂O-Emissionen führen werden, die nicht direkt anthropogenen Ursprungs sind, sondern aus indirekten oder natürlichen Quellen stammen. Hier geht es zum Beispiel darum, wie eine langfristige Erwärmung zu höheren N₂O-Emissionen führt, die wiederum davon abhängen, wieviel Stickstoff in den verschiedenen Kreisläufen verfügbar ist (IPCC 2021).

Der IPCC definiert fünf Vertrauensniveaus (Englisch „level of confidence“) für die verschiedenen betrachteten Klimamodelle, basierend auf der Menge an verfügbaren Daten und Szenarien und der Bandbreite der Ergebnisse: sehr gering, gering, mittel, hoch und sehr hoch. Für die Beantwortung der Frage, ob eine positive Rückkopplung zwischen dem Klimawandel und einer Zunahme von Lachgas in der Atmosphäre existiert, geht der IPCC von einem mittleren Vertrauensniveau aus (Englisch: „medium confidence“). Die Ergebnisse der Berechnungen, wie stark sich der Strahlungsantrieb verändert – und damit auch die Energiebilanz der Erde – ordnet der IPCC auf einem geringen Vertrauensniveau ein (IPCC 2021).

3.8.2 Beispiele für Rückkopplungsmechanismen

Im ersten Globalen N₂O-Budget aus dem Jahr 2020 beschreiben und quantifizieren die Autor*innen erstmalig den Zusammenhang zwischen Klimawandel, steigenden CO₂-Konzentrationen in der Atmosphäre und Lachgasemissionen. Zum einen erhöhen die globale Erwärmung und die Verwendung von Stickstoffdüngern die Lachgasemissionen aus Böden. Zum

anderen führen erhöhte CO₂-Konzentrationen wiederum dazu, dass das Pflanzenwachstum gestärkt und damit mehr Stickstoff gebunden wird, der sich dann nicht mehr durch Nitrifikation oder Denitrifikation in Lachgas verwandeln kann. In einer dort zitierten Studie von Tian L. et al. aus dem Jahr 2019 wird auf Grundlage von Modellrechnungen davon ausgegangen, dass die Lachgasemissionen sich durch ansteigendes atmosphärisches CO₂ zwischen 1861 und 2016 um zehn Prozent reduziert haben. Allerdings wird dieser klimapositive Effekt durch den Anstieg von Lachgas in der Atmosphäre aus den anderen Quellen wieder kompensiert (Tian L. et al. 2019). Der IPCC stellt in einem ähnlichen Kontext fest, dass „Emissionen aus reaktiven Stickstoffen“ Pflanzen düngen und damit deren CO₂-Aufnahme verstärken können. Die Belege, dass diese Prozesse stattfinden und relevant sind, seien belastbar, aber nicht ausreichend, um deren Beitrag zu den Emissionsmengen zu bestimmen (IPCC 2021).

Ein weiteres Beispiel für Rückkopplungsmechanismen hängt mit den Permafrostböden oder auch Dauerfrostböden der Erde zusammen, die etwa 17 Prozent der Landoberfläche ausmachen, vor allem in den subarktischen und arktischen Regionen nördlich des 60. Breitengrades. Sie nehmen große Teile Sibiriens, Alaskas und Kanadas ein, sind aber auch in der Antarktis und in vielen Hochgebirgen zu finden. Permafrostböden werden dadurch definiert, dass ihre Temperatur in mindestens zwei aufeinanderfolgenden Jahren unter null Grad Celsius liegt. Sie bestehen aus einer sogenannten aktiven und einer dauergefrorenen Schicht: Die aktive Schicht taut im Sommer bis auf eine Tiefe von 15 bis über 100 Zentimetern auf¹⁹. Die Böden werden in Moor- und Feuchtgebiete sowie trockene Hochlandflächen unterschieden. Eine Studie von Voigt et al. aus dem Jahr 2020 verweist darauf, dass die Permafrostregionen durch den Klimawandel relevante Mengen an Lachgasemissionen freisetzen können. Denn insbesondere die unteren, dauergefrorenen Bodenschichten und Sedimente enthalten etwa die Hälfte des Stickstoffs der Erde, der natürlicherweise in Böden vorkommt. Wenn zum Beispiel die Erderwärmung oder zunehmende Niederschläge den Permafrost beeinträchtigen, werden die natürlichen mikrobiellen Prozesse wie Nitrifikation und Denitrifikation dieses Stickstoffs zu neuen Lachgasemissionen führen. Daher sollte diesen Prozessen aus Sicht der Autor*innen mehr Aufmerksamkeit gewidmet werden: Bisher wurden erst 40 Studien über die Lachgasflüsse in den Permafrostregionen der Arktis veröffentlicht, aber bereits mehr als 200 Auswertungen über CO₂ und 100 über Methan. Auch die genauen Wechselwirkungen, die die Lachgasemissionen in den verschiedenen Bodenarten positiv oder negativ beeinflussen können, sind mangels längerfristiger und flächendeckender Messreihen noch nicht ausreichend erforscht. Anhand der vorhandenen Forschungsergebnisse gehen die Autor*innen abschließend davon aus, dass der Klimawandel eine Rückkopplung im globalen Klimasystem verursacht, in der die Permafrostregionen zu einer weltweit relevanten Quelle von Lachgas werden könnten. Sie bezeichnen diesen Effekt als „non-carbon permafrost feedback“ (Voigt et al. 2020).

Die Lachgasemissionen aus natürlichen sowie von Menschen bewirtschafteten Böden im Klimawandel sind auch Gegenstand einer Publikation, die 2021 in einem online verfügbaren Sammelband zur Achten Globalen Konferenz der Internationalen Stickstoff-Initiative (INI) veröffentlicht wurde (Medinets et al. 2021 und UBA 2022). Dazu wurden in Schottland Proben aus neun verschiedenen, typischen Bodenarten mit unterschiedlichem Gehalt an reaktivem Stickstoff entnommen und im Labor künstlich erzeugten Klimabedingungen ausgesetzt. Das Experiment wurde dazu in vier aufeinander folgende Phasen unterteilt, an deren Ende jeweils die Lachgasflüsse gemessen wurden: eine Trockenperiode in einem durchschnittlichen Sommer, Trockenheit bei erhöhter Temperatur sowie mit extremem Temperaturanstieg, und schließlich intensiver Regenfall nach einer langen Trockenheit. Dabei hat sich herausgestellt, dass nicht nur

¹⁹ „Permafrost – eine Einführung“, Alfred-Wegener-Institut, <https://www.awi.de/im-fokus/permafrost/permafrost-eine-einfuehrung.html>.

die von Menschen bewirtschafteten Landflächen, sondern auch die natürlichen Bodenarten zu bedeutenden Lachgasquellen avancierten. In den meisten Fällen stiegen die Emissionen von Phase zu Phase an. Die Autor*innen empfehlen deshalb, dass die nationalen und internationalen Treibhausgasinventare zukünftig auch die Emissionen aus natürlichen Böden aufnehmen sollten²⁰.

In einer früheren Studie aus dem Jahr 2017 wurden Daten aus einer sechsjährigen Messkampagne in Minnesota in den USA mit Modellrechnungen kombiniert, um den Zusammenhang zwischen direkten und indirekten Lachgasemissionen, der Temperatur sowie dem Niederschlag zu analysieren. Der Standort für die atmosphärischen Messungen bis in 100 Meter Höhe über dem Erdboden lag im sogenannten US-Maisgürtel (Englisch „US Corn Belt“) im Mittleren Westen der USA. Dort gelangt Stickstoff vor allem durch den Einsatz von künstlichem Dünger und Viehdung sowie durch den Anbau von Sojabohnen in den Boden, und verursacht somit anthropogene Lachgasemissionen. Über den Untersuchungszeitraum von 2010 bis 2016 variierten die jährlichen Emissionen mit 0,316 bis 0,585 Mt N₂O-N stark, obgleich die Mengen an synthetischem Dünger nur geringfügig anstiegen²¹. Der entscheidende Zusammenhang bestand stattdessen zwischen hohen durchschnittlichen Temperaturen und entsprechenden Emissionen: Im wärmsten Jahr 2012 wurden auch die höchsten Lachgasmengen gemessen. In einem nächsten Schritt wurde das Klimamodellvergleichsprojekt CMIP5 verwendet, um unter der Annahme des ungünstigen RCP8.5-Szenarios eine Projektion bis 2050 erstellen zu können (mehr dazu unter 3.9). Das Modell bestätigte steigende Temperaturen, Niederschläge sowie Lachgasemissionen, selbst wenn der Einsatz von Stickstoffdünger konstant gehalten werden würde. Der Anteil des Anstiegs von Lachgas, der auf Klimaveränderungen wie Temperaturanstiege und höhere Niederschläge zurückgeführt werden kann, wird auf 25 Prozent geschätzt. Die Autor*innen dieser Studie ziehen daraus das Fazit, dass Lachgasemissionen in einer wärmeren und feuchteren Welt verstärkt werden (Griffis et al. 2017).

Auch zwischen Lachgas und Ozon bestehen Rückkopplungen, die relevant für das Klima sind. Ozon kommt vor allem in der unteren Stratosphäre, also in Höhen von 15 bis 40 Kilometern Höhe über dem Erdboden vor. Das Molekül aus drei Sauerstoffatomen hat eine mehrfach schützende Funktion für die Erde, indem es einen Teil der ultravioletten Strahlung der Sonne absorbiert, die für Lebewesen gefährlich ist. Ozon reagiert jedoch mit den verschiedenen anthropogenen Treibhausgasen auf nicht-lineare Weise, je nach Konstellation der verschiedenen Substanzen zueinander und Faktoren wie Energiezufuhr und Temperatur in der Atmosphäre. Lachgas, das durch atmosphärische Strömungen in die Stratosphäre gelangt, zerfällt zum Beispiel unter anderem in Stickstoffoxid, das wiederum mit Ozon reagiert und es dadurch zerstört.

In der Forschung wurde daher eine Kennzahl eingeführt, mit der das Ozon-zerstörende Potential eines Treibhausgases beschrieben wird (Englisch „Ozone depleting potential“, kurz ODP). Für die halogenierten Kohlenwasserstoffe wurde in den 1980er Jahren das höchste ODP im Vergleich zu den anderen Treibhausgasen angenommen. Inzwischen ist nachgewiesen, dass deren Verbot durch das 1987 verabschiedete Montreal-Protokoll zu einer deutlichen Reduzierung geführt hat. Auch wenn seit 2013 wieder steigende Anteile der FCKW gemessen werden, konnte sich die Ozonschicht insgesamt regenerieren. Es sind weitere Wechselwirkungen zwischen ansteigenden Methanemissionen und halogenierten

²⁰ In dem hier präsentierten Globalen N₂O-Budget wurden diese Emissionen mithilfe von Modellrechnungen quantifiziert, da die Treibhausgasbilanzen diese bisher nicht einbeziehen.

²¹ In der Bottom-up-Analyse des Globalen N₂O-Budgets wurden die anthropogenen Emissionen aus der Landwirtschaft und die indirekten Emissionen für die Jahre 2010 und 2016 in den gesamten USA auf zusammen 0,409 sowie 0,421 Mt N₂O-N geschätzt. An der Differenz zeigt sich, wie schwierig es ist, eindeutige Zahlen zu erhalten.

Kohlenwasserstoffen bekannt, die deren negativen Effekt auf Ozon um etwa 20 Prozent reduzieren. In gleichem Umfang wirken auch Reaktionen zwischen Kohlendioxid und Lachgas positiv auf den Ozongehalt in der Stratosphäre. In Summe hat sich Lachgas inzwischen allerdings zum Treibhausgas mit dem höchsten ODP entwickelt (Solomon et al. 2020, Portmann et al. 2012). Steigende Anteile an Lachgas in der Atmosphäre werden also mehr Ozon zerstören und dadurch auch das Erdklima beeinflussen.

3.9 Lachgasanteil in der Atmosphäre übersteigt bisherige Szenarien der Wissenschaft – zusätzliche Reduzierung von CO₂ und Methan notwendig

Ein weiteres Anwendungsfeld der Erdsystemmodelle sind Szenarien, die mögliche, plausible Zukünfte beschreiben. Sie enthalten also keine Vorhersagen, sondern erläutern, was unter bestimmten Bedingungen passieren könnte. Diese Szenarien helfen der Forschung, den Klimawandel mithilfe von Wenn-Dann-Aussagen zu untersuchen, und Strategien zur Anpassung und Vermeidung von Klimawandelfolgen zu entwickeln. Sie berücksichtigen zum einen die Unsicherheiten, die durch eingehende Daten und die Projektion in die Zukunft entstehen. Zum anderen beziehen sie gesellschaftliche Gestaltungsmöglichkeiten mit ein. Auf der Grundlage dieser Szenarien können sogenannte Pfade entwickelt werden: Was sollte wie und wann passieren, damit dieses oder jenes Szenario erreicht wird²².

