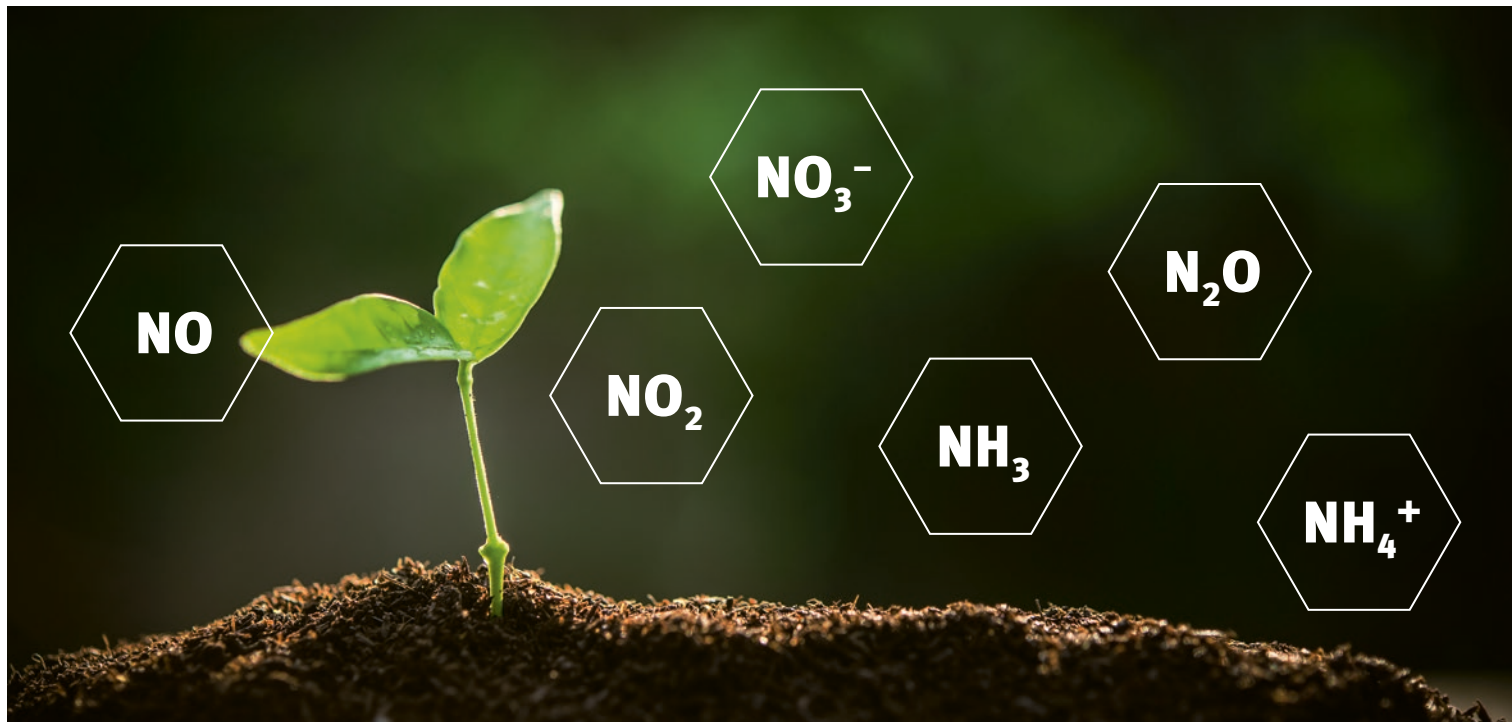




HINTERGRUND // MAI 2021

Stickstoff – Element mit Wirkung

Ein integrierter Zielwert setzt
einen neuen Rahmen

Impressum

Herausgeber:

Umweltbundesamt
Fachgebiet II 4.3, Luftreinhaltung und
terrestrische Ökosysteme
Postfach 14 06
06813 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt.de
 /umweltbundesamt
 /umweltbundesamt
 /umweltbundesamt

Bearbeiter:

Markus Geupel

Unter Mitarbeit von:

Simone Richter & Lisa Schlesinger

Satz und Layout:

le-tex publishing services GmbH

Publikationen als pdf:

www.umweltbundesamt.de/publikationen

Bildquellen:

Titel: Adobe Stock/totojang1977

Stand: Mai 2021

ISSN 2363-829X

HINTERGRUND // MAI 2021

Stickstoff – Element mit Wirkung

Ein integrierter Zielwert setzt
einen neuen Rahmen

Inhalt

1. Einleitung	6
2. Stickstoff, wie ein Element die Welt verändert	7
Stickstoff: Essentieller Nährstoff, chemischer Grundstoff und Schadstoff	7
Umwelt- und Gesundheitswirkungen von Stickstoffverbindungen	8
3. Stickstoff-Kreislauf in Deutschland	11
Qualitätsziele und Grenzwerte zum Schutz von Mensch und Umwelt	11
Der Stickstoffkreislauf	12
Zahlen, Daten, Stickstoffflüsse	12
4. Ein integrierter Ansatz für Deutschland	17
Warum ein integrierter Ansatz effektiver ist als sektorale Betrachtungen	17
Das integrierte Stickstoffziel zum Erreichen rechtlicher Anforderungen	18
Maßnahmenbewertung für ein Aktionsprogramm Stickstoffminderung	23
Bürgerdialog – Stickstoff geht uns alle an	24
Kosten-Nutzen-Analyse	24
5. Durch kluge Maßnahmen der gesellschaftlichen Verantwortung gerecht werden	26
Glossar	28
Literatur	29

1. Einleitung

Ernährung, Mobilität, Energiegewinnung, die Produktion und der Konsum von Gütern, Erholung und Freizeit – in nahezu allen Facetten des modernen Lebens spielt Stickstoff eine wichtige Rolle. Die Deckung des Stickstoffbedarfs auf der einen Seite und die Reduzierung von zu hohen Stickstoffeinträgen in die Umwelt auf der anderen Seite sind wichtige Ziele in der globalen Nachhaltigkeitsdebatte. Angesichts der wachsenden Weltbevölkerung ist Stickstoff als Pflanzennährstoff essentiell für eine ausreichende Nahrungsmittelproduktion. Gleichzeitig übersteigen schädliche Freisetzungen reaktiver Stickstoffverbindungen bereits jetzt die „planetaren Belastbarkeitsgrenzen“ für das zukünftige Leben auf unserem Planeten (Steffen et al., 2015). Wichtige Ziele der Vereinten Nationen für eine nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development Goals – SDG) sind eng mit dem Stickstoffkreislauf verknüpft. Die folgenden neun Ziele weisen einen direkten Bezug zum menschlichen Umgang mit Stickstoff auf: 1 Keine Armut, 2 Kein Hunger, 3 Gesundheit und Wohlergehen, 6 Sauberes Wasser und Sanitäreinrichtungen, 11 Nachhaltige Städte und Gemeinden, 12 Nachhaltiger Konsum und Produktion, 13 Maßnahmen zum Klimaschutz, 14 Leben unter Wasser, 15 Leben an Land.

Sollen diese Nachhaltigkeitsziele erreicht werden, brauchen wir ein effektives Stickstoffmanagement. Dafür müssen Wege gefunden werden, die Ressource Stickstoff nachhaltiger zu nutzen. Verfahren und Technologien zur Minimierung unerwünschter Stickstofffreisetzungen müssen entwickelt und Innovationen für eine effiziente Wiedergewinnung und Verwertung bisher nicht nutzbarer Stickstoffverbindungen vorangetrieben werden. Nicht zuletzt kann eine Veränderung der Lebensstile und Alltagsgewohnheiten zur Lösung des Stickstoffproblems beitragen. Ein nachhaltiges Management verlangt aber auch eine bewusste politische Steuerung und Umsetzung von Maßnahmen und Programmen – auf allen räumlichen Skalen von der lokalen über die nationale bis zur globalen Ebene. Denn Stickstoff ist ein Element, das sich großräumig im Kreislauf bewegt. Einmal in die Umwelt entlassen, kann Stickstoff verschiedene Verbindungen eingehen, die Luft, Gewässer, Landökosysteme, das Klima und die menschliche Gesundheit gefährden können.