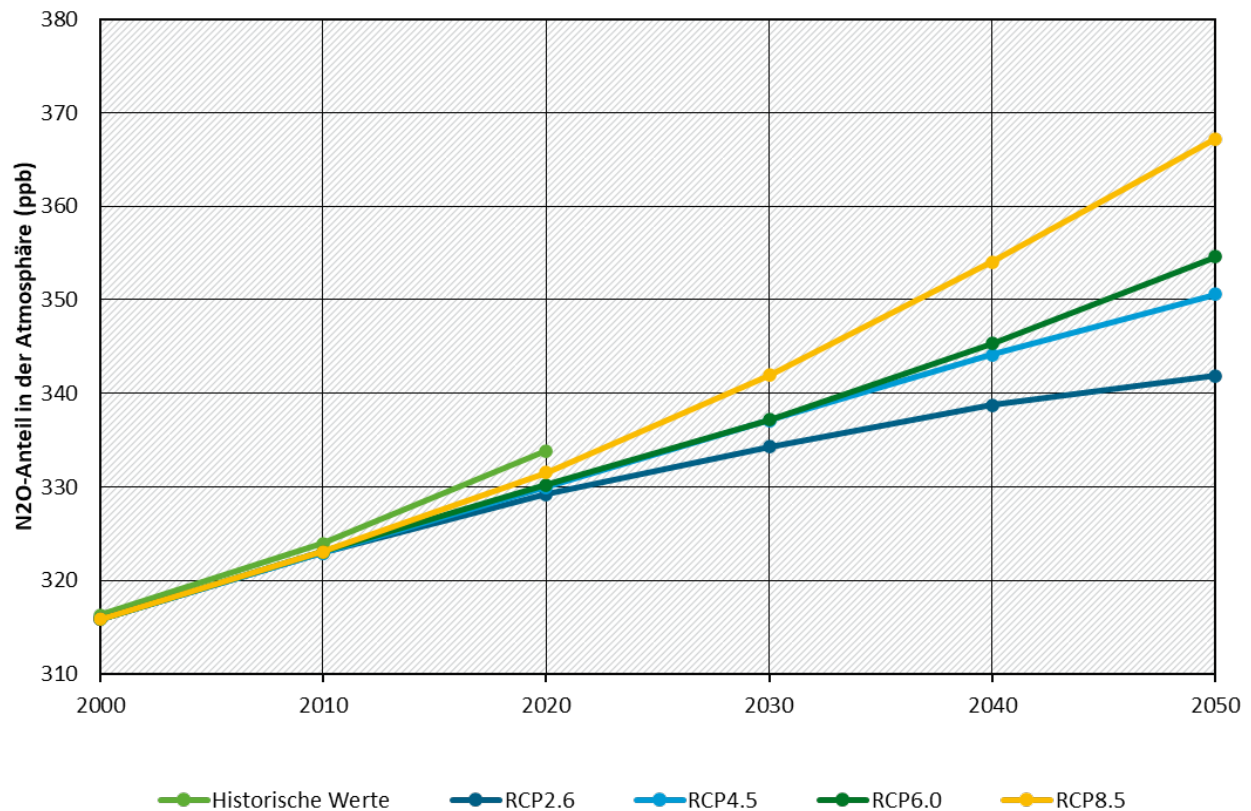
Dieser Analyserahmen ist seit den 1990er Jahren zunächst im Weltklimarat und ab der Jahrtausendwende in der wissenschaftlichen Community weiterentwickelt worden, damit der IPCC sich auf die Begutachtung der Szenarien und Pfade konzentrieren kann.

Zunächst wurden für den Fünften Sachstandsbericht des IPCC sogenannte Repräsentative Konzentrationspfade (Englisch „Representative Concentration Pathways“, RCP) entwickelt. Sie gehen von zukünftigen atmosphärischen Konzentrationen der Treibhausgase und einem entsprechenden Strahlungsantrieb aus, der die Erderwärmung beeinflusst. Mit diesen Daten können Klimamodelle dann mögliche zukünftige Klimaveränderungen und Emissionen berechnen. In der Literatur sind vier Szenarien gängig: Das günstigste (RCP2.6) geht davon aus, dass die atmosphärische CO₂-Konzentration im Jahr 2100 bei 400 ppm und der Strahlungsantrieb bei 2,6 Watt pro Quadratmeter liegt. Schon mit dieser Entwicklung müsste eine zügige Reduzierung der Emissionen einhergehen. Das ungünstigste Szenario RCP8.5 nimmt eine CO₂-Konzentration von 1.370 ppm im Jahr 2100, einen Strahlungsantrieb von 8,4 Watt pro Quadratmeter und Treibhausgasemissionen, die bis dahin weiter ansteigen – dies würde bedeuten, dass sich der heutige CO₂-Anteil in der Atmosphäre mehr als verdreifacht.

Die RCP sind auch dazu geeignet, die bisherige Entwicklung der Treibhausgasanteile in der Atmosphäre mit den erwarteten Werten abzugleichen (IPCC 2021). Diese Auswertung wurde für Lachgas im Rahmen des Globalen N₂O-Budgets von Tian et al. vorgenommen. Dabei hat sich herausgestellt, dass die atmosphärische Lachgaskonzentration in der Realität längst alle RCP-Szenarien überstiegen hat (Abbildung 12).

²² Für weitere Informationen zu den Szenarien: <https://www.de-ipcc.de/348.php>, sowie Davidson (2012), Riahi (2017) und Gidden et al. (2019).

Abbildung 12: Atmosphärischer N₂O-Anteil: bisherige und erwartete Werte laut den Repräsentativen Konzentrationspfaden (Representative Concentration Pathways, RCP) im CMIP6



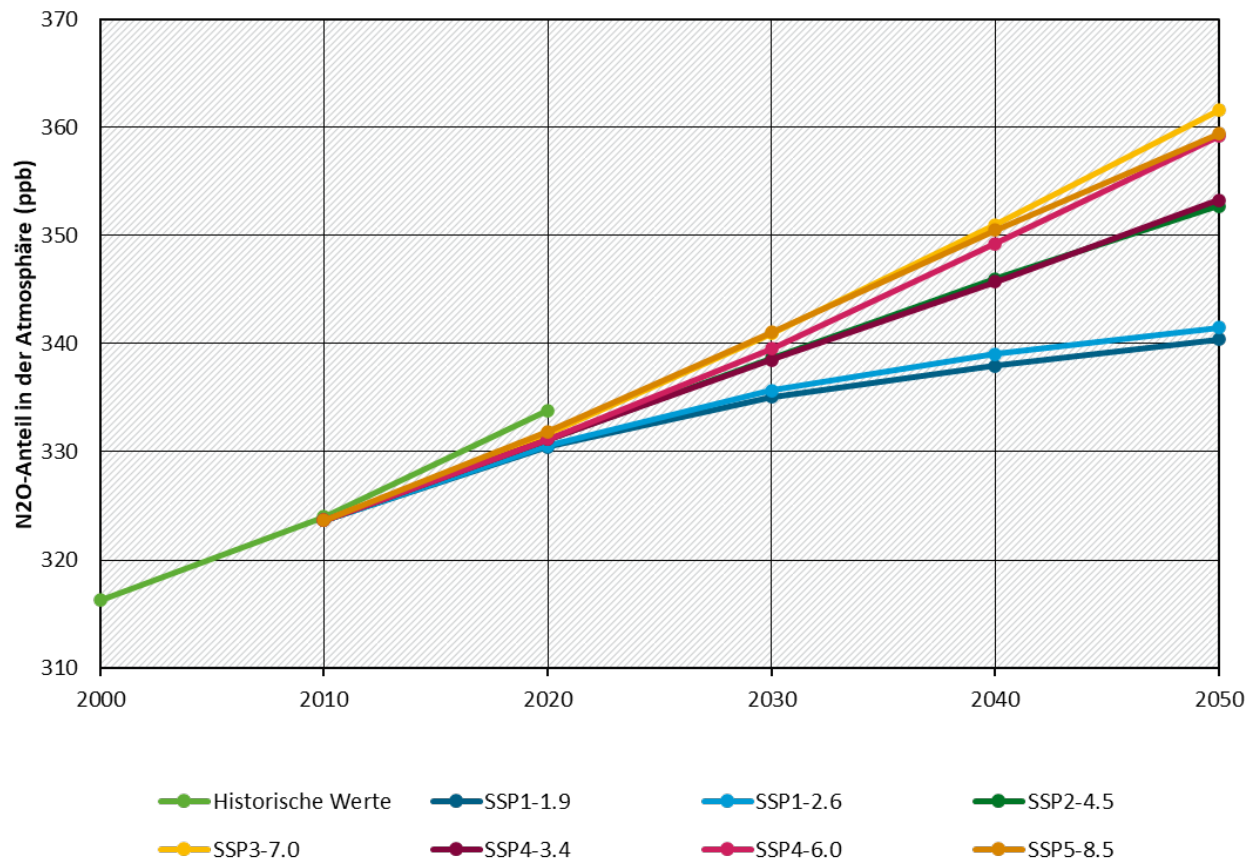
Quelle: eigene Darstellung auf Grundlage der Daten aus Tian et al. 2023a, Susanne Schödel.

Wenn die zukünftige Konzentration von N₂O betrachtet wird, sind die Szenarien laut Weltklimarat mit zusätzlichen grossen Unsicherheitsfaktoren behaftet, wenn damit der Klimawandel prognostiziert werden soll. Das liegt unter anderem daran, dass die Wechselwirkungen zum Beispiel auf den Permafrost noch unklar sind und daher mit sehr hypothetischen Annahmen gearbeitet werden muss (IPCC 2021).

Deshalb ist es sinnvoll, die zweite Gruppe von Szenarien auf Lachgas hin zu analysieren, die unter dem Begriff „Gemeinsam Genutzte Sozioökonomische Pfade“ (Englisch „Shared Socioeconomic Pathways“, SSP) zusammengefasst werden. Sie gehen von modellübergreifend abgestimmten Annahmen über die wichtigsten Faktoren für die zukünftige Entwicklung des Klimas aus, zu denen zum Beispiel die Bevölkerungsentwicklung, wirtschaftliche Prozesse, technologische Innovationen, politische Abläufe oder Lebensstile gehören. Damit verbunden sind Emissionen, die zum Beispiel durch Energiebedarfe, Verkehr und die Landnutzung entstehen. Es fließen auch Annahmen ein, mit welchen Maßnahmen der Klimawandel eingedämmt werden wird, indem zum Beispiel bestimmte Emissionen verringert werden. Von diesen Szenarien sind derzeit sieben gebräuchlich: Der günstigste Pfad geht von einer erfolgreichen Reduzierung von Treibhausgasemissionen und damit von einer Eindämmung des Klimawandels aus. Der schlechteste Pfad prognostiziert, dass keine Maßnahmen getroffen werden, und die Erderwärmung ungebrems weitergeht. Auch daraus lassen sich erwartete Konzentrationen von Treibhausgasen in der Atmosphäre ableiten.

Diese SSP-Szenarien wurden daher ebenfalls im Rahmen des Globalen N₂O-Budgets analysiert. Auch aus dieser Perspektive übertreffen die Emissionen und auch der aktuelle Lachgasgehalt in der Atmosphäre inzwischen die Annahmen aus allen Szenarien (Abbildung 13).

Abbildung 13: Atmosphärischer N₂O-Anteil: bisherige und erwartete Werte laut den Gemeinsam Genutzten Sozioökonomischen Pfaden (Shared Socioeconomic Pathways, SSP) im CMIP6



Quelle: eigene Darstellung auf Grundlage der Daten aus Tian et al. 2023a, Susanne Schödel.

Die Autor*innen stellen zusammenfassend fest, dass die Lachgasemissionen auf das Niveau der günstigsten RCP- oder SSP-Szenarien sinken müssen, wenn die Erderwärmung entsprechend dem Pariser Klimaabkommen auf deutlich unter 2°C begrenzt werden soll. In den Strategien zur Minderung des Klimawandels werde N₂O jedoch häufig nicht einbezogen, sondern nur die Reduzierung von CO₂ und Methan geplant. Dies könne dazu führen, dass die Klimawirkung der weiterhin ansteigenden Lachgasemissionen in der Zukunft durch einen noch größeren Abbau von CO₂- und Methanemissionen ausgeglichen werden müsste (Tian et al. 2020 und 2023a).

Ähnlich formuliert es der Weltklimarat: Für das Ziel von „Netto-Null-Emissionen“, mit dem der Klimawandel begrenzt werden soll, seien negative CO₂-Emissionen notwendig. Sie müssen die Lachgas- und Methanmengen kompensieren, die zum Beispiel in der Landwirtschaft und der Industrie im Laufe dieses Jahrhunderts weiterhin emittiert werden. Die die technischen Möglichkeiten, um sie vollständig zu verhindern, seien noch nicht ausreichend vorhanden (IPCC 2022a).

4 Anthropogene N₂O-Emissionen und deren Eindämmung

Das folgende Kapitel zeigt die Möglichkeiten auf, mit denen anthropogene Lachgasemissionen in den wichtigsten Bereichen reduziert werden können, also der Landwirtschaft, bei der Verbrennung von Biomasse, in der fossilen Energieerzeugung, in der (chemischen) Industrie sowie bei Abwässern.

Im Abschnitt 4.5 wird schließlich auf das Potential verschiedener Maßnahmen eingegangen. Dazu werden verschiedene Studien analysiert, in denen die zu erwartenden Kosten für deren Umsetzung berechnet werden. Die Grundlage dafür sind die sogenannten Grenzvermeidungskosten (Englisch „Marginal abatement cost curves“), die aufzeigen, wie viele Emissionen zu welchen Kosten gemindert werden könnten.

4.1 Landwirtschaft einschließlich Aquakulturen

Fast 60 Prozent der globalen anthropogenen Lachgasemissionen stammen aus der Landwirtschaft. Daher muss ein besonderes Augenmerk auf Minderungsmaßnahmen in diesem Sektor gelegt werden.

Hierzu ist umfangreiche Literatur sowohl zu Lachgas als auch zu allen weiteren Stickstoffarten veröffentlicht worden (zum Beispiel Smith et al. 2010, Reay et al. 2012, UNEP 2013, Paustian et al. 2016, Smith 2017, Winiwarter et al. 2018, MacLeod et al. 2019, Tian et al. 2020, Chang et al. 2021, Oehlmann et al. 2021, FAO 2023).