Abbildung 1

Symbole der UN Nachhaltigkeitsziele, die einen direkten Bezug zum menschlichen Umgang mit Stickstoff und seinen Verbindungen aufweisen



Quelle: <https://17ziele.de/downloads.html>

Das Erreichen der Nachhaltigkeitsziele ist auch übergeordnete Maxime der Bundesregierung. Das Bundesministerium für Umwelt folgt einer Empfehlung des Sachverständigenrats für Umweltfragen (SRU, 2015) und arbeitet an der Erstellung eines integrierten Aktionsprogramms zur Stickstoffminderung. Im Jahr 2017 wurde – als erster Schritt – der erste Stickstoffbericht der Bundesregierung veröffentlicht (BMUB, 2017). Das UBA unterstützt diesen Prozess u. a. durch mehrere Forschungsprojekte (Bach et al., 2020b; Heldstab et al., 2020a; Oehlmann et al., 2021). Das vorliegende Hintergrundpapier fasst die Ergebnisse dieser Projekte zusammen: Es führt in den Nutzen und die Umweltwirkungen von Stickstoff und seinen Verbindungen ein, liefert zusammenfassende Informationen zu stickstoffbezogenen Stoffflüssen, Statistiken und Grenzwertüberschreitungen in Deutschland und untermauert die Notwendigkeit für eine übergreifende Betrachtung des Stickstoffkreislaufs. Ein wesentliches Element ist der Vorschlag eines integrierten Stickstoffziels für Deutschland als Leitlinie für die zukünftige Stickstoffpolitik in Deutschland.

2. Stickstoff, wie ein Element die Welt verändert

Stickstoff: Essentieller Nährstoff, chemischer Grundstoff und Schadstoff

Als Pflanzennährstoff und zum Erhalt der Bodenfruchtbarkeit ist Stickstoff unerlässlicher Bestandteil produktiver landwirtschaftlicher Systeme. Stickstoff wird von Pflanzen aus dem Boden in Form von Ammonium (NH_4^+) und Nitrat (NO_3^-) direkt aufgenommen und trägt zur Eiweißsynthese von Pflanzen bei. Zur Absicherung hoher Erträge sind heutzutage stickstoffhaltige Düngemittel unverzichtbar. Auch Menschen und Tiere benötigen Stickstoff für ihren Stoffwechsel. Sie nehmen Stickstoff in Form von pflanzlichem und tierischem Eiweiß auf und nutzen ihn für lebenserhaltende Körperfunktionen.

Früher konnte Stickstoff für die landwirtschaftliche Produktion nur aus natürlichen Quellen gewonnen werden (zum Beispiel Dung, Guano, Salpeterlagerstätten). Heute ermöglicht die industrielle Produktion von Mineraldünger eine ausreichende Stickstoffversorgung von Kulturpflanzen.

Denn im Jahr 1909 machte der Chemiker Fritz Haber¹ an der Technischen Hochschule Karlsruhe eine der wohl bedeutendsten Entdeckungen der Menschheit: Er entwickelte die künstliche Synthese von Ammoniak (NH_3). Bei der Badischen Anilin- und Soda Fabrik (BASF) entwickelte Carl Bosch das Verfahren weiter und bereitete die Grundlage für einen industriellen Prozess. Seitdem kann atmosphärischer Stickstoff in nahezu unbegrenzter Menge für die Produktion von Düngemitteln genutzt und die Nahrungsmittelproduktion gesteigert werden. Gleichzeitig führt jedoch ein Zuviel an Mineraldüngung und der hohe Energieverbrauch der Ammoniaksynthese zu negativen Umwelteffekten.

Heute entfallen auf die Ammoniaksynthese und die Düngemittelproduktion ca. 2 % des globalen Energiebedarfs (Smil, 2000; Licht et al., 2014). Im Jahr 2017 wurde eine jährliche globale Ammoniakproduktion von 142 Mio. t Stickstoff berichtet (U. S. Geological Survey, 2019). Die Weltbevölkerung wuchs von

1,6 Mrd. Menschen im Jahr 1900 auf 7,5 Mrd. Menschen im Jahr 2017 (United Nations, 2019). Dennoch gibt es immer noch Regionen der Welt, in denen nicht genug Stickstoffressourcen für eine produktive Landwirtschaft zur Verfügung stehen und in denen Menschen auch deshalb an Unterernährung leiden. Mit der weiterwachsenden Weltbevölkerung wird zusätzlicher Ammoniak für die landwirtschaftliche Produktion benötigt.

Auch der Hunger der Menschheit auf Fleisch wächst. Der Konsum tierischer Produkte ist in Europa mit rund 10mal höheren Stickstoffemissionen verbunden als der Verzehr pflanzlicher Produkte (Leip et al., 2014). Das liegt in erster Linie daran, dass Tiere in der Mast nur einen Teil des Stickstoffs im Futter aufnehmen können und den Rest wieder ausscheiden. Noch dazu geht Stickstoff auch im Futteranbau ungenutzt verloren. Daher fällt in Regionen mit intensiver, nicht an die Fläche gebundener Tierhaltung, oftmals mehr Wirtschaftsdünger an als auf den landwirtschaftlichen Flächen der Region verwertet werden kann (Gülleüberschuss). Auch wenn diese Überschüsse offiziell durch Güllerbörsen und Gülletransport reguliert werden, kommt es lokal zu erhöhten Einträgen von Nitrat (NO_3) in die Böden und das Grundwasser und Ammoniak (NH_3) in die Luft. Auch im Stall und bei der Lagerung von Wirtschaftsdüngern entweicht ein Teil des Stickstoffs aus der Tierhaltung als Ammoniak (NH_3) in die Luft.

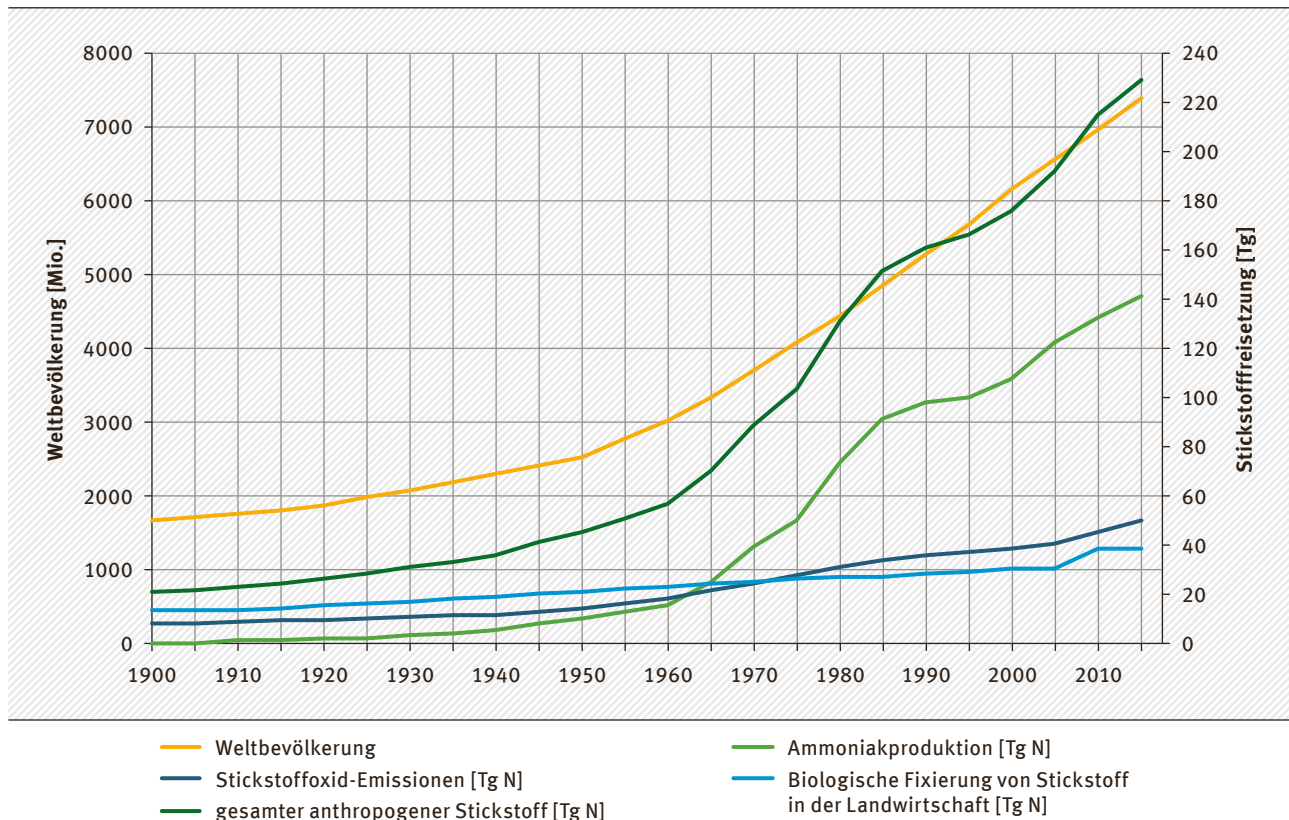
Darüber hinaus steuert die heutige industrielle Tierhaltung große globale Ströme von Stickstoff, beispielsweise gebunden in sojahlaltigen Futtermitteln, da sich der Futtermittelbedarf nicht über hiesige Anbauflächen decken lässt.