Auf internationaler Ebene hat die Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (Englisch „United Nations Economic Commission for Europe“, UNECE) 2007 eine „Task Force on Reactive Nitrogen“ eingerichtet. Sie entstand auf der Grundlage des völkerrechtlich bindenden Genfer Luftreinhalteabkommens, das informell als „Air Convention“ bezeichnet wird und 1983 in Kraft trat²³. Dieser Vertrag ermöglicht international koordinierte Maßnahmen, mit denen die grenzüberschreitende Luftverschmutzung verringert werden soll.

Die in der Task Force versammelten Expert*innen wurden beauftragt, einen Leitfaden mit technischen und wissenschaftlichen Informationen zu anthropogenem reaktivem Stickstoff zu entwickeln. Eine weitere Aufgabe der Expert*innengruppe bestand darin, Praktiker*innen und politische Entscheidungsträger*innen Optionen für ein „integriertes und nachhaltiges Stickstoff-Management“ aufzuzeigen, mit dem diese Emissionen vermindert werden können.

2022 veröffentlichte die Task Force diesen Leitfaden mit dem Schwerpunkt auf den Bereichen Ackerbau und Viehzucht (Sutton et al. 2022). Sie betrachteten dabei erstmals parallel alle Arten von reaktivem Stickstoff, also auch Lachgas, sowie die Minderungsoptionen. Den größten Anteil an unerwünschten Stickstoffverlusten machen zwar Ammoniak und Nitrat aus, und N₂O hat nur einen verhältnismäßig kleinen Anteil – teilweise unter ein Prozent – in den hier betrachteten Wirkungskreisen. Dennoch stellen die Autoren fest, dass Lachgasemissionen wegen ihrer Auswirkungen auf das Klima und die Ozonschicht relevant sind und deshalb auch deren Reduzierung angestrebt werden müsse.

Die Kernthese des Leitfadens lautet, dass weniger oder überhaupt kein Stickstoff in seinen verschiedenen Formen ungenutzt freigesetzt werden darf, wenn er in Ackerbau und Viehzucht eingesetzt wird²⁴. Idealerweise wird also zusätzlicher reaktiver Stickstoff, der in den Kreislauf

²³ Englisch „UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution“ (CLRTAP), https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=IND&mtidsg_no=XXVII-1&chapter=27&clang=en.

²⁴ Ähnlich dazu auch Richardson et al. (2023), wonach Stickstoff Bestandteil der planetaren Grenze der biogeochemischen Ströme (Englisch „Biogeochemical Flows“) ist, die nicht durch zusätzlichen reaktiven Stickstoff überschritten werden sollte.

gelangt, in einem ersten Schritt in Form von Dünger von Pflanzen aufgenommen, die als Tierfutter oder Lebensmittel dienen. Nach der Verwertung durch Tiere und Menschen entsteht wiederum Dünger, der erneut als Nährstoff für Pflanzen eingesetzt werden kann. Auch in den Zwischenschritten können stickstoffhaltige Nebenprodukte als Pflanzendünger verwendet werden – der Kreislauf würde damit optimiert oder sogar geschlossen. Dabei muss wegen der Wandlungsfähigkeit der reaktiven Stickstoffverbindungen untereinander darauf geachtet werden, dass sie nicht an einer Stelle erfolgreich reduziert werden, dadurch aber an anderer Stelle ein weiterer reaktiver Stickstoff zusätzlich entsteht, der nicht im Kreislauf verbleibt, sondern verloren geht (Englisch „pollution swapping“).

Um speziell Lachgas zu reduzieren, sollte laut dem Leitfaden der Schwerpunkt auf der effizienteren Verwendung von Stickstoff im gesamten Agrar- und Lebensmittelsystem unter Einsatz aller verfügbaren Maßnahmen gelegt werden. Die vorhandenen technischen Möglichkeiten, um Lachgasemissionen in diesem Sektor zu verringern, hätten im Vergleich zu den anderen Stickstoffquellen nur ein geringes Potential. Die Autor*innen schlagen ergänzend vor, dass grundlegende systemische Veränderungen in Betracht gezogen werden sollten, um Stickstoffverluste zu reduzieren, zum Beispiel bei der Ernährung von Menschen durch weniger tierische Nahrungsmittel sowie bei der Tierfütterung und dem Einsatz von Düngern.

Für den optimierten Einsatz aller Formen von Stickstoff werden außerdem 76 konkrete Maßnahmen und deren Auswirkungen auf die verschiedenen Folgeformen benannt. Für 13 dieser Optionen wird explizit angegeben, dass sie Lachgasemissionen reduzieren können. Sie gelten als ausreichend erforscht, haben sich als praktikabel erwiesen oder können anhand von quantitativen Daten im Rahmen von Experimenten validiert werden. Sie werden im Folgenden zusammengefasst.

Unter den weiteren Vorschlägen sind auch solche genannt, die eventuell Lachgas mindern können, jedoch nicht ausreichend erforscht sind. Auch bestehen häufig Wechselwirkungen, in denen nur von einer geringen Wirkung auf Lachgasmengen ausgegangen wird. Auf diese Maßnahmen wird hier nicht näher eingegangen.

Maßnahmen in Ställen, bei der Güllelagerung und -verarbeitung

- ▶ **Angepasste beziehungsweise reduzierte Eiweißzufuhr** in der Nahrung passend zum Bedarf der Tiere: Bei *Milch- und Fleischrindern* sowie *Schweinen* kann dadurch der Anteil überschüssigen Stickstoffs, den die Tiere ausscheiden, reduziert werden. Für *Geflügel* sind die Möglichkeiten begrenzter, da die Züchter hier im Durchschnitt die Ernährung bereits sehr optimiert haben und die Tiere innerhalb einer Herde das Futter unterschiedlich verwerten²⁵.
- ▶ **Abtrennung und Rückgewinnung von Ammoniak aus Gülle**: Hier wird, vereinfacht formuliert, Gülle in geschlossenen Behältern mit Luft in Kontakt gebracht, wodurch das Ammoniak darin verdampft und dann abtransportiert werden kann. Die Substanz kann mit weiteren chemischen Verfahren dann zu Ammoniumsulfat oder -nitrat weiterverarbeitet werden, die als Rohstoff für Mineraldünger verwendet werden können. Allerdings sind dies energieintensive Verfahren, wenn der Energieverbrauch für das Verdampfen nicht zum Beispiel durch vorhandene Biogasanlagen oder erneuerbare Energien gedeckt werden kann. Auch ist die Ausbeute an Stickstoff im chemischen Verfahren gering; zudem sind die Qualitätsanforderungen an die daraus entstehenden Rohstoffe für Düngemittel sehr hoch.

²⁵ Siehe dazu auch Schrade et al. (2023). Demnach konnten die Lachgasemissionen in einem Versuch mit Milchvieh um 20 Prozent pro Tier reduziert werden, wenn die Eiweißzufuhr um 30 Prozent abgesenkt wurde.

Feldanwendung von organischen und anorganischen Düngemitteln

- ▶ *Integriertes Nährstoffmanagement für Ackerkulturen und Futterpflanzen:* Hier werden zunächst nur organische Dünger wie zum Beispiel aus Gülle eingesetzt, bevor anorganische Dünger verwendet werden. Die notwendigen Mengen werden vor Ausbringung definiert, indem zuvor der Stickstoffgehalt sowohl der Gülle als auch des Bodens analysiert und mit dem tatsächlichen Stickstoffbedarf der Pflanzen abgeglichen wird. „Anorganisch“ ist hier durch die Autor*innen definiert als „hergestellt“, also als Dünger nicht natürlichen Ursprungs, und bezieht sich auch auf synthetische Dünger (Sutton et al. 2022). In dem Leitfaden wird erwähnt, dass der Anteil anorganischen Düngers auf landwirtschaftlichen Böden in der EU im Jahr 2014 bei 40 Prozent lag.
- ▶ *Räumlich und zeitlich bedarfsgerechter Einsatz von stickstoffhaltigen Nährstoffen:* Die Düngermengen werden genau definiert, und zwar in Abhängigkeit von Boden, Ackerkultur und erwartetem Ernteertrag sowie ökonomischen und ökologischen Rahmenbedingungen. Zusätzlich, so die Empfehlung des Leitfadens, sollte der Dünger möglichst gleichmäßig und damit effizient ausgebracht werden. Eine weitere Optimierung kann erzielt werden, indem der Dünger „teilflächenspezifisch“ verteilt wird. Das bedeutet, dass anhand von Echtzeitsensoren an den landwirtschaftlichen Maschinen oder Ernteertragskarten der Vorjahre an jeder Stelle nur so viel Dünger verteilt wird wie notwendig. Auch die Anpassung der Düngermengen an die Wachstumsphasen der Pflanzen ist sinnvoll.
- ▶ *Vermeidung von Risikogebieten:* In der Nähe von Wasserflächen oder in steilen Lagen kann Stickstoff ausgewaschen werden oder durch Denitrifikation als Lachgas in die Luft gelangen. Dünger sollte hier nicht oder nur begrenzt eingesetzt werden, und auch Weidetiere von Grundwasserleitern und Oberflächengewässern ferngehalten werden (siehe dazu auch Malerba et al. 2022).
- ▶ *Nitrifikation bei Gülle und anorganischen Düngern verhindern, bevor sie auf dem Feld als Dünger verwendet wird:* Mit sogenannten Inhibitoren wird die Umwandlung von Ammoniak in Nitrat unterdrückt. Damit werden unter anderem Folgeemissionen von Lachgas vermieden.

Flächennutzung und Landschaftspflege

- ▶ *Anpflanzung von Paludalkulturen in Uferbereichen oder Pflanzenkläranlagen:* „Paludalpflanzen“ sind Pflanzen, die in Sumpf- und Feuchtgebietsökosystemen wachsen. Diese Pflanzen entwickeln während der Wachstumsperiode oft eine beträchtliche Biomasse, die dem Wasser reaktiven Stickstoff entzieht. Die Biomasse kann geerntet und z. B. als Bioenergiequelle genutzt werden. Dadurch kann die Nitratbelastung in den Fließgewässern verringert werden, was allerdings abhängig ist von den hydrologischen Bedingungen, den biogeochemischen Prozessen im Boden und der Stickstoffaufnahme der Pflanzen. Allerdings steigt nach Angaben der Autor*innen das Risiko erhöhter statt gesenkter Lachgasemissionen, wenn diese Gebiete schlecht bewirtschaftet werden (siehe dazu auch Lawrence et al. 2021).
- ▶ *Vermeidung von Staunässe durch Entwässerungsmaßnahmen:* Dadurch verkürzt sich die Verweildauer unter anderem von Stickstoff, aus dem Lachgas entstehen kann. Allerdings können sich dabei die Nitrat- und Kohlenstoffverluste in die Wasserläufe erhöhen. Malerba et al. (2022) verdeutlichen die komplexen Wechselwirkungen anhand der Wiedervernässung von Mooren. Dies führt zwar zur Kohlenstoffbindung, verursacht aber

gleichzeitig relevante Methan- und Lachgasemissionen, sodass das ökologische Management dieser Flächen anspruchsvoll ist.

In einer weiteren Publikation von Lugato et al. aus dem Jahr 2018 gehen die Autor*innen auf die verbreiteten Bemühungen ein, durch eine entsprechende Bewirtschaftung der Böden die Kohlenstoffbindung zu verbessern. Dadurch können CO₂-Emissionen aus der Landwirtschaft reduziert werden. Sie betonen, dass hier die Lachgasemissionen bisher zu wenig einbezogen werden. Denn eine der Methoden zur besseren Sequestrierung von Kohlenstoff besteht darin, Deckfrüchte anzupflanzen, die Stickstoff binden, zum Beispiel Luzerne oder Klee. Da der Kohlenstoff- und der Stickstoffkreislauf eng gekoppelt sind, wirkt sich dies zwar positiv auf die CO₂-Bindung der Pflanzen aus, führt aber über mehrere Jahrzehnte hinweg auch zu steigenden Lachgasemissionen. In einer Modellrechnung wurden dazu auf Grundlage von knapp 8.000 Bodenproben aus der EU Emissionen bis in das Jahr 2100 berechnet. Im Ergebnis wurden die Probenstandorte in Summe schließlich zu einer Quelle von Treibhausgasemissionen. Deshalb sollten politische Maßnahmen zur Kohlenstoffsequestrierung von vornherein den Stickstoffkreislauf und daraus folgende Lachgasemissionen einbeziehen (Lugato et al. 2018).

In Bezug auf die Treibhausgasreduzierung in Aquakulturen stellt der IPCC fest, dass nur wenig Literatur vorliege (IPCC 2022a). Im Synthesebericht des UNEP aus dem Jahr 2013 wird vorgeschlagen, die Bewirtschaftungssysteme der Landwirtschaft und der Aquakulturen zu integrieren. Dabei würde Gülle zum Beispiel als Dünger in den Wasserflächen eingesetzt, um die Produktivität von Pflanzen – hier Plankton – und Fischen zu erhöhen. Das nährstoffreiche Wasser wiederum könnte als Dünger für den Ackerbau und die Pflanzen könnten als Futter für die Tiere verwendet werden. Ein weiterer Vorschlag lautet, Wassertierarten aus verschiedenen Ebenen der Nahrungskette in einer Aquakultur zu kombinieren, sodass der Abfall einer Spezies als Nahrung einer anderen dienen kann. Auch die Futtermittel und Nährstoffe könnten zielgerichteter und damit sparsamer eingesetzt werden. Diese Ansätze würden die Effizienz der Stickstoffnutzung erhöhen und damit Lachgasemissionen reduzieren. Integrierte Systeme für Aquakulturen waren zum Zeitpunkt der Publikation noch nicht weitverbreitet, unter anderem, weil sie in einer schnell wachsenden Branche schwierig umzusetzen seien (UNEP 2013).

Eine wiederkehrende Empfehlung zur Minderung von Treibhausgasemissionen aus der Landwirtschaft lautet, dass nicht nur auf der Angebots-, sondern auch auf der Nachfrageseite umgesteuert wird. Dazu zählt, die Verschwendung von Nahrungsmitteln zu verhindern, wodurch der Bedarf und damit die Produktionsmengen gesenkt werden könnten. Ein weiterer Schritt bestünde darin, den Milch- und Fleischkonsum in Ländern mit überdurchschnittlichem Verbrauch zu reduzieren. In der Folge könnten die tierische Produktion und damit auch deren Emissionen zurückgehen (UNEP 2013, Winiwarter et al. 2018, Chang et al. 2021).

4.2 Verbrennung von Biomasse und Herstellung von Biokraftstoffen

Der globale Anteil der Verbrennung von Biomasse an den anthropogenen Lachgasemissionen lag 2020 bei etwa elf Prozent.

Sie können auf natürlichem Weg oder durch menschlichen Einfluss entstehen, etwa wenn abgeerntete Ackerflächen angezündet werden, um Pflanzenreste zu entfernen. Stattdessen können sie auch gehäckselt, geschreddert, gemulcht oder als Kompost verwendet werden. Obgleich ein Teil des darin enthaltenen Stickstoffs durch Denitrifikation wieder zu Lachgas verwandelt wird, sind die entstehenden Emissionen in Summe geringer als bei der Verbrennung. Diese Praxis setzt sich vor allem dort durch, wo Bestimmungen zur Luftreinhaltung in Kraft sind, die primär die Feinstaubbelastung durch Brände reduzieren sollen (UNEP 2013).

Eine weitere Quelle sind natürliche Brände in Regionen, in denen Savannen als Vegetationszonen vorherrschen. 50 Prozent der Lachgasemissionen aus Landschaftsbränden entstehen dort. Menschen können diese Brände nur beschränkt kontrollieren, aber deren Häufigkeit und Zeitpunkte durch sogenanntes „vorgeschriebenes Verbrennen“ (Englisch „prescribed burning“) beeinflussen. Dadurch werden brennbares Material und somit auch Lachgasemissionen reduziert. Allerdings erhöht sich dadurch die Belastung der Luft mit Schadstoffen wie Feinstaub (UNEP 2013).

In manchen Regionen werden in Haushalten weiterhin Öfen oder Kochplätze verwendet, die Biomasse – zum Beispiel Holz – als Brennstoff verwenden und dadurch Lachgas emittieren. Diese Öfen können durch effizientere Systeme oder andere Brennstoffe, zum Beispiel Propangas, ersetzt werden. Propangas erzeugt zwar CO₂-Emissionen, ist bei dieser Verwendung in Summe aber klimaneutraler als Holz. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass sich die Luftqualität verbessert (UNEP 2013).

Die Herstellung von Biokraftstoffen verursacht ebenfalls Lachgasemissionen. Hier haben Wissenschaftler*innen im Rahmen von Lebenszyklusanalysen festgestellt, dass die Treibhausgasbilanz der Biokraftstoffe insgesamt schlechter sein kann als für fossile Kraftstoffe. Dies ist abhängig vom Stickstoffbedarf der angebauten Biomasse, aus der die Kraftstoffe hergestellt werden. Daher sollten für Biofuels Pflanzen verwendet werden, die wenig Stickstoffdünger benötigen. Konkret nennen Smith et al. hier Weide, Elefantengrass und Rutenhirse als Alternative zu Mais, Weizen oder Zuckerrohr (Crutzen et al. 2008, Smith et al. 2012 sowie Smith 2017).

4.3 Fossile Energieerzeugung sowie Industrie

Die Emissionen aus fossilen Brennstoffen sowie aus der Industrie machten zuletzt etwa 15 Prozent der globalen Lachgasemissionen aus.

Bei der Verbrennung von fossilen Kraftstoffen in stationären Anlagen (zum Beispiel Kraftwerken oder Anlagen zur sogenannten Wirbelschichtverbrennung) entsteht Lachgas unter anderem durch die Oxidation von organischem Stickstoff im Brennstoff. Die emittierte Menge ist abhängig vom Anteil des organischen Stickstoffs sowie der Temperatur und dem Sauerstoffgehalt während der Verbrennung. Die Emissionen können durch Technologien zur sogenannten selektiven katalytischen Reduktion um bis zu 80 Prozent abgesenkt werden (Kanter et al. 2013, Davidson et al. 2023). Öl oder Gas als Brennstoff verursachen außerdem weniger Emissionen als Kohle, und je effizienter die Energieausbeute von Kraftwerken ist, desto weniger fossile Kraftstoffe müssen eingesetzt werden (UNEP 2013, Davidson et al. 2023).

Für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren gilt, dass technische Innovationen in Katalysatoren die Lachgasemissionen mindern. Hierzu hat die EU mit der Euro-7-Norm im Dezember 2023 erstmals Grenzwerte für Lastkraftwagen und Busse eingeführt²⁶.

In der Schifffahrt werden ab 2026 die Lachgasemissionen in das Emissionshandelssystem der EU aufgenommen. Dadurch werden Anreize geschaffen, technische Lösungen zu installieren, durch die weniger Lachgas emittiert wird²⁷.

Die N₂O-Emissionen in der Industrie stammen vor allem aus der Produktion von Salpeter- und Adipinsäure²⁸. Sie können durch die bereits erwähnte katalytische Reduktion und weitere

²⁶ <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/12/18/euro-7-council-and-parliament-strike-provisional-deal-on-emissions-limits-for-road-vehicles/>, abgerufen am 29.12.2023.

²⁷ https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/reducing-emissions-shipping-sector_en, abgerufen am 29.12.2023.

²⁸ Weitere Produkte in geringerem Umfang sind Caprolactam und Glyoxal.

Methoden um 80 bis 99 Prozent reduziert werden. Salpetersäure ist ein Vorprodukt für synthetische Dünger sowie Adipinsäure. Diese wiederum wird für die Herstellung von Nylon und anderen synthetischen Fasern benötigt. Die Nachfrage nach Adipinsäure wird laut Davidson et al. (2023) von 2015 bis 2030 um 87 Prozent steigen.

Sowohl technische Minderungsmaßnahmen an den Industrieanlagen als auch die Aufnahme von Lachgas aus der Herstellung von Salpetersäure in das Emissionshandelssystem haben die hieraus entstandenen Lachgasmengen in der EU deutlich reduziert.

Derzeit stammen 86 Prozent der Lachgasemissionen der chemischen Industrie aus den Ländern China, USA, Singapur, Ägypten und Russland (IPCC 2022a). Von den 21 weltweit bekannten Anlagen zur Herstellung von Adipinsäure stehen elf in China; sie decken mehr als 90 Prozent der weltweiten Produktion ab. Die drei größten Produzenten von Salpetersäure sind die USA, Russland und China. Unter den etwa 580 Anlagen weltweit haben nur 100 Minderungsmaßnahmen installiert (Davidson et al. 2023)²⁹. Daher liegt hier ein hohes Potential, um mit technischen Maßnahmen an Produktionsanlagen für beide Säurearten die Lachgasemissionen zu senken.

Davidson et al. verweisen hier vor allem auf die politischen Möglichkeiten im Rahmen von multi- und bilateralen Abkommen. Ausdrücklich erwähnen sie in diesem Kontext die von Deutschland initiierte „Nitric Acid Climate Action Group“: Über bilaterale Abkommen mit verschiedenen Ländern außerhalb Europas werden Technologien zur Minderung von Lachgas in den Anlagen für die Produktion von Salpetersäure finanziert und installiert (Davidson et al. 2023). In derselben Publikation wird auf eine Untersuchung verwiesen, nach der 65 Prozent des weltweit produzierten Nylons in Personenkraftwagen und Leichtfahrzeugen verwendet wird. Die Fahrzeughersteller könnten in ihren Lieferketten die Vorgabe machen, dass nur Nylon aus Produktionsanlagen verwendet wird, die über Minderungsmaßnahmen für Lachgas verfügen. Die Mehrkosten hierfür werden auf 0,40 USD pro Fahrzeug geschätzt (Hasanbeigi et al. 2023).

Ein weiteres industrielles Produkt ist Lachgas als inhalierbares Narkosemittel für medizinische Zwecke. Hier besteht Reduktionspotential, indem es mit anderen Anästhetika kombiniert oder zum Beispiel durch Xenon ersetzt wird (Winiwarter et al. 2018).

4.4 Abwasser

Der globale Anteil der Lachgasemissionen aus Abwässern liegt aktuell bei etwa vier Prozent.

Hier wird unterschieden zwischen Abwässern, die unkontrolliert in die Natur fließen und solchen, die über vorhandene Kanalisationen in Kläranlagen geleitet und dort in ein- oder mehrstufigen Verfahren behandelt werden können, bevor sie wieder in den natürlichen Kreislauf gelangen (UNEP 2013). In der Literatur wird der Fokus auf die Abwasserbehandlung in Kläranlagen gelegt, weil dort die Emissionen effektiv verringert werden können.

Hauptzweck von Kläranlagen ist es, den reaktiven Stickstoff in den Abwässern – zum Beispiel durch gezielte Nitrifikation und Denitrifikation – unter anderem in unschädlichen elementaren Stickstoff (N₂) zu verwandeln³⁰. Ein weiteres Folgeprodukt ist Lachgas. Dessen Menge ist auch abhängig von Faktoren wie Temperatur, pH-Werten und dem Vorhandensein von gelöstem Sauerstoff. Der größte Anteil an Lachgas entsteht während der Belüftung in der biologischen

²⁹ Jörß et al. (2023) nennen andere Zahlen, schränken die Studie allerdings dahingehend ein, dass China nicht berücksichtigt wird, und es sich um eine „Schreibtischstudie“ (englisch „desk study“) handle. Davidson et al. beziehen sich auf die Daten aus dem GAINS Modell.

³⁰ <https://www.umweltbundesamt.de/umweltatlas/reaktiver-stickstoff/verursacher/abwasser-oberflaechenablauf/was-passiert-in-klaeranlagen-dem-reaktiven>, abgerufen am 03.01.2024.

Reinigungsstufe, und kann dort durch optimierte Prozesse verringert werden. Duan et al. benennen dazu in ihrer Metastudie aus dem Jahr 2021 verschiedene Methoden, die in Modellen, Laborexperimenten oder in der Praxis getestet wurden (Duan et al. 2021). Gruber et al. (2022) konkretisieren dies auf Grundlage einer ganzjährigen Messkampagne und Experimenten an 14 Kläranlagen in der Schweiz. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass es notwendig ist, eine ausreichend gute Datenlage über einen längeren Zeitraum zu beschaffen, um die treibenden Faktoren für die Lachgasemissionen und deren saisonale Unterschiede besser zu verstehen. Potential sehen sie vor allem in einer optimierten Denitrifikation, um den Stickstoff zu eliminieren und damit die Ansammlung von Nitrit und in der Folge Lachgas zu verhindern.

Das Minderungspotential wird für das Jahr 2030 auf unter ein Prozent der globalen Lachgasemissionen geschätzt (Winiwarter et al. 2018). Die Optimierung könne nur in mehrstufigen Kläranlagen umgesetzt werden, die vor allem in urbanen Räumen vorzufinden sind. Duan et al. plädieren dafür, die Reduzierung von Lachgasemissionen aus Kläranlagen in die Klimaschutzpläne der Städte aufzunehmen.

4.5 Kosten und Potential von Minderungsmaßnahmen für Lachgas

Wenn die hier beschriebenen Maßnahmen flächendeckend umgesetzt werden sollen, ist es notwendig, die Politik darüber zu informieren, welche Kosten damit verbunden sind und welche Erfolge erzielt werden können.

Als Bewertungsmaßstab und Entscheidungshilfe ist in der wissenschaftlichen Literatur das Konzept der Grenzvermeidungskosten (Englisch „Marginal abatement cost“, abgekürzt MAC) verbreitet. Für deren Berechnung werden als Eingangsdaten verwendet:

- ▶ Emissionen aus Treibhausgasinventaren auf globaler Ebene, die im Rahmen verschiedener Modelle in die Zukunft fortgeschrieben werden,
- ▶ Schätzungen der Emissionsreduzierung und der Kosten durch aktuell verfügbare Maßnahmen, angepasst für die verschiedenen Sektoren und Regionen.

Auf dieser Grundlage können sowohl das Minderungspotential in Mt CO₂-Äquivalenten pro Jahr als auch die damit verbundenen Kosten zum Beispiel in US-Dollar oder Euro pro Tonne CO₂-Äquivalenten berechnet werden. An den Kurven, die die Grenzvermeidungskosten abbilden, lässt sich für jede Maßnahme ablesen, wie viele Emissionen reduziert werden können, und ob sie Kosten einspart, kostenneutral ist oder steigende Kosten verursacht. Diese Vorgehensweise ermöglicht auch eine Auswertung, welche Menge an Emissionen bei einem konkreten Preis pro Tonne CO₂-Äquivalenten reduziert werden kann. Die Berücksichtigung der MACs unterstützt vor allem die Entwicklung und Bewertung von zukünftigen klimapolitischen Szenarien (Harmsen et al. 2019).