Auch das heutige Bedürfnis der Menschheit nach Mobilität, elektrischer Energie und industriellen Produkten führt zur großmaßstäblichen, unerwünschten Freisetzung von Stickstoffoxidemissionen (NO_x) durch Verbrennungsprozesse. Stickstoffoxide entstehen bei Verbrennungsvorgängen zum einen durch Umwandlung des in der Luft enthaltenen molekularen Luftstickstoffs und zum anderen aus dem im Brennstoff enthaltenen Stickstoff. Besonders bei Stein- und Braunkohleverbrennung spielt der Stickstoffgehalt der Kohle eine große Rolle an der

¹ Das wissenschaftliche Wirken von Fritz Haber in der Zeit des 1. Weltkrieges und zwischen den Weltkriegen zeichnet sich durch große Kontroversen aus, die nicht außer Acht gelassen werden dürfen. Für weitere Informationen siehe Friedrich, B. (2019). Fritz Haber at One Hundred Fifty: Evolving views of and on a German Jewish Patriot.

Abbildung 2

Globale Entwicklung der Stickstoffemissionen und der Weltbevölkerung



Quelle: Galloway, J.N., et al. (2003). „The nitrogen cascade.“ *BioScience* 53(4):341–356.
Original Datenreihe erweitert mit Herridge, D.F., et al. (2008); Li, J. and Y. Wang (2019); United Nations (2019); U.S. Geological Survey (2019).

Gesamtfreisetzung von Stickstoffoxiden, während bei der Benzin- und Dieselverbrennung Stickstoffoxide zu 100 % aus Luftstickstoff entstehen. Transport und Verkehr sowie große und mittelgroße Feuerungsanlagen in Industrie und Energiewirtschaft sind die bedeutendsten Ursachen für die Freisetzung von Stickstoffoxiden. Das führt dazu, dass besonders an Standorten mit hoher Verkehrsdichte in Innenstädten hohe Stickstoffdioxidbelastungen auftreten können (Umweltbundesamt, 2021). Die heutige Technik bei Verbrennung und Abgasreinigung ist weit fortgeschritten, so dass sich große Mengen der im Rauchgas enthaltenen Stickstoffoxide unmittelbar in den Motoren in unschädlichen Luftstickstoff zurück verwandeln lassen.

Der Mensch hat in den letzten einhundert Jahren in keinen anderen geochemischen Stoffkreislauf so stark eingegriffen wie in den Stickstoffkreislauf (Ertl & Soentgen, 2015).

Die globale Entwicklung der Stickstoffemissionen im Zusammenhang mit der Weltbevölkerung ist in Abbildung 2 dargestellt. Durch anthropogene Aktivitäten hat sich der Vorrat von reaktivem Stickstoff in der Umwelt global betrachtet verdoppelt und in Europa sogar verdreifacht (Sutton et al., 2011; Fowler et al., 2013). Um die ungleiche Verteilung der Ressource Stickstoff zu vermindern und gleichzeitig die vielfältigen negativen Wirkungen, die mit der Freisetzung von Stickstoff in die Umwelt verbunden sind, zu minimieren, sind globale, regionale und nicht zuletzt auch nationale Steuerungsprozesse nötig.

Umwelt- und Gesundheitswirkungen von Stickstoffverbindungen

Stickstoff und seine Verbindungen mit Sauerstoff (oxidiert) und Wasserstoff (reduziert) werden über verschiedene Pfade in die Umwelt eingetragen. Im Übermaß können sie negative Umwelt- und Gesundheitswirkungen hervorrufen. Eine Übersicht findet sich in Tabelle 1.

Tabelle 1

Umweltrelevante Stickstoffverbindungen, ihre Entstehung und ihre Auswirkungen

Stickstoff- verbindung	Hauptquelle/Entstehung	bedeutendste Auswirkungen
N ₂	Ist mit einem Anteil von 78 % Hauptbestandteil der Atmosphäre	keine
NO _x (Stickstoff- oxide)	Verbrennungsprozesse ▶ Verkehr ▶ Energiegewinnung und -nutzung ▶ Industrie	▪ Vorläuferstoff für die Bildung von gesundheits-schädlichen Substanzen wie bodennahem Ozon und sekundärem Feinstaub ▪ Bildung von Methämoglobin aus NO ▪ kurzfristig: Reizwirkung der Atemwege durch NO₂ ▪ langfristig: Erhöhung der kardiovaskulären Mortalität durch NO₂ ▪ Beitrag zu Versauerung und Eutrophierung der Böden und Ökosysteme (Nährstoffungleichgewichte, Bedrohung der Artenvielfalt, Verschiebung des Artenspektrums)
NO ₃ ⁻ (Nitrat)	Umwandlungsprodukt aus anderen Stickstoffoxiden, organischen N-Verbindungen und aus Ammoniak oder Ammonium ▶ Ackerbau, Nutzung tierischer Exkremente und Mineraldünger ▶ Industrie- und Kommunalabwässer ▶ Deposition von atmosphärischen Stickstoffverbindungen	▪ Grundwasser- und Oberflächengewässerbelastung ▪ Eutrophierung von Meeres- und Küstenökosystemen ▪ Gesundheitsprobleme bei stark belastetem Trinkwasser (Nitrosamine, Methämoglobin) ▪ Versauerung und Eutrophierung der Böden und Ökosysteme (Nährstoffungleichgewichte, Bedrohung der Artenvielfalt, Verschiebung des Artenspektrums)
NH ₃ /NH ₄ ⁺ (Ammoniak/ Ammonium)	Umwandlung und Freisetzung ▶ Nutztierhaltung in der Landwirtschaft (Umgang mit Wirtschaftsdüngern) ▶ Düngemittelherstellung und deren Anwendung ▶ Abwassereinleitung in Oberflächengewässer	▪ Versauerung und Eutrophierung der Böden und Ökosysteme (Nährstoffungleichgewichte, Bedrohung der Artenvielfalt, Verschiebung des Artenspektrums) ▪ Gesundheitswirkungen durch sekundären Feinstaub ▪ Fischgift ▪ Schädigung von Pflanzengewebe
N ₂ O (Lachgas)	Mikrobielle Umwandlungsprozesse in Böden und Gewässern (Denitrifikation) ▶ Landwirtschaft (Düngemiteleinsatz) ▶ Stickstoffbelastete naturnahe Ökosysteme ▶ Bodenverdichtung ▶ Industrieprozesse	▪ hochwirksames Treibhausgas (Treibhauseffekt) ▪ trägt zum Abbau der stratosphärischen Ozonschicht bei

Über die Luft können Stickstoffverbindungen zu Risiken für die Gesundheit werden. Stickstoffdioxid (NO₂), das vor allem bei Verbrennungsprozessen als Abgas in die Umwelt gelangt, reizt die Schleimhäute, vermindert dadurch die Lungenfunktion, beeinträchtigt das Herz-Kreislauf-System und führt langfristig zu erhöhter kardiovaskulärer Mortalität (World Health Organization, 2013; Faustini et al.,

2014; Guarnieri & Balmes, 2014; Schneider et al., 2018). Darüber hinaus ist es eine für die Bildung von bodennahem Ozon notwendige Vorläufersubstanz und trägt zusammen mit gasförmigem Ammoniak (NH₃) zur Bildung von sekundärem Feinstaub bei (von Schneidmesser et al., 2016).