Im aktuellen Sechsten Sachstandsbericht des Weltklimarats wie auch in der weitergehenden Literatur liegt der Fokus auf den MAC-Kurven für Kohlendioxid, weil hier das größte Minderungspotential gesehen wird. Auf die Bedeutung der Nicht-CO₂-Treibhausgase, also auch Lachgas, wird im Wesentlichen in fünf Publikationen eingegangen, die auch vom Weltklimarat zitiert werden (Beach et al. 2015, Gambhir et al. 2017, Winiwarter et al. 2018, USEPA 2019, Harmsen et al. 2019).

Da die Studien unterschiedliche Maßnahmen und Modelle verwenden, fällt ein direkter Vergleich schwer. Einig sind sich die Autor*innen darin, dass Lachgas als eines der Nicht-CO₂-Treibhausgase unter dem aktuellen technischen und finanziellen Bedingungen effizient gemindert werden kann und dieses Potential in der Klimaschutzpolitik adressiert werden muss.

Ein Großteil der heute verfügbaren technischen Möglichkeiten kann ohne oder zu geringen Mehrkosten umgesetzt werden. Einigkeit besteht auch darin, dass die anthropogenen Lachgasemissionen letztlich nur in Teilen gemindert werden können, und vor allem in der Landwirtschaft und bei der Behandlung von Abwässern weiterhin entstehen werden. Es ist davon auszugehen, dass mehr als die Hälfte dieser Emissionen nicht vermeidbar ist (siehe dazu Winiwarter et al. 2018 Tabelle 1 und Harmsen et al. 2019 ebenfalls Tabelle 1).

In der Konsequenz müssen also andere Treibhausgase wie CO₂ und Methan noch stärker als bisher geplant reduziert werden, um den Klimaeffekt der nicht vermeidbaren Lachgasemissionen auszugleichen.

4.5.1 Wesentliche Ergebnisse aus fünf Publikationen zu Grenzvermeidungskosten

Die Auswertung der Grenzkosten bei Beach et al. aus dem Jahr 2015 enthält die Ergebnisse nur für die Summe der Nicht-CO₂-Treibhausgase, sodass keine konkreten Angaben für Lachgas möglich sind. Die Autor*innen weisen allgemein darauf hin, dass die Kurven Hilfestellung liefern, ob eine Maßnahme theoretisch Potential hat, Emissionen zu mindern, und dabei auch Kosteneinsparungen ermöglicht. Daraus lasse sich ableiten, ob sie profitabel wäre, selbst wenn keine weiteren Anreize für deren Umsetzung vorhanden wären. Wenn sich im weiteren zeitlichen Verlauf zeige, dass die Maßnahme dennoch nicht umgesetzt wird, deute dies auf andere Hindernisse hin. Das können hinderliche gesellschaftliche oder politische Rahmenbedingungen sein, eine Risikoaversion bei den Entscheidern, regulatorische oder rechtliche Hürden oder schwierige Marktstrukturen. Daher sei es wichtig, dass die gezielte Minderung von Treibhausgasemissionen Gegenstand der Politik ist, um die Umsetzung der möglichen Maßnahmen zu befördern (Beach et al. 2015).

Winiwarter et al. verwenden das bereits erwähnte GAINS-Modell, um die Lachgasemissionen bis 2050 für elf Regionen fortzuschreiben, und analysieren, wie viele Emissionen mit welchen Maßnahmen zu welchen Kosten gemindert werden können. Sie betrachten die Minderung von Lachgasquellen aus den Sektoren Landwirtschaft, chemische Industrie sowie Medizin, aus der Behandlung von Abwässern und aus der Wirbelschichtverbrennung. Die Autor*innen kommen zu dem Ergebnis, dass bis 2030 etwa sechs Prozent (4,3 bis 8,0 Prozent) der Emissionen mit Kosten unter 10 Euro pro Tonne CO₂-Äquivalenten reduziert werden könnten. Dies umfasst vor allem Maßnahmen in der chemischen Industrie, die optimierte Abwasserbehandlung, den Ersatz oder die Ergänzung von Lachgas durch andere Narkosemittel und die moderne Bewirtschaftung von Ackerland in großen landwirtschaftlichen Betrieben. Weitere Maßnahmen zur Lachgas-minderung für Ackerböden und Gülle verursachen Grenzkosten in Höhe von 30 bis 100 Euro pro Tonne CO₂-Äquivalenten in mittleren und großen landwirtschaftlichen Betrieben, sowie 80 bis 100 Euro pro Tonne in kleinen Betrieben. Die maximal mögliche Menge an Lachgasemissionen, die gemindert werden könne, wird auf 26 Prozent geschätzt. Deshalb sind der Studie zufolge weitere Schritte notwendig. Es gelte, die bestehenden Handlungsoptionen in allen Regionen weltweit zu verfeinern und effizienter zu nutzen, etwa beim Einsatz von Stickstoffdüngern. Da technische Optionen wahrscheinlich maximal 40 Prozent der Emissionen reduzieren können, wird schließlich vorgeschlagen, einen grundlegenden Wandel in der Ernährung der Menschen hin zu weniger tierischen Proteinen einzuleiten. Dadurch könnten die landwirtschaftliche Produktion und damit auch die Stickstoff- und Lachgasemissionen reduziert werden (Winiwarter et al. 2018).

Die Umweltschutzbehörde der USA bezieht in ihrer Studie aus dem Jahr 2019 sechs Lachgasquellen ein, in denen Minderungen zum Zeitpunkt der Publikation machbar waren: Verbrennung von fossilen Brennstoffen und Biomasse, chemische Industrie, Güllemanagement, Ackerland,

Reisanbau und Abwässer. Die Autor*innen gehen davon aus, dass bis 2030 nur zwei Prozent dieser Lachgasemissionen ohne Mehrkosten gemindert werden können, während weitere zehn Prozent technisch mit steigenden Kosten möglich sind. Das heißt, dass der Rest sogenannte residuale Emissionen wären, die nur dann gemindert werden könnten, wenn neue und effizientere Technologien verfügbar sind. In der weiteren Auswertung für einzelne Maßnahmen werden die Nicht-CO₂-Treibhausgase nicht getrennt ausgewiesen, sodass keine konkreteren Angaben für Lachgas möglich sind (USEPA 2019).

Harmsen et al. veröffentlichten 2019 neue MAC-Kurven auf der Grundlage bereits publizierter Berechnungen und neuerer Literatur zu möglichen Minderungsmaßnahmen. Im Rahmen eines „Integrierten Bewertungsmodells“ beziehen sie die Technologien ein, die zum Zeitpunkt der Veröffentlichung bekannt waren, und machten Annahmen über deren Weiterentwicklung sowie die Beseitigung von Hindernissen. Das betrifft die Sektoren Landwirtschaft (Dünger, Güllemanagement), chemische Industrie, Abwässer und fossile Brennstoffe in Fahrzeugen. Die wichtigste Kennziffer in dieser Publikation benennt das maximale Reduktionspotential bei Grenzkosten von bis zu 4.000 US-Dollar pro Tonne CO₂-Äquivalenten für die Jahre 2050 und 2100. Die Autor*innen stellen fest, dass zwei Drittel der Reduzierungen bei Grenzkosten von bis zu 100 US-Dollar pro Tonne CO₂-Äquivalenten möglich wären. Für Lachgas wird geschätzt, dass bis 2050 bis zu 40 Prozent der betrachteten Lachgasemissionen reduziert werden können, sofern auch hohe Kosten akzeptiert werden. Wie in den anderen Publikationen auch wird deutlich, dass mehrere Maßnahmen kombiniert und in einer Klimapolitik integriert werden müssen, die eine Minderung aller Treibhausgase zum Ziel hat, statt den Schwerpunkt allein auf Kohlendioxid zu legen (Harmsen et al. 2019).

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist, dass die Minderung der Nicht-CO₂-Treibhausgase wie Lachgas das verbleibende Kohlenstoffbudget entlastet und weniger kostenintensiv ist als die abschließliche Minderung von CO₂. Dies erläutern Gambhir et al. anhand ihrer Berechnungen, nach denen der größte Teil einer Minderung aller Treibhausgase bis in das Jahr 2100 bei Grenzkosten von unter 100 US-Dollar pro Tonne CO₂-Äquivalenten möglich sei, während diese Kosten nur für CO₂ schon bis 2030 höher lägen. Sie gehen konkret davon aus, dass Lachgas in Anlagen zur Herstellung von Salpetersäure und in der Medizin kostenneutral vermieden werden könne. Gleiches gelte für die Optimierung in der Abwasserbehandlung (Gambhir 2017). Die Berechnungen der Kosten für die einzelnen Maßnahmen beruhen wie bei Winiwarter et al. (2018) auf dem GAINS-Modell und kommen im Wesentlichen zu ähnlichen Ergebnissen. Die beiden Publikationen beziehen sich jedoch nicht aufeinander.

5 Ausblick

Lachgas ist ein relevantes Treibhausgas mit seinem fast dreihundertfachen globalen Erwärmungspotential im Vergleich zu CO₂. Die anthropogenen Emissionen vor allem aus der Landwirtschaft werden in den kommenden Jahren weiterhin ansteigen. Die Veränderung des Klimas, vor allem eine weitere Erwärmung, wird zu zusätzlichen Emissionen im natürlichen Umfeld und weiteren klimarelevanten Wechselwirkungen führen. Es ist absehbar, dass der absolute Anteil von Lachgas in der Atmosphäre und damit dessen Klimawirkung weiterhin ansteigen werden.

Diese Entwicklung kann umgekehrt werden, indem die vorhandenen technischen und politischen Möglichkeiten, um Lachgasemissionen zu reduzieren, konsequent verwirklicht werden. Dazu müssen sie Bestandteil von politischem Handeln zum Klimaschutz werden, das den Fokus bisher primär auf Kohlendioxid und Methan legt. Erfolgsversprechende Handlungsoptionen vor allem für die Landwirtschaft und die Industrie werden sowohl in der Wissenschaft also auch von den internationalen Initiativen und Organisationen vielfach beschrieben. Für die verbleibenden Emissionen, die nicht verhindert werden können, sind zusätzliche Anstrengungen zur Reduzierung von CO₂ und Methan notwendig.

Sowohl für die verlässlichere Berechnung der Lachgasemissionen und deren Reduzierung als auch zukünftiger Entwicklungen im Rahmen von Szenarien und Modellen ist es wichtig, für bessere und genauere Eingangsdaten zu sorgen. Dazu ist es unter anderem notwendig, mehr, dauerhaftere und engmaschigere Messkampagnen unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen durchzuführen, um die Ursachen und Mengen von Lachgasemissionen noch besser zu verstehen. Dies würde zum Beispiel auch erlauben, die Emissionsfaktoren des IPCC, die Grundlage für die nationalen Treibhausgasbilanzen sind, an regional und zeitlich unterschiedliche Bedingungen anzupassen.

6 Quellenverzeichnis

Arévalo-Martínez, DL; Kock, A; Steinhoff, T; Brandt, P; Dengler, M; Fischer, T; Körtzinger, A; Bange, HW (2017): Nitrous oxide during the onset of the Atlantic cold tongue. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 122(1), S. 171–184. <https://doi.org/10.1002/2016JC012238>

Bange, HW (2022): Non-CO₂ greenhouse gases (N₂O, CH₄, CO) and the ocean. *One Earth* 5(12), S. 1316–1318. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.11.011>

Bange, HW; Arévalo-Martínez, D; de la Paz, M; Farías, L; Kaiser, J; Kock, A; Law, CS; Rees, AP; Rehder, G; Tortell, PD; Upstill-Goddard, RC; Wilson, ST (2019): A Harmonized Nitrous Oxide (N₂O) Ocean Observation Network for the 21st Century. *Frontiers in Marine Science* (6). <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00157>

Beach, RH; Creason, J; Ohrel, SB; Ragnauth, S; Ogle, S; Li, C; Ingraham, P; Salas, W (2015): Global mitigation potential and costs of reducing agricultural non-CO₂ greenhouse gas emissions through 2030. *Journal of Integrative Environmental Sciences* 12, S. 87–105. <https://doi.org/10.1080/1943815X.2015.1110183>

Chang, J; Havlík, P; Leclère, D; de Vries, W; Valin, H; Deppermann, A; Hasegawa, T; Obersteiner, M (2021): Reconciling regional nitrogen boundaries with global food security. *Nature Food* 2, S. 700–711. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00366-x>

Crutzen, PJ; Mosier, AR; Smith, KA; Winiwarter, W (2008): N₂O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. *Atmospheric Chemistry and Physics* 8(2), S. 389–395, <https://doi.org/10.5194/acp-8-389-2008>

Cui, Z; Zhang, H; Chen, X; Zhang, C; Ma, W; Huang, C; Zhang, W; Mi, G; Miao, Y; Li, X; Gao, Q; Yang, J; Wang, Z; Ye, Y; Guo, S; Lu, J; Huang, J; Lv, S; Sun, Y; ... Dou, Z (2018): Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers. *Nature* 555(7696), S. 363–366. <https://doi.org/10.1038/nature25785>

Davidson, EA (2012): Representative concentration pathways and mitigation scenarios for nitrous oxide. *Environmental Research Letters* 7(2). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/2/024005>

Davidson, EA; Winiwarter, W (2023): Urgent abatement of industrial sources of nitrous oxide. *Nature Climate Change* 13(7), S. 599–601. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01723-3>

Duan, H; Zhao, Y; Koch, K; Wells, GF; Zheng, M; Yuan, Z; Ye, L (2021): Insights into Nitrous Oxide Mitigation Strategies in Wastewater Treatment and Challenges for Wider Implementation. *Environmental Science and Technology* 55(11), S. 7208–7224. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c00840>

FAO – Food and Agriculture Organization (2023): Pathways towards lower emissions – A global assessment of the greenhouse gas emissions and mitigation options from livestock agrifood systems. Rome. <https://doi.org/10.4060/cc9029en>

Gambhir, A; Napp, T; Hawkes, A; Höglund-Isaksson, L; Winiwarter, W; Purohit, P; Wagner, F; Bernie, D; Lowe, J (2017): The Contribution of Non-CO₂ Greenhouse Gas Mitigation to Achieving Long-Term Temperature Goals. *Energies* 10(5) 602. <https://doi.org/10.3390/en10050602>

Gidden, MJ; Riahi, K; Smith, SJ; Fujimori, S; Luderer, G; Kriegler, E; van Vuuren, DP; van den Berg, M; Feng, L; Klein, D; Calvin, K; Doelman, JC; Frank, S; Fricko, O; Harmsen, M; Hasegawa, T; Havlik, P; Hilaire, J; Hoesly, R; Horing, J; Popp, A; Stehfest, E; Takahashi, K (2019): Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: a dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century. *Geoscientific Model Development* 12(4), S. 1443–1475. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1443-2019>

Griffis, TJ; Chen, Z; Baker, JM; Wood, JD; Millet, DB; Lee, X; Venterea, RT; Turner, PA (2017): Nitrous oxide emissions are enhanced in a warmer and wetter world. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114(45), S. 12081–12085. <https://doi.org/10.1073/pnas.1704552114>

Gruber, W; Niederdorfer, R; Bürgmann, H; Joss, A; von Känel, L; Braun, D; Mohn, J; Morgenroth, E (2022): Lachgasemissionen aus ARA. Reduktionsmassnahmen zeichnen sich ab. *Aqua & Gas* 102(1), S. 14–22

Harmen, JHM; van Vuuren, DP; Nayak, DR; Hof, AF; Höglund-Isaksson, L; Lucas, PL; Nielsen, JB; Smith, P; Stehfest, E (2019): Long-term marginal abatement cost curves of non-CO₂ greenhouse gases. *Environmental Science & Policy* 99, S. 136–149. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.05.013>

Hasanbeigi, A; Sibal, A (2023). Stopping a Super-Pollutant: N₂O Emissions Abatement from Global Adipic Acid Production. *Global Efficiency Intelligence*. Florida, United States. Download unter: <https://www.globalefficiencyintel.com/stopping-a-superpollutant-n2o-emissions-abatement-from-global-adipic-acid-production>

IPCC (2013): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp

IPCC (2021): *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896

IPCC (2022a): *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926

IPCC (2022b): *Emissions Trends and Drivers Supplementary Material*. [Dhakal, S., J.C. Minx, F.L. Toth, Reisinger, W. F. Lamb, N. Döbbling, T. Wiedmann, K. Hubacek, R. M. Andrew, M. Crippa, P. M. Forster, J. Olivier, G. P. Peters, J. Pongratz, M. Rigby, M. Saunio, S. J. Smith, E. Solazzo, H. Tian, K. Blok, H. Clark, A. Cowie, J.S. Fuglestad, O. Geden, V. Ginzburg, C. Guivarch, J. I. House, R. Mrabet, G. J. Nabuurs, K. Riahi, A. H. Strømman, R. Schaeffer, D. P. van Vuuren, A. Al Khourdajie, R. Slade]. In IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Available from <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>

IPCC (2022c): *Zusammenfassung für die politische Entscheidungsfindung*. In: *Klimawandel 2022: Minderung des Klimawandels. Beitrag der Arbeitsgruppe III zum Sechsten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen* [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley (Hrsg.)]. Deutsche Übersetzung auf Basis der Version vom Juli 2022. Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn; Die Luxemburger Regierung, Luxemburg; Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Wien; Akademie der Naturwissenschaften Schweiz SCNAT, ProClim, Bern; November 2022. DOI 10.48585/ncrb-8p46.

Jörß, W; Ludig, S; Schneider, L (2023): Mitigation potentials for emissions of nitrous oxide from chemical industry in industrialised countries world-wide. Study for the Nitric Acid Climate Action Group (NACAG) on behalf of the Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK). Freiburg. Download unter: <https://www.oeko.de/publikation/mitigation-potentials-for-emissions-of-nitrous-oxide-from-chemical-industry-in-industrialised-countries-world-wide/>

Kanter, D; Mauzerall, DL; Ravishankara, AR; Daniel, JS; Portmann, RW; Grabel, PM; Moomaw, WR; Galloway, JN (2013): A post-Kyoto partner: Considering the stratospheric ozone regime as a tool to manage nitrous oxide. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110(12), S. 4451–4457. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222231110>

Kanter, D; Ogle, SM; Winiwarter, W (2020): Building on Paris: integrating nitrous oxide mitigation into future climate policy, *Current Opinion in Environmental Sustainability* 47, S. 7-12. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2020.04.005>

Lan, X; Thoning, KW; Dlugokencky, EJ (2024): Trends in globally-averaged CH₄, N₂O, and SF₆ determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. 2024-01. <https://doi.org/10.15138/P8XG-AA10>. Stand: 15.01.2024

Lawrence, NC; Tenesaca, CG; VanLoocke, A; Hall, SJ (2021): Nitrous oxide emissions from agricultural soils challenge climate sustainability in the US Corn Belt. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(46). <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.2112108118>

Lugato, E; Leip, A; Jones, A (2018): Mitigation potential of soil carbon management overestimated by neglecting N₂O emissions. *Nature Climate Change* 8, S. 219–223. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0087-z>

MacLeod, M; Hasan, MR; Robb, DHF; Mamun-Ur-Rashid, M (2019): Quantifying and mitigating greenhouse gas emissions from global aquaculture. *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 626*. Rom. Download unter: <https://www.fao.org/documents/card/en?details=ca7130en>. Stand 27.02.2024

Malerba, ME; Friess, DA; Peacock, M; Grinham, A; Taillardat, P; Rosentreter, JA; Webb, J; Iram, N; Al-Haj, AN; Macreadie, PI (2022): Methane and nitrous oxide emissions complicate the climate benefits of teal and blue carbon wetlands. *One Earth* 5(12), S- 1336–1341. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.11.003>

Medinets, S; White, S; Cowan, N; Drewer, J; Dick, J; Jones, M; Andrews, C; Harvey, D; Skiba, U (2021): Impact of climate change on soil nitric oxide and nitrous oxide emissions from typical land uses in Scotland. *Environmental Research Letters* 16(5). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abf06e>

Minx, JC; Lamb, WF; Andrew, RM; Canadell, JG; Crippa, M; Döbbling, N; Forster, PM; Guizzardi, D; Olivier, J; Peters, GP; Pongratz, J; Reisinger, A; Rigby, M; Saunio, M; Smith, SJ; Solazzo, E; Tian, H (2021): A comprehensive and synthetic dataset for global, regional, and national greenhouse gas emissions by sector 1970–2018 with an extension to 2019. *Earth Systems Science Data*, 13(11), S. 5213–5252, <https://doi.org/10.5194/essd-13-5213-2021>

Oehlmann, M; Rubel, C; Klaas, K; Nunes-Heinzmann, A; Schäppi, B; Peter, M; Angst, V; Reutimann, J; Dilling, O; Möckel, S; Wolf, A (2020): Maßnahmenvorschläge für ein Aktionsprogramm zur integrierten Stickstoffminderung. Abschlussbericht. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Texte 78/2021. Dessau-Roßlau. Download unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/massnahmenvorschlaege-fuer-ein-aktionsprogramm-zur>

Page, S; Siegert, F; Rieley, JO; Boehm, HD; Jaya, A; Limin, S (2002): The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997. *Nature* 420, S. 61–65. <https://doi.org/10.1038/nature01131>

Paustian, K; Lehmann, J; Ogle, S; Reay, D; Robertson, GP; Smith, P (2016): Climate-smart soils. *Nature* 532, S. 49–57. <https://doi.org/10.1038/nature17174>

Portmann, R; Daniel, JS; Ravishankara, AR (2012): Stratospheric ozone depletion due to nitrous oxide: influences of other gases. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 367(1593), S. 1256-1264. <https://doi.org/10.1098/rstb.2011.0377>

Reay, D; Davidson, EA; Smith, KA; Smith, P; Melillo, JM; Dentener, F; Crutzen, PJ (2012): Global agriculture and nitrous oxide emissions. *Nature Climate Change* 2, S. 410–416. <https://doi.org/10.1038/nclimate1458>

Riahi, K; van Vuuren, DP; Kriegler, E; Edmonds, J; O'Neill, BC; Fujimori, D; Bauer, N; Calvin, K; Dellink, R; Fricko, O; Lutz, W; Popp, A; Cuaresma, JC; Samir KC; Leimbach, M; Jiang, L; Kram, T; Rao, S; Emmerling, J; ... Tavoni, M (2017): The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview, *Global Environmental Change* 42, S: 153-168.

<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>

Richardson, K; Steffen, W; Lucht, W; Bendtsen, J; Cornell, SE; Donges, JF; Drüke, M; Fetzer, I; Bala, G; von Bloh, W; Feulner, G; Fiedler, S; Gerten, D; Gleeson, T; Hofmann, M; Huiskamp, W; Kummu, M; Mohan, C; Nogués-Bravo, D; ... Rockström, J (2023): Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Science Advances* 9(37), DOI: 10.1126/sciadv.adh2458

Shang, Z; Zhou, F; Smith, P; Saikawa, E; Ciais, P; Chang, J; Tian, H; Del Grosso, S; Ito, A; Chen, M; Wang, Q; Bo, Y; Cui, X; Castaldi, S; Juszczak, R; Kasimir, A; Magliulo, V; Medinets, S; Medinets, V; Sebbatini, S (2019): Weakened growth of cropland-N₂O emissions in China associated with nationwide policy interventions. *Global Change Biology* 25(11), S. 3706–3719. <https://doi.org/10.1111/gcb.14741>

Smith, KA (Hrsg.) (2010): Nitrous Oxide and Climate Change. Earthscan, London.

Smith, KA; Mosier, AR; Crutzen, PJ; Winiwarter, W (2012): The role of N₂O derived from crop-based biofuels, and from agriculture in general in Earth's climate. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 367(1593), S. 1169-1174. <https://doi.org/10.1098/rstb.2011.0313>

Smith, KA (2017): Changing views of nitrous oxide emission from agricultural soil: key controlling processes and assessment at different spatial scales. *European Journal of Soil Science* 68, D. 137-155.

<https://doi.org/10.1111/ejss.12409>

Solomon, S; Alcamo, J; Ravishankara, AR (2020): Unfinished business after five decades of ozone-layer science and policy. *Nature Communications* 11(4272). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18052-0>

Suntharalingam, P; Buitenhuis, E; Le Quéré, C; Dentener, F; Nevison, C; Butler, JH; Bange, HW; Forster, G (2012): Quantifying the Impact of Anthropogenic Nitrogen Deposition on Oceanic Nitrous Oxide. *Geophysical Research Letters* 39(7). <https://doi.org/10.1029/2011GL050778>

Sutton, MA; Howard, CM; Mason, KE; Brownlie, WJ; Cordovil, CM (Hrsg.) (2022): Nitrogen Opportunities for Agriculture, Food & Environment. UNECE Guidance Document on Integrated Sustainable Nitrogen Management. UK Centre for Ecology & Hydrology, Edinburgh, UK. Download unter:

<https://unece.org/environment-policy/publications/guidance-document-integrated-sustainable-nitrogen-management>, Stand: 27.02.2024

Tian, H; Yang, J; Lu, C; Xu, R; Canadell, JG; Jackson, RB; Arneeth, A; Chang, J; Chen, G; Ciais, P; Gerber, S; Ito, A; Huang, Y; Joos, F; Lienert, S; Messina, P; Olin, S; Pan, S; ... Zhu, Q (2018): The Global N₂O Model Intercomparison Project. *Bulletin of the American Meteorological Society* 99(6), S. 1231–1251, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0212.1>

Tian, H; Yang, J; Xu, R; Lu, C; Canadell, JG; Davidson, EA; Jackson, RB; Arneeth, A; Chang, J; Ciais, P; Gerber, S; Ito, A; Joos, F; Lienert, S; Messina, P; Olin, S; Pan, S; Peng, C; Saikawa, E; ... Zhang, B (2019): Global soil nitrous oxide emissions since the preindustrial era estimated by an ensemble of terrestrial biosphere models: Magnitude, attribution, and uncertainty. *Global Change Biology* 25(2), S. 640-659. <https://doi.org/10.1111/gcb.14514>

Tian, H; Xu, R; Canadell, JG; Thompson, RL; Winiwarter, W; Suntharalingam, P; Davidson, EA; Ciais, P; Jackson, RB; Janssens-Maenhout, G; Prather, MJ; Regnier, P; Pan, N; Pan, S; Peters, GP; Shi, H; Tubiello, FN; Zaehle, S; Zhou, F; ... Yao, Y (2020): A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks. *Nature* 586 (7828), S. 248–256. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2780-0>

Tian, H; Pan, N; Thompson, RL; Canadell, JG; Suntharalingam, P; Regnier, P; Davidson, EA; Prather, M; Ciais, P; Muntean, M; Pan, S; Winiwarter, W; Zaehle, S; Zhou, F; Jackson, RB; Bange, HW; Berthet, S; Bian, Z; Bianchi, D;

... Zhu, Q (2023a): Global Nitrous Oxide Budget 1980-2020. Earth System Science Data Discussions. Preprint. <https://doi.org/10.5194/essd-2023-401>. Stand: 27.02.2024