Nitrat (NO_3^-) im Trinkwasser kann ein Risiko für die Gesundheit sein, weil es Ausgangspunkt für eine toxische Verbindung, das durch Reduktion entstehende sekundäre Nitrit (NO_2^-), ist. Die Aufnahme von Nitrat durch das Trinkwasser wird für den Menschen überwiegend mit zwei Gesundheitsgefahren in Verbindung gebracht: der akuten Säuglingsblausucht (Methämoglobinämie) und der Bildung von krebserzeugenden N-Nitroverbindungen. Die Trinkwasserversorger stellen aber die Qualität des Trinkwassers in Deutschland lückenlos sicher, so dass der gesetzliche Grenzwert von 50 mg Nitrat pro Liter eingehalten wird. Allerdings müssen einige Wasserversorger bereits tiefere Brunnen bohren, Brunnen verlagern oder unbelastete und belastete Rohwässer mischen, um die Trinkwasserqualität zu gewährleisten, weil die Nitratbelastung in leichter zugänglichen Schichten des Grundwassers zu hoch ist (WHO, 2016; Umweltbundesamt, 2017).

Als Nährstoff wirkt Stickstoff nicht nur produktionsfördernd in landwirtschaftlichen Systemen, sondern führt auch zu Eutrophierung und Biodiversitätsverlusten in Ökosystemen. In semi-natürlichen terrestrischen Ökosystemen, wie Heiden, Magerrasen oder auch Wäldern, führt die kontinuierliche Ablagerung von Nitrat und Ammonium als Staub und mit dem Niederschlag zu einer Anreicherung von Nährstoffen und damit zu einer Verschiebung im Artenspektrum: An nährstoffarme Bedingungen angepasste Pflanzenarten sind in ihrer Konkurrenzfähigkeit beeinträchtigt (Riecken et al., 2006; Bundesamt für Naturschutz (BfN), 2016; Schaap et al., 2018). Durch die enge Pflanzen-Insekten-Beziehung haben Veränderungen in der Pflanzengesellschaft auch Auswirkungen auf die Insektenpopulationen. Besonders betroffen sind Insekten, die vorrangig auf stickstoffarme und offene Habitate angewiesen sind, da sie weniger Brut- und Wirtspflanzen finden (Umweltbundesamt, 2019). Nicht zuletzt tragen Stickstoffeinträge auch zur Versauerung von Böden bei.

Ammoniak (NH_3) hat in hohen Konzentrationen auch direkte toxische Wirkungen auf Blattorgane (Cape et al., 2009). Besonders empfindlich reagieren Flechten und Moose auf den Kontakt mit Ammoniak. Ammoniak entsteht vor allem in der Landwirtschaft, sowohl in der Tierhaltung als auch durch den Umgang mit Düngemitteln. Ammoniak kann direkt in die Spaltöffnungen von Pflanzen eindringen oder

es lagert sich umgewandelt in Ammonium in Staub und Niederschlag in Ökosystemen ab und wirkt dort ebenfalls eutrophierend und versauernd.

Neben terrestrischen Ökosystemen ist auch die aquatische Lebensumwelt betroffen. Zu viele Nährstoffe führen hier zur Eutrophierung und damit verbundene massenhafte Algenwachstum. In Süßgewässern ist dabei meistens der Phosphor der begrenzende Nährstoff. In Meeres- und Küstenökosystemen wirkt Stickstoff begrenzend. Übermäßiges Algenwachstum ist mit ästhetischen Wirkungen verbunden und somit nachteilhaft für die Tourismusindustrie. Außerdem resultiert es in sommerlicher Sauerstoffarmut und wirkt sich auf diese Weise auf Biodiversität, Fischbestände und Fangquoten aus (HELCOM, 2018). Gelöstes Ammonium (NH_4^+) und Nitrit (NO_2^-) wirken toxisch auf die Gewässerfauna.

Die Stickstoffverbindung Lachgas (N_2O) ist ein hochwirksames Treibhausgas. Laut dem 5. Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC) ist es pro Mengeneinheit etwa 300 Mal stärker klimawirksam als CO_2 . Im Jahr 2010 hatten die Lachgas-Emissionen einen Anteil von 6,2 Prozent an den gesamten globalen Treibhausgasemissionen in Kohlendioxid-Äquivalenten (IPCC, 2013). Lachgas entsteht vor allem in stickstoffintensiven, landwirtschaftlichen Systemen.

Darüber hinaus ist Lachgas in der Atmosphäre sehr langlebig und steigt, weil es leichter ist als Luft, in große Höhen unserer Atmosphäre auf. In der Stratosphäre trägt es zum Abbau der vor zu starker UV-Einstrahlung schützenden Ozonschicht bei. Lachgas (N_2O) hat dabei mittlerweile die größte Rolle übernommen (Kanter et al., 2016).

Nicht zuletzt führen atmosphärische Stickstoffbelastungen in Kombination mit anderen Luftschadstoffen zur Schädigung von Bausubstanz und Baudenkmalern und verursachen jedes Jahr beträchtliche zusätzliche Pflege- oder Restaurierungsaufwendungen. Stickstoffverbindungen, insbesondere Salpetersäure (HNO_3) können zum Beispiel einen Anteil von mehr als fünfzig Prozent bei der Verwitterung von Kalkstein oder der Verschmutzung von Glasflächen haben (ICP Materials, 2018).