Tian, H; Pan, N; Thompson, RL; Canadell, JG; Suntharalingam, P; Regnier, P; Davidson, EA; Prather, M; Ciais, P; Muntean, M; Pan, S; Winiwarter, W; Zaehle, S; Zhou, F; Jackson, RB; Bange, HW; Berthet, S; Bian, Z; Bianchi, D; ... Zhu, Q (2023b): Data supplement to Tian et al (2023a): Global Nitrous Oxide Budget 1980-2020. Earth System Science Data Discussion, Preprint. <https://doi.org/10.5194/essd-2023-401>, in review (1.0) [dataset]. Global Carbon Project. <https://doi.org/10.18160/RQ8P-2Z4R>. Stand: 27.02.2024

Tian, L; Cai, Y; Akiyama, H (2019): A review of indirect N₂O emission factors from agricultural nitrogen leaching and runoff to update of the default IPCC values, Environmental Pollution 245, S. 300–306. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.11.016>

UBA – Umweltbundesamt (Hrsg.) (2022): INI 2021 – 8th Global Nitrogen Conference. Nitrogen and the United Nations Sustainable Development Goals. Dessau-Roßlau. Download unter: <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/ini2021-8th-global-nitrogen-conference>

UBA – Umweltbundesamt (2023): Umweltatlas, Baustein „Reaktiver Stickstoff“. Download unter: <https://www.umweltbundesamt.de/umweltatlas/reaktiver-stickstoff/reaktiver-stickstoff>, Stand: 23.08.2023

UNEP – United Nations Environment Programme (2013): Drawing down N₂O to protect climate and the ozone layer: a UNEP synthesis report. Nairobi, Kenia. Download unter: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/8489>

USEPA – United States Environmental Protection Agency (2019): Global Non-CO₂ Greenhouse Gas Emission Projections & Mitigation 2015–2050. US Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA. Download unter: <https://www.epa.gov/global-mitigation-non-co2-greenhouse-gases>

Voigt, C; Marushchak, ME; Abbott, BW; Biasi, C; Elberling, B; Siciliano, SD; Sonnentag, O; Stewart, KJ; Yang, Y; Martikainen, PJ (2020): Nitrous oxide emissions from permafrost-affected soils. Nature Reviews Earth & Environment 1(8), S. 420–434, <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0063-9>

Winiwarter, W; Höglund-Isaksson, L; Klimont, Z; Schöpp, W; Amann, M (2018): Technical opportunities to reduce global anthropogenic emissions of nitrous oxide. Environmental Research Letters 13(1), 014011. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9ec9>

Yao, Y; Tian, H; Shi, H; Pan, S; Xu, R; Pan, N; Canadell, JP (2020): Increased global nitrous oxide emissions from streams and rivers in the Anthropocene. Nature Climate Change 10, S. 138–142. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0665-8>

Yuan, J; Xiang, J; Liu, D; Kang, H; He, T; Kim, S; Lin, Y; Freeman, C; Ding, W (2019): Rapid growth in greenhouse gas emissions from the adoption of industrial-scale aquaculture. Nature Climate Change 9, S. 318–322. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0425-9>

A Anhang

A.1 Definition der 18 Regionen des Globalen N₂O-Budgets

Tabelle 6: Liste der Staaten und Hoheitsgebiete zu den 18 Regionen

Region Nr.	Name der Region	Staaten und Hoheitsgebiete
1	USA	Vereinigte Staaten von Amerika
2	Kanada	Kanada
3	Zentralamerika	Anguilla, Antigua und Barbuda, Bahamas, Barbados, Belize, Britische Jungferninseln, Cayman Islands, Costa Rica, Dominica, Dominikanische Republik, El Salvador, Guadeloupe, Guatemala, Haiti*, Honduras, Jamaika, Kuba, Martinique, Mexiko, Montserrat, Nicaragua, Panama, Puerto Rico, St. Kitts und Nevis, St. Lucia, St. Vincent und die Grenadinen, Turks- und Caicosinseln, US-amerikanische Jungferninseln
4	Brasilien	Brasilien
5	Nördliches Südamerika	Aruba, Französisch-Guayana, Grenada, Guyana, Kolumbien, Suriname, Trinidad und Tobago, Venezuela
6	Südwestliches Südamerika	Argentinien, Bolivien, Chile, Ecuador, Falklandinseln (Malwinen), Paraguay, Peru, Uruguay
7	Europa	Albanien, Andorra, Belarus, Belgien, Bosnien und Herzegowina*, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Faröer, Finnland, Frankreich, Gibraltar, Griechenland, Grönland, Insel Man, Irland, Island, Italien, Kanalinseln, Kosovo*, Kroatien, Lettland, Liechtenstein, Litauen, Luxemburg, Malta, Monaco*, Montenegro, Niederlande, Nordmazedonien*, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Republik Moldau, Rumänien, San Marino*, Schweden, Schweiz*, Serbien, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechien, Ungarn, Vatikanstadt*, Vereinigtes Königreich, Ukraine, Zypern
8	Nördliches Afrika	Ägypten, Algerien, Cabo Verde, Côte d'Ivoire, Dschibuti, Eritrea, Äthiopien, Gambia, Guinea, Guinea-Bissau, Libyen, Mali, Marokko, Mauretanien, Niger*, St. Helena, Ascension und Tristan da Cunha, São Tomé und Príncipe, Senegal, Somalia, Sudan, Südsudan, Tschad, Tunesien, Westsahara
9	Äquatorialafrika	Äquatorialguinea, Benin, Burkina Faso, Burundi, Kenia*, Kongo, Demokratische Republik Kongo, Gabun, Ghana, Kamerun, Liberia, Nigeria, Ruanda, Sierra Leone, Togo, Uganda, Vereinigte Republik Tansania, Zentralafrikanische Republik
10	Südliches Afrika	Angola, Botsuana, Eswatini, Komoren, Lesotho, Madagaskar, Malawi, Mauritius, Mayotte, Mosambik, Namibia, Réunion, Seychellen, Sambia, Simbabwe, Südafrika
11	Russland	Russische Föderation
12	Zentralasien	Kasachstan, Kirgisistan, Mongolei, Tadschikistan, Turkmenistan, Usbekistan
13	Mittlerer Osten	Armenien, Aserbaidshan, Bahrain, Georgien, Islamische Republik Iran, Irak, Israel, Jordanien, Katar, Kuwait, Libanon, Oman, Palästinensische Gebiete,

Region Nr.	Name der Region	Staaten und Hoheitsgebiete
		Saudi-Arabien, Arabische Republik Syrien, Türkei, Vereinigte Arabische Emirate, Jemen
14	China	China, Macau, Hongkong, Taiwan
15	Korea und Japan	Japan, Republik Korea, Demokratische Republik Korea
16	Südasien	Afghanistan, Bangladesch, Bhutan, Indien, Nepal, Pakistan, Sri Lanka
17	Südostasien	Brunei Darussalam, Kambodscha, Guam, Indonesien, Kiribati, Demokratische Volksrepublik Laos, Malaysia, Malediven, Marshallinseln, Myanmar, Nauru, Nördliche Marianen, Palau, Philippinen, Singapur, Salomonen, Thailand, Timor-Leste, Tokelau, Vietnam
18	Ozeanien	Amerikanisch-Samoa, Australien, Cookinseln, Fidschi, Föderierte Staaten von Mikronesien*, Französisch-Polynesien, Neukaledonien, Neuseeland, Niue, Norfolkinsel, Pazifikinseln, Papua-Neuguinea, Pitcairn-Inseln, Samoa, Tonga, Tuvalu, Vanuatu, Wallis und Futuna

Die Liste der Staaten und Hoheitsgebiete je Region wurde aus Tian et al. (2023a) ins Deutsche übertragen unter Verwendung des „Verzeichnisses der Staatennamen für den amtlichen Gebrauch in der Bundesrepublik Deutschland“ (Stand 12.06.2023) sowie des „Länderverzeichnisses für den amtlichen Gebrauch in der Bundesrepublik Deutschland“ (Stand 06.12.2023) des Auswärtigen Amts. Nicht alle Staaten, die das Auswärtige Amt führt, werden in Tian et al. (2023a) regional zugeordnet, zum Beispiel Kenia, Niger, die Schweiz und Nordmazedonien. Sie wurden soweit möglich bei den jeweiligen Regionen ergänzt und mit einem * markiert.

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Tian et al. 2023a, Susanne Schödel.

B Anhang

B.1 Tabellarische Darstellung des Globalen N₂O-Budgets

Tabelle 7: Globales N₂O-Budget für die 1980er, 1990er, 2000er, 2010er Jahre und das Jahr 2020

Entnommen aus Tian et al. 2023a sowie dem Daten-Supplement dazu. Angaben in Megatonnen (Mt) N₂O-N pro Jahr.

		1980– 1989	1990– 1999	2000– 2009	2010– 2019	2020
Anthropogene Lachgasflüsse (Bottom-up)		Mittelwert (Minimum; Maximum)	Mittelwert (Minimum; Maximum)	Mittelwert (Minimum; Maximum)	Mittelwert (Minimum; Maximum)	Mittelwert (Minimum; Maximum)
Landwirtschaft	Direkte Bodenemissionen	1,222 (1,063; 1,344)	1,475 (1,219; 1,640)	1,679 (1,370; 1,964)	1,988 (1,624; 2,431)	2,090 (1,739; 2,577)
	Viehdung auf Weideland	0,937 (0,536; 1,296)	1,057 (0,647; 1,430)	1,179 (0,739; 1,589)	1,300 (0,794; 1,780)	1,396 (0,861; 1,914)
	Düngemittel- management	0,248 (0,216; 0,279)	0,257 (0,228; 0,286)	0,248 (0,222; 0,275)	0,255 (0,229; 0,281)	0,264 (0,239; 0,288)
	Aquakulturen	0,017 (0,003; 0,035)	0,045 (0,009; 0,092)	0,081 (0,017; 0,167)	0,130 (0,027; 0,268)	0,159 (0,033; 0,327)
	Zwischensumme	2,423 (1,818; 2,954)	2,833 (2,103; 3,448)	3,187 (2,347; 3,995)	3,674 (2,674; 4,759)	3,909 (2,871; 5,106)
Andere direkte anthropogene Quellen	Fossile Brennstoffe und Industrie	1,033 (1,033; 1,033)	1,007 (0,945; 1,069)	1,056 (1,041; 1,072)	1,086 (1,013; 1,158)	1,056 (0,978; 1,134)
	Abfall und Abwasser	0,140 (0,125; 0,155)	0,189 (0,174; 0,203)	0,224 (0,209; 0,240)	0,270 (0,253; 0,286)	0,292 (0,275; 0,310)
	Biomasseverbrennung	0,859 (0,485; 1,161)	0,859 (0,485; 1,161)	0,820 (0,534; 1,045)	0,788 (0,527; 0,961)	0,763 (0,488; 0,939)
	Zwischensumme	2,033 (1,575; 2,453)	2,055 (1,604; 2,433)	2,101 (1,784; 2,357)	2,143 (1,793; 2,406)	2,111 (1,741; 2,382)
Indirekte Emissionen durch anthropogene Stickstoffeinträge	Binnengewässer, Ästuar, Küstenvegetation	0,290 (0,120; 0,388)	0,322 (0,129; 0,421)	0,355 (0,134; 0,468)	0,404 (0,145; 0,539)	0,416 (0,146; 0,570)
	Atmosphärische Stickstoffdeposition auf Landflächen	0,550 (0,465; 0,635)	0,642 (0,541; 0,744)	0,688 (0,577; 0,759)	0,735 (0,642; 0,848)	0,760 (0,648; 0,871)

		1980– 1989	1990– 1999	2000– 2009	2010– 2019	2020
	Atmosphärische Stickstoffdeposition auf Ozeanen	0,129 (0,091; 0,176)	0,126 (0,085; 0,174)	0,124 (0,081; 0,172)	0,122 (0,075; 0,171)	0,122 (0,075; 0,171)
	Zwischensumme	0,969 (0,676; 1,198)	1,091 (0,755; 1,339)	1,147 (0,793; 1,399)	1,261 (0,861; 1,538)	1,298 (0,869; 1,612)
Gestörte Lachgasflüsse durch Klima/CO ₂ /Landbedeckungs-änderung	Auswirkung durch CO ₂ -Anstieg	-0,409 (-0,791; 0,195)	-0,503 (-1,026; 0,240)	-0,601 (-1,251; 0,270)	-0,714 (-1,495; 0,288)	-0,809 (-1,649; 0,261)
	Auswirkung durch Klimawandel	0,377 (0,125; 0,776)	0,486 (0,171; 0,672)	0,550 (0,107; 0,793)	0,743 (0,219; 1,181)	0,886 (0,398; 1,814)
	Pulswirkung nach Entwaldung	0,843 (0,637; 1,145)	0,855 (0,616; 1,202)	0,865 (0,516; 1,286)	0,852 (0,444; 1,336)	0,835 (0,432; 1,345)
	Langzeitwirkung durch reduzierte reife Waldflächen	-1,236 (-1,087; -1,385)	-1,317 (-1,168; -1,466)	-1,370 (-1,228; -1,512)	-1,432 (-1,305; -1,560)	-1,483 (-1,402; -1,621)
	Zwischensumme	-0,425 (-1,116; 0,732)	-0,478 (-1,407; 0,648)	-0,556 (-1,855; 0,837)	-0,552 (-2,117; 1,245)	-0,571 (-2,230; 1,799)
Summe der anthropogenen Lachgasflüsse (Quellen abzüglich Senken)		5,000 (2,954; 7,337)	5,501 (3,056; 7,868)	5,880 (3,069; 8,587)	6,526 (3,192; 9,948)	6,746 (3,252; 10,898)
Natürliche Lachgasflüsse (Bottom-up)						
Natürliche Böden (Baseline)		6,427 (3,870; 8,543)	6,412 (3,849; 8,579)	6,426 (3,857; 8,538)	6,417 (3,853; 8,572)	6,443 (3,842; 8,711)
Offener Ozean (Baseline)		3,697 (3,046; 4,584)	3,609 (2,829; 4,476)	3,595 (2,719; 4,708)	3,616 (2,503; 4,663)	3,616 (2,503; 4,663)
Kontinentalsockel		1,214 (0,613; 1,628)	1,214 (0,613; 1,628)	1,214 (0,613; 1,628)	1,214 (0,613; 1,628)	1,214 (0,613; 1,628)
Binnengewässer, Ästuare, Küstenvegetation		0,084 (0,045; 0,140)	0,084 (0,045; 0,140)	0,084 (0,045; 0,140)	0,084 (0,045; 0,140)	0,084 (0,045; 0,140)
Blitze und atmosphärische Entstehung		0,4 (0,2; 1,2)	0,4 (0,2; 1,2)	0,4 (0,2; 1,2)	0,4 (0,2; 1,2)	0,4 (0,2; 1,2)
Oberflächensenke (Böden, Feuchtgebiete)		-0,01 (0,0; -0,3)	-0,01 (0,0; -0,3)	-0,01 (0,0; -0,3)	-0,01 (0,0; -0,3)	-0,01 (0,0; -0,3)
Summe der natürlichen Lachgasflüsse (Quellen abzüglich Senken)		11,811	11,708	11,709	11,721	11,746

	1980–1989	1990–1999	2000–2009	2010–2019	2020
	(7,774; 15,795)	(7,536; 15,723)	(7,434; 15,914)	(7,214; 15,903)	(7,202; 16,041)
Bottom-up Netto Lachgasflüsse (Quelle)	16,811 (10,728; 23,132)	17,209 (10,593; 23,591)	17,589 (10,503; 24,501)	18,246 (10,406; 25,852)	18,493 (10,454; 26,940)
Ozeane (Top-down)			2,843 (2,612; 3,180)	2,977 (2,737; 3,343)	2,706 (2,683; 2,728)
Landflächen (Top-down)			13,199 (12,149; 14,318)	14,461 (13,032; 15,888)	14,270 (13,860; 14,681)
Top-down Netto Lachgasflüsse (Quelle)			16,042 (14,862; 17,474)	17,438 (15,827; 19,232)	16,976 (16,587; 17,364)
Stratosphärische Senke (Top-down)			12,151 (11,744; 12,608)	12,629 (12,327; 12,943)	12,860 (12,494; 13,225)
Zum Vergleich: Atmosphärische chemische Senke (a)			12,890	13,373	14,042
Veränderung des atmosphärischen Vorkommens (b)			3,6 (3,6; 3,7)	4,6 (4,5; 4,7)	6,4 (6,2; 6,5)
Atmosphärische Belastung (in Millionen Tonnen Stickstoff)			1.528	1.570	1.592
Verweildauer in der Atmosphäre in Jahren (c)			119,3	117	

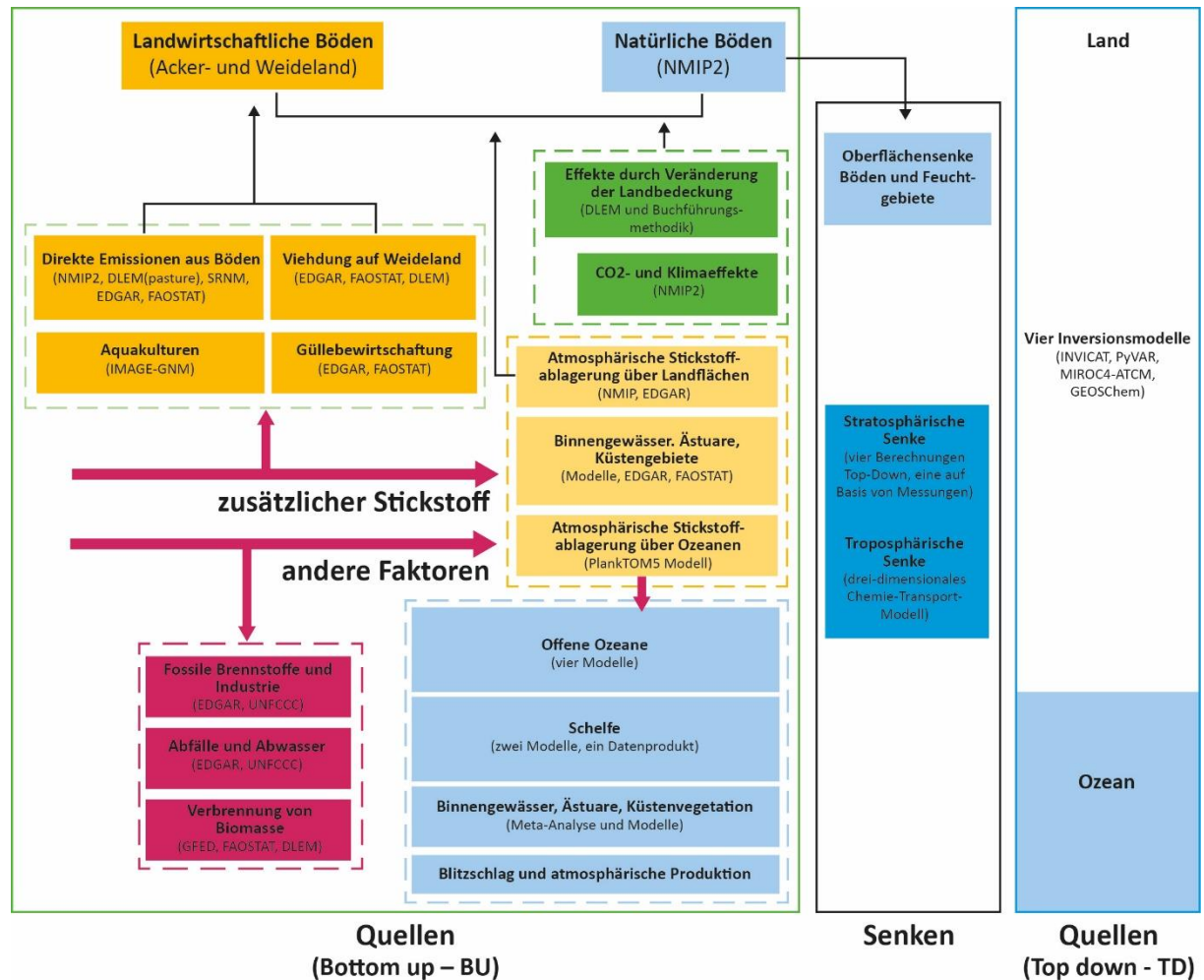
„Lachgasflüsse“ bezeichnet hier die anthropogenen und natürlichen N₂O-Quellen (positive Werte) und -Senken (negative Werte). Die Minimal- und Maximal-Beträge geben den Mittelwert aus den Minima und Maxima jeder verwendeten Datenquelle über das jeweilige Jahrzehnt an. Für die Ausgabe der Werte mit drei Stellen nach dem Komma wurden eigene Berechnungen im Datensatz aus dem Supplement von Tian et al. 2023a durchgeführt. Die Ergebnisse wurden zur Kontrolle mit den Werten aus Tabelle 2 in Tian et al. 2023a abgeglichen, die nur eine Nachkommastelle angeben. Differenzen beruhen auf Abweichungen bei Auf- und Abrundungen in den Summen. Bei der Biomasseverbrennung wurden – wie in Tian et al. 2023a – für das Jahrzehnt 1980–1989 die Werte aus dem Jahrzehnt 1990–1999 übernommen, da für die 1980er-Jahre nur eine anstelle von drei Datenquellen verwertbar war und dadurch die Ergebnisse nicht vergleichbar waren. Gleiches gilt für die Werte im Bereich „Offene Ozeane (Baseline)“ für den Zeitraum 2010 bis 2019 im Vergleich zu 2020. (a) Laut Tian et al. 2023a berechnet aus Satellitenbeobachtungen mit einem Photolysemodell (etwa ein Prozent dieser Senke findet in der Troposphäre statt). (b) Laut Tian et al. 2023a berechnet aus der kombinierten Aufzeichnung von Oberflächen-N₂O aus den Messnetzen der NOAA und AGAGE; die Spanne beruht auf Berechnungen gemäß Kapitel 6 des Fünften Sachstandsberichts der IPCC. (c) Gemäß Tian et al. 2023a deuten Satellitenbeobachtungen in der Stratosphäre darauf hin, dass die Verweildauer von Lachgas sich – wie angegeben – reduziert hat. Berechnungen aus atmosphärischen Chemie-Transport-Modellen bestätigen das jedoch nicht. Die Ursache für die unterschiedlichen Ergebnisse ist laut Tian et al. 2023a bisher nicht erklärbar.

Quelle: Tabelle 2 aus Tian et al. 2023a sowie eigene Auswertung des Daten-Supplements aus Tian et al. 2023b (https://meta.icos-cp.eu/collections/Sp5EjiaWhFYpC_O1ke7JxOPc, zuletzt abgerufen am 07.01.2024, Susanne Schödel.

C Anhang

C.1 Übersicht Daten und Modelle

Abbildung 14: Daten und Modelle für Bottom-up- und Top-down-Berechnungen von Lachgasemissionen

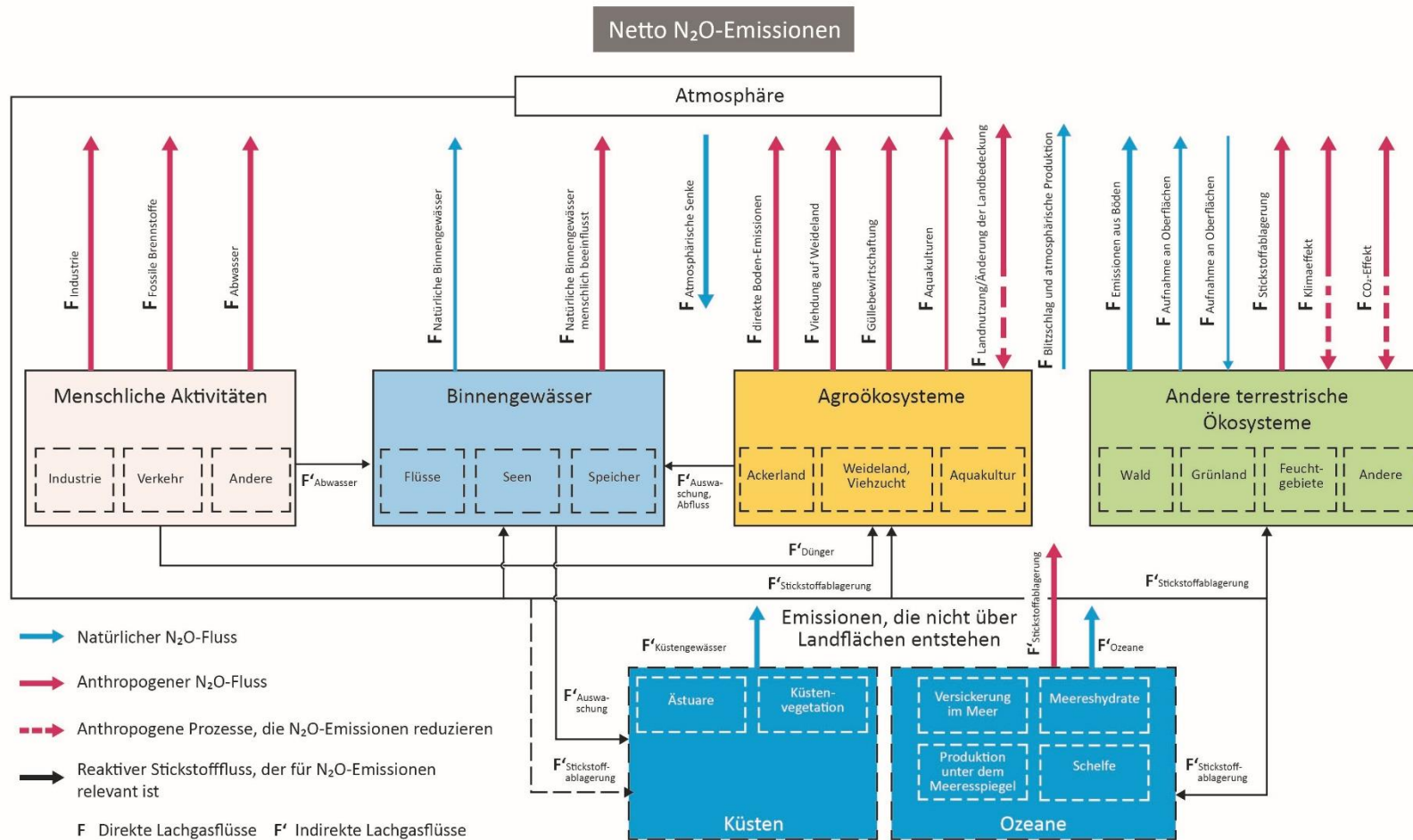


Quelle: Deutsche Übersetzung von Abbildung 4 in Tian et al. 2023a, Susanne Schödel.

D Anhang

D.1 Unterteilung der Lachgasflüsse nach Quellen und Senken

Abbildung 15: Aufteilung der Lachgasflüsse (Quellen und Senken)



Quelle: Deutsche Übersetzung von Abbildung 3 in Tian et al. 2023a, Susanne Schödel.