3. Stickstoff-Kreislauf in Deutschland

Qualitätsziele und Grenzwerte zum Schutz von Mensch und Umwelt

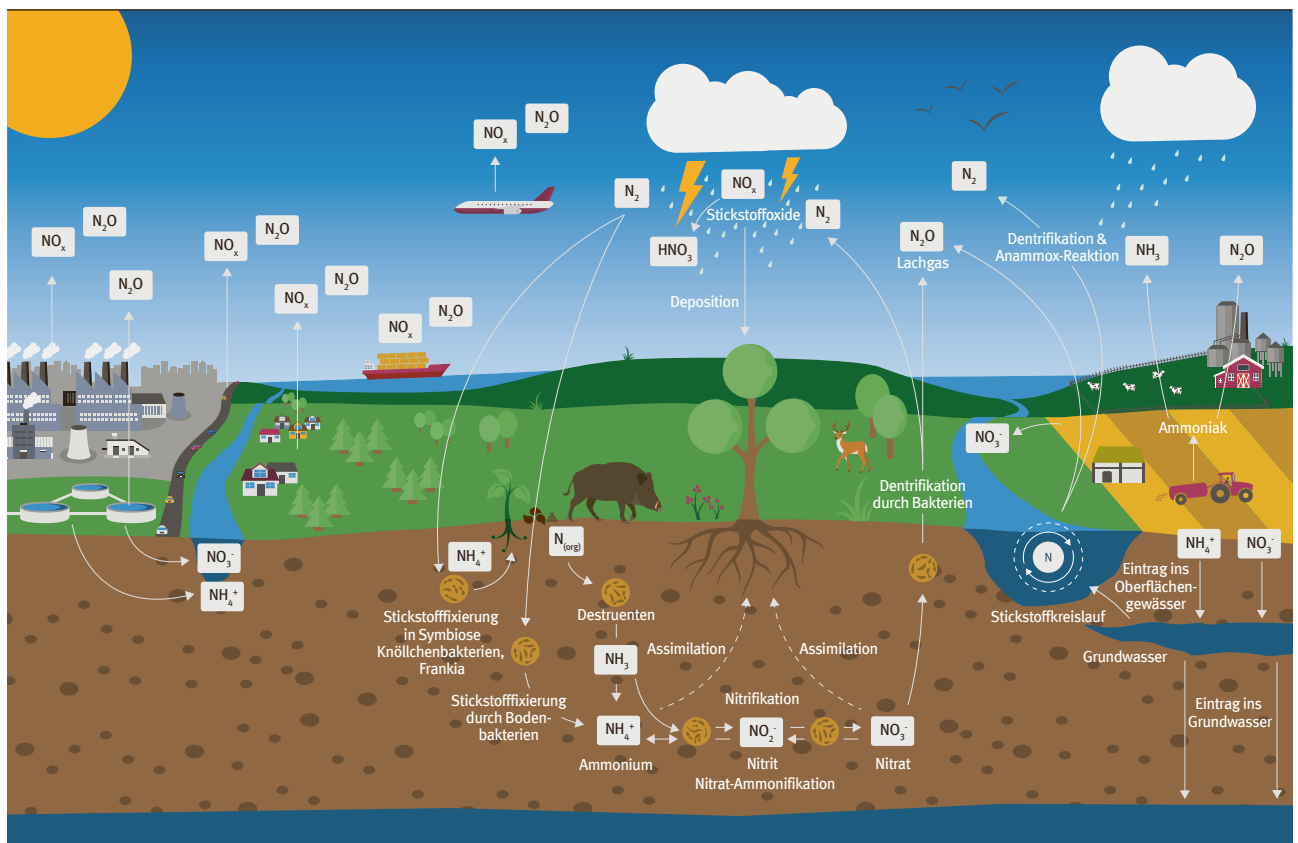
Zum Schutz von Mensch und Umwelt gibt es zahlreiche stickstoffbezogene Umweltziele. Dafür sind entweder Grenzwerte für die Konzentration bestimmter Stickstoffverbindungen festgelegt, um z. B. eine gute Luft- oder Wasserqualität sicherzustellen, oder es werden stoffbezogene Minderungsverpflichtungen oder Emissionshöchstmengen festgeschrieben, um die Einträge in die Luft, Gewässer und Ökosysteme zu senken. Im Grundwasser beispielsweise gilt derzeit ein Grenzwert von 50 mg l^{-1} für Nitrat, für terrestrische Ökosysteme gelten ökosystemspezifische, kritische Eintragsraten (Critical Loads), um die Eutrophierung durch Stickstoffdeposition aus der Luft zu begrenzen, und zum Schutz der Gesundheit gilt ein Konzentrationsgrenzwert für Stickstoffdioxid (NO_2) in der Luft von $40 \mu\text{g m}^{-3}$ im Jahresmittel. Solche Werte sind Teil internationaler Protokolle, festgeschrieben in EU-Richtlinien, oder verbindlich

festgelegt in nationalen Verordnungen. Dort, wo diese Grenzwerte nicht eingehalten werden können, besteht ein begründetes Risiko, dass die Umweltqualität durch zu hohe Einträge von reaktivem Stickstoff nicht ausreichend sichergestellt werden kann. Ein Überblick über die stickstoffbezogenen Umweltqualitätsziele findet sich in Tabelle 3, Kapitel 4.

Durch unzureichenden, von Verlusten an die Umwelt geprägten Umgang mit der Ressource Stickstoff in der Landwirtschaft und durch Freisetzung von Stickstoffverbindungen in die Atmosphäre bei Verbrennungsprozessen werden in Deutschland viele stickstoffbezogene Umweltziele nicht oder nur unzureichend erreicht. Grenzwertüberschreitungen von Nitrat im Grundwasser in landwirtschaftlich intensiv genutzten Gebieten mit gleichzeitig hohem Auswaschungspotential von Stickstoff in grundwasserleitende Schichten, Critical Load-Überschreitungen für Stickstoffeinträge in Gebieten mit empfindlichen

Abbildung 3

Schematische Darstellung wichtiger Vorgänge und Querbeziehungen des Stickstoffkreislaufs



Quelle: kopfarbyte UG/Bosch & Partner GmbH, Umweltatlas Reaktiver Stickstoff
<https://www.umweltbundesamt.de/umweltatlas/reaktiver-stickstoff/einfuehrung/gestatten-reaktiver-stickstoff/wie-veraendert-der-mensch-den-natuerlichen>

Ökosystemen und hoher Stickstoffdeposition oder NO_2 -Grenzwertüberschreitungen in Städten mit hoher Verkehrsdichte sind nur drei von mehreren Beispielen (<https://www.umweltbundesamt.de/daten>).

Diese Situation führt dazu, dass sich Deutschland mehreren EU-Vertragsverletzungsverfahren gegenüber sieht². Derzeit laufen EU-Vertragsverletzungsverfahren zur unzureichenden Umsetzung der EU Nitratrichtlinie und der Luftqualitätsrichtlinie und zwar konkret in Bezug auf die nicht ausreichende Einhaltung der Nitrat-Grenzwerte und der NO_2 -Jahreswerte. Seit Juli 2019 läuft auch ein Vertragsverletzungsverfahren in Bezug auf die FFH-Richtlinie, weil Deutschland keine ausreichenden Maßnahmen zur Vermeidung der Verschlechterung von artenreichem Grünland³ getroffen habe und charakteristische Arten in den betroffenen Lebensraumtypen, unter anderem durch erhöhte Stickstoffverfügbarkeit, in ihrem Erhaltungszustand gefährdet sind.

Der Stickstoffkreislauf

In seinen Verbindungen ist Stickstoff ein sehr mobiles und wandelfähiges Element. Reaktiver Stickstoff in oxidierter oder reduzierter Form gelangt aus verschiedenen Quellen in die Umwelt und wird auf unterschiedlichen Pfaden durch die Umweltmedien Boden, Luft, Wasser, Pflanzen, Tiere und Mensch transportiert und kann dort negative Wirkungen ausüben. Beispielsweise kann ein als Ammoniak (NH_3) in der Landwirtschaft freigesetztes Stickstoffatom nacheinander verschiedene Formen durchlaufen und Wirkungen entfalten: So kann es vom Regen als Ammonium (NH_4^+) in einen nahegelegenen Wald eingetragen werden, wo es von einer Pflanze aufgenommen wird, die im Winter abstirbt und von Mikroorganismen zersetzt wird. Dabei wird das Stickstoffatom als Nitrat (NO_3^-) freigesetzt und nach einem Regen in einen Bach ausgespült. Von dort fließt es ins Meer und wird von einer Alge aufgenommen. Diese wird nach ihrer Blüte von Bakterien abgebaut und im Zuge der Prozesse wird das Stickstoffatom in ein Lachgas-Molekül eingebaut (N_2O), das in die Atmosphäre entweicht. Viele weitere Wege und Zusammenhänge des Stickstoffs sind bekannt (Abbildung 3). Das Fokussieren auf nur einzelne Bereiche

des Stickstoffkreislaufs kann daher dazu führen, dass wichtige Wechselwirkungen übersehen werden. Ein übergreifendes Verständnis der Querbeziehungen innerhalb des Stickstoffkreislaufs ist daher für ein effektives Stickstoffmanagement eine Grundvoraussetzung.

Zahlen, Daten, Stickstoffflüsse

Um die Komplexität des Stickstoffkreislaufs in Deutschland auch quantitativ fassen zu können, wurden die relevantesten nationalen Stickstoffflüsse inventarisiert (Bach et al., 2020). Mit Hilfe der Ergebnisse lassen sich Fragen beantworten, welcher Verursacherbereich wieviel zur Stickstoffproblematik beiträgt oder welcher Umweltbereich in welchem Maße von unterschiedlichen Bereichen des gesellschaftlichen Handelns belastet wird. Diesbezügliche quantitative Aussagen sind Voraussetzung für eine effektive Maßnahmenplanung zur Verminderung von Problemen.

Grundlage zur Erfassung der Flüsse ist der Leitfaden zur Aufstellung von nationalen Stickstoff-Inventaren des Expert Panels on National Nitrogen Budgets der Genfer Luftreinhaltekonvention (Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (CLRTAP), 2013). Die Methode gibt vor, dass ein- und ausgehende Stickstoff-Flüsse für insgesamt acht Bereiche (Pools), die untereinander in Beziehung stehen, berechnet bzw. zusammengetragen werden (Abbildung 4).

Die genutzten Daten zu Stickstoff-Flüssen wurden entweder aus statistischen Berichten, Veröffentlichungen etc. direkt entnommen oder als Produkt aus der transportierten bzw. umgesetzten Stoffmenge und deren mittlerem Stickstoff-Gehalt (N-Gehalt) berechnet. Insgesamt wurden auf diese Weise für Deutschland rund 150 Stickstoff-Flüsse beschrieben. Zeitraum für die Datenerfassung waren die Jahre 2010–2014. Alle Ergebnisse wurden als Mittelwert dieser 5-Jahresperiode angegeben.

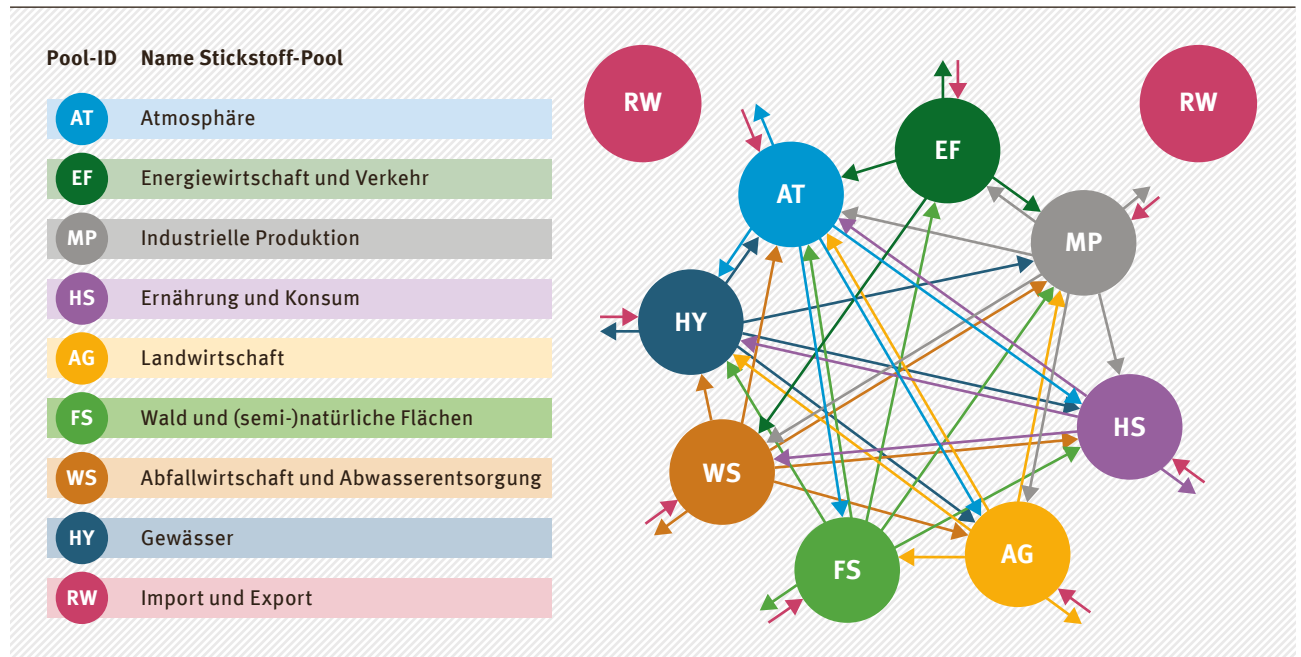
Zusammenfassend zeigt die Bilanz, dass in Deutschland jährlich 6.275 Kilotonnen (kt) reaktiver Stickstoff in den Kreislauf eingebracht werden (Abbildung 5 und Bach et al. (2020)). 43 % davon werden über die Ammoniak-Synthese eingebracht, die inländische Förderung und der Import von stickstoffhaltigen fossilen Energieträgern (Braunkohle, Steinkohle,

² https://ec.europa.eu/atwork/applying-eu-law/infringements-proceedings/infringement_decisions/index.cfm?lang_code=DE&typeOfSearch=true&active_only=1&noncom=0&r_dossier=&decision_date_from=&decision_date_to=&EM=DE&DG=ENVI&title=&submit=Suche

³ FFH-Lebensraumtypen 6510 und 6520

Abbildung 4

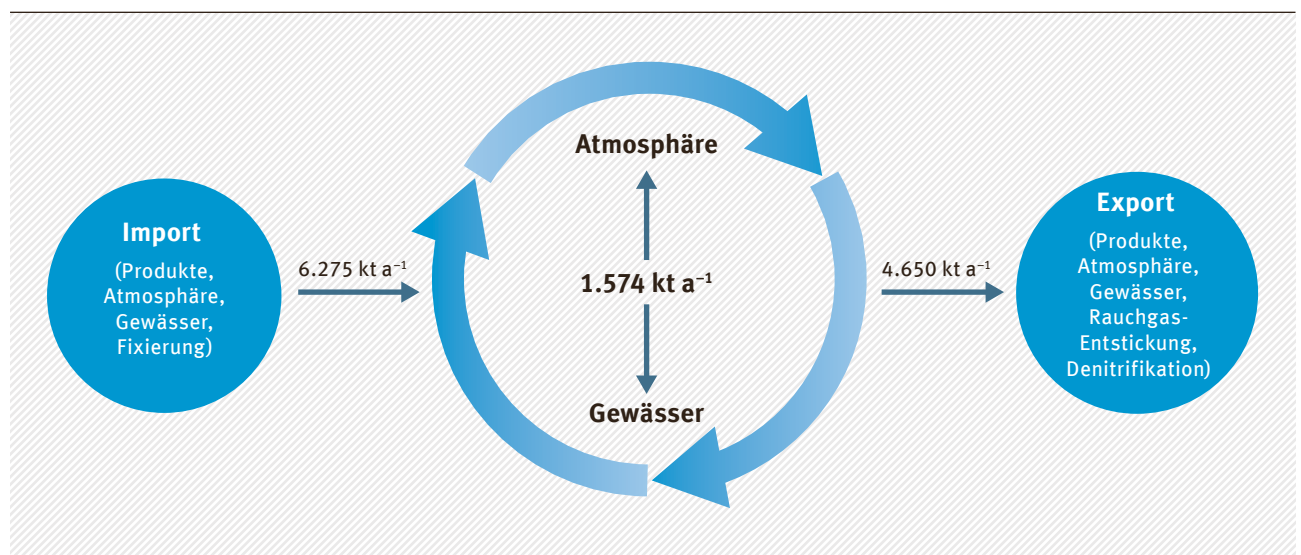
Übersicht der Stickstoff-Pools des nationalen Inventars der Stickstoff-Flüsse und ihre Querbeziehungen zueinander



Quelle: Umweltbundesamt

Abbildung 5

Quantifizierter Im- und Export in den deutschen Stickstoff-Kreislauf sowie Emissionen als Kreislauf-interne Flüsse als Mittelwerte für 2010–2014 (Bach et al., 2020)



Quelle: Umweltbundesamt

Rohöl) tragen 37 %, die natürliche Stickstoff-Fixierung 5 % und der Import von Nahrungs- und Futtermitteln 12 % dazu bei.

Dem gegenüber werden dem nationalen Stickstoff-kreislauf 4.650 kt pro Jahr entzogen (Abbildung 5 und Bach et al. (2020)). Die bedeutendste quantifizierbare

Entfernung von reaktivem Stickstoff aus dem Kreislauf durch Umwandlung von reaktivem Stickstoff in elementaren Stickstoff N₂ befindet sich in der Rauchgasentstickung im Zuge der Verbrennung von fossilen und regenerativen Energieträgern sowie bei der Verarbeitung von Rohöl zu Mineralölprodukten (60 %). Ein Viertel des elementaren Stickstoffs (N₂)

Tabelle 2

Absolute Mengen und Anteile der Verursachersektoren und Stickstoffverbindungen am Stickstoffkreislauf in Deutschland (Bach et al., 2020)*

Emissionsbereich	Atmosphäre			Oberflächen- gewässer	Summe	Anteil
	NO _x kt N a ⁻¹	NH ₃ kt N a ⁻¹	N ₂ O kt N a ⁻¹	NO ₃ ⁻ kt N a ⁻¹	kt N a ⁻¹	%
Landwirtschaft	36,0	558,0	65,4	381,9	1041	67 %
Verkehr	159,6	11,5	3,0	0,0	174	11 %
Industrie, Energiewirtschaft	184,2	16,6	11,7	29,9	242	16 %
Haushalte, Abwasserwirtschaft, Oberflächenablauf	0,1	2,9	2,1	84,4	90	6 %
Summe	380	589	82	496	1547	
Anteil	25 %	38 %	5 %	32 %		100 %

* Bei dieser Aggregation wird der grundwasserbürtige Eintrag in Oberflächengewässer vollständig der Landwirtschaft zugeschrieben, während weitere Einträge aus der Landwirtschaft über den Boden-Wasserpfad, die im Boden verbleiben oder abgebaut werden, vernachlässigt werden.

entsteht durch einen natürlichen mikrobiologischen Prozess in Gewässern und Böden, bei dem Nitrat in N₂ gewandelt wird (Denitrifikation). Der Prozess kommt in Kläranlagen auch gezielt zum Einsatz. Der Rest wird über die Atmosphäre und den Gewässerabfluss in Nachbarländer und in die Küstenmeere exportiert.

Zwischen dem Eintrag von reaktivem Stickstoff in den Kreislauf durch Förderung, Erzeugung und Import und dem Abbau bzw. dem Export von reaktivem Stickstoff aus dem Kreislauf ergibt sich eine Differenz von jährlich ca. 1.625 kt reaktivem Stickstoff. Diese Bilanz lässt zwei Schlussfolgerungen zu: Entweder handelt es sich um den jährlichen, nationalen Stickstoffüberschuss und die Menge an reaktivem Stickstoff in Deutschland wird jährlich um diesen Betrag vergrößert, oder die Differenz ist auf die Schwierigkeiten und Unsicherheiten in der Ermittlung der N-Flüsse zurückzuführen.

Bei den kreislaufinternen Stickstoffflüssen sind die Emissionen in die Atmosphäre und Einträge in Gewässer innerhalb des deutschen Stickstoffkreislaufs von besonderer Bedeutung, weil durch sie in den Umweltmedien negative Wirkungen hervorgerufen werden. Diese jährliche Gesamtemission von gasförmigen Stickstoffverbindungen oder Nitrat in die Umwelt in Deutschland beträgt 1.547 kt N a⁻¹ (Abbildung 5; Tabelle 2). Dieser Wert basiert auf Emissionsinventaren und ist daher als relativ

verlässlich einzustufen. 67 % der Emissionen reaktiven Stickstoffs werden durch die Landwirtschaft, 11 % aus dem Verkehrsbereich, 16 % aus Prozessen der Industrie- und Energiewirtschaft und 6 % aus Haushalten, Abwasserwirtschaft und Oberflächenablauf freigesetzt. Der Großteil davon entweicht als Ammoniak in die Luft, gefolgt vom Nitratreintrag in Oberflächengewässer, den NO_x-Emissionen und der Lachgas-Freisetzung in die Atmosphäre (Tabelle 2).

Mittlerweile liegen vier sektorübergreifende Inventarisierungen der Stickstoffemissionen seit 1995 vor. Diese Daten sind in Abbildung 6 zusammengestellt. In den dargestellten 20 Jahren sind die jährlichen Stickstoffemissionen von 2.572 kt pro Jahr auf 1.547 kt pro Jahr gesunken. Während der letzten 10 Jahre ist jedoch eine Stagnation der absoluten Stickstoffemissionen erkennbar. Vor allem der Anteil abwasserbedingter Einträge und die Emissionen des Verkehrs sind seit 1995 zurückgegangen, während der Anteil der Industrie- und Energiewirtschaft und vor allem der Landwirtschaft zunahm.

Der Bereich „Landwirtschaft“ nimmt daher auch eine zentrale Stellung im aktuellen Stickstoff-Inventar ein, denn mit den Stickstoff-Flüssen in und aus dem Sektor Landwirtschaft wird die größte Menge an reaktivem Stickstoff in die Umwelt eingebracht (Abbildung 7). Die Daten entstammen weitgehend den Statistiken des Bundesministeriums für Ernährung

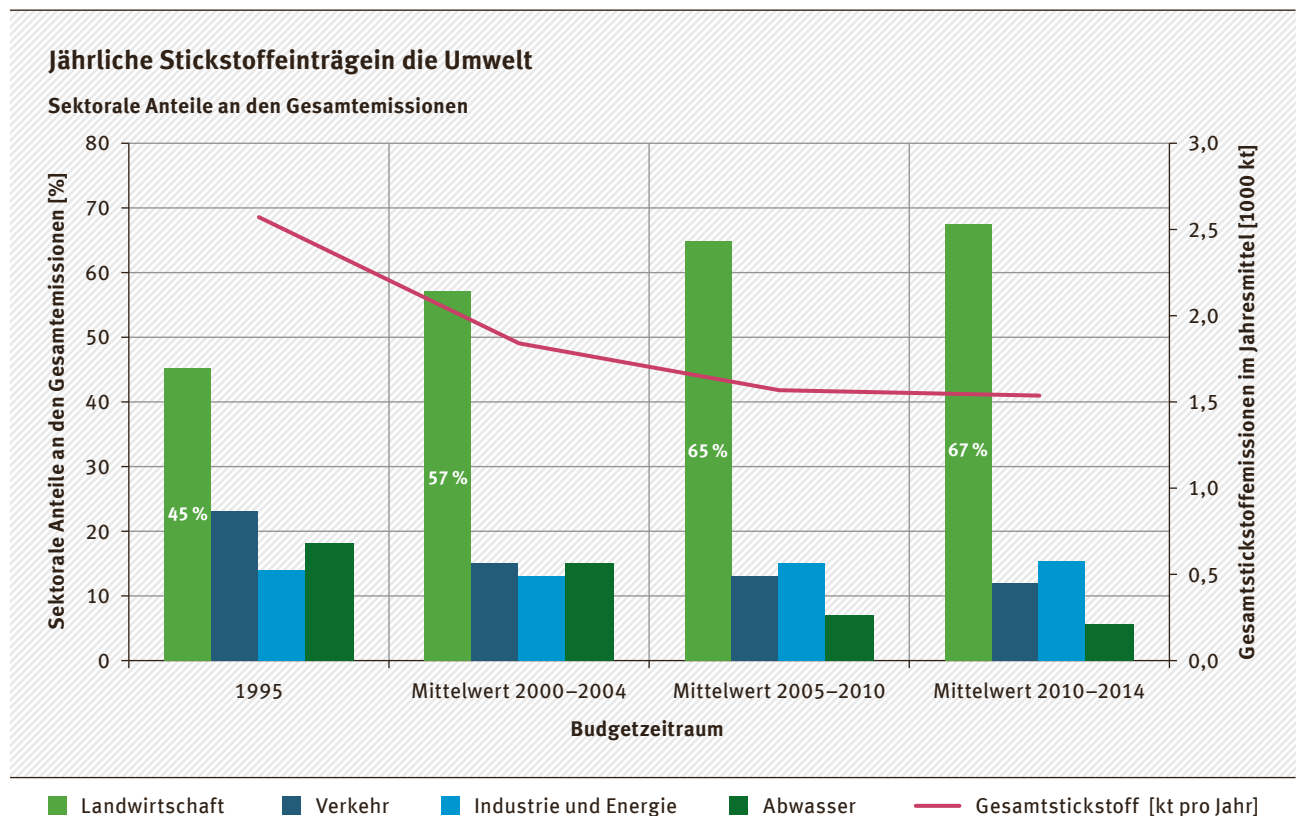
und Landwirtschaft (BMEL). Insgesamt gelangen 3.320 kt Stickstoff pro Jahr vor allem mit industriellem Futtermittel, Saatgut, Mineral- und Wirtschaftsdüngern oder durch biologische Fixierung in die Landwirtschaft. Innerhalb des landwirtschaftlichen Systems fließt Stickstoff in landwirtschaftlichen Produkten, wie Substrat, pflanzlichen Futtermitteln und Wirtschaftsdünger im Kreislauf zwischen den Bereichen Bodenproduktion, Tierproduktion und Biogaserzeugung. Insgesamt ist ein hoher innerlandwirtschaftlicher Stickstoffumsatz zu verzeichnen. Bei der Bilanzierung wird anschließend die berechnete Annahme zu Grunde gelegt, dass die Menge an Stickstoff, die der Landwirtschaft auf verschiedenen Wegen zugeführt wird, sie auch wieder verlassen muss, entweder enthalten in landwirtschaftlichen Produkten oder als Emissionen. Stickstoffmengen in Marktprodukten und Stickstoff in atmosphärischen Emissionen können einigermaßen verlässlich beziffert werden. Die Stickstoff-Austräge in das Gewässer werden anschließend als Differenz zwischen den

in Landwirtschaft eingehenden Stickstoffflüssen insgesamt und den übrigen kalkulierten ausgehenden Stickstoffflüssen berechnet. Die Umwandlung von reaktivem Stickstoff zu elementarem Luftstickstoff (N_2) im Sicker- bzw. Grundwasser wird dem Pool „Gewässer“ zugeordnet und ist daher in Abbildung 7 nicht enthalten.

Wie am Beispiel „Landwirtschaft“ dargestellt, illustrieren die einzelnen Stickstoffpools Pfadabhängigkeiten und Sektorzuständigkeiten für Emissionen und helfen so ein komplexes System sichtbar zu machen. Weitere Pools enthält die Studie „Reaktive Stickstoffflüsse in Deutschland 2010–2014 (DESTINO Bericht 2)“ von Bach et al. (2020). Mit der Zusammenschau über alle Pools lässt sich das System als komplexer Kreislauf mit vielen Querbeziehungen begreifen (siehe Abbildung 4).

Abbildung 6

Zeitliche Entwicklung der Anteile der verschiedenen Verursacherebereiche an den Gesamtstickstoffemissionen*

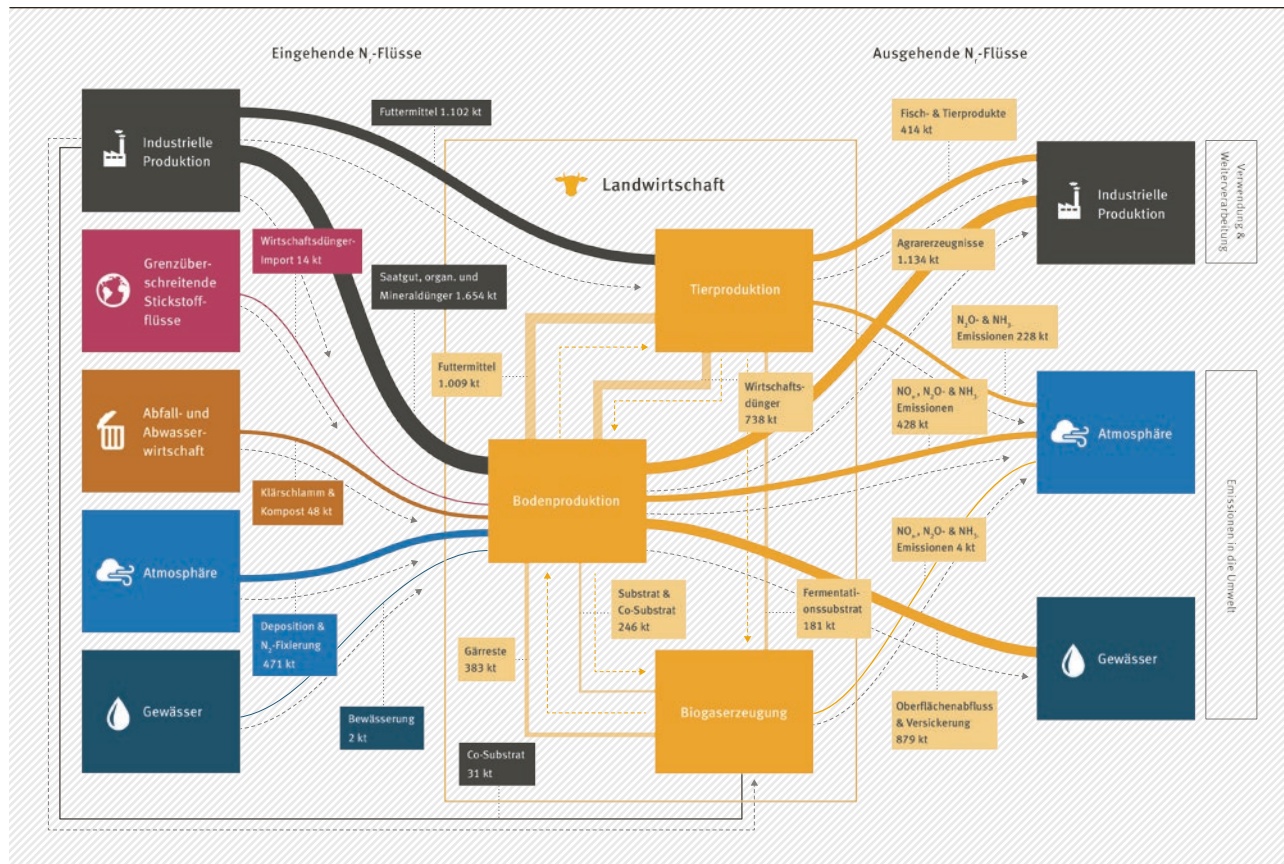


* Zur besseren Vergleichbarkeit der Studien wurden die Ergebnisse zum Eintrag aus der Landwirtschaft in Oberflächengewässer des Budgetierungszeitraumes 1995 mit Hilfe von Umweltbundesamt (2019) angepasst.

Quelle: Alfred Töpfer Akademie für Naturschutz (NNA) (1997); Umweltbundesamt (2009); Umweltbundesamt (2015); Umweltbundesamt (2019); und Bach et al. (2020)

Abbildung 7

Bereich „Landwirtschaft“ des nationalen Stickstoffinventars: Ein- und ausgehende N-Flüsse in kt N a⁻¹ im Mittel der Jahre 2010–2014 (Bach et al., 2020)



Quelle: Daten aus Bach et al. (2020); grafische Umsetzung Bosch & Partner sowie kopfarbyte, Projekt Thematischer Umweltatlas
<https://www.umweltbundesamt.de/umweltatlas/reaktiver-stickstoff/einfuehrung/gestatten-reaktiver-stickstoff/welche-rolle-spielt-die-landwirtschaft-in-der>

4. Ein integrierter Ansatz für Deutschland

Warum ein integrierter Ansatz effektiver ist als sektorale Betrachtungen

Aufgrund der Komplexität des Stickstoffproblems ist es sinnvoll, alle Verursacherbereiche und betroffenen Umweltmedien zusammen zu betrachten. Unabhängige Bewertungen einzelner stickstoffbezogener Umweltprobleme, wie die Beeinträchtigung von Gewässer- oder Luftqualität, bergen das Risiko in sich, wichtige Wechselwirkungen zu übersehen. Für die Politik lohnt sich ein integrierter Ansatz zur Lösung des Stickstoffproblems, weil ein ressortübergreifendes, einheitliches Politikverständnis Voraussetzung für gemeinsames Handeln ist. Das Problem als Ganzes zu erkennen, zu begreifen und zu vermitteln, kann die Bereitschaft zur Änderung von Lebensstilen erhöhen und so gesellschaftliche Transformationsprozesse in den Bereichen Ernährung, Mobilität und Energienutzung unterstützen. Denn Veränderungen in diesen Bereichen können zur Reduzierung der Stickstoffüberschüsse in der Umwelt beitragen. Auch innerhalb eines Einzelsektors unterstützt ein integrierter Ansatz effektive Lösungswege, da sich mit einer übergreifenden Betrachtung synergetische Wirkungen von Maßnahmen erkennen lassen. So ist es beispielsweise bei stickstoffmindernden Maßnahmen in der Landwirtschaft sinnvoll, gleichermaßen Potentiale für Luftreinhaltung, Klimaschutz und Gewässerschutz zu bewerten, um effiziente Maßnahmenkombinationen erkennen zu können.

Integrierte Bewertungen des Stickstoffproblems wurden in Deutschland erstmals in den 90er Jahren, im Rahmen des Stickstoffminderungsprogramms einer gemeinsamen Arbeitsgruppe der Agrarminister- und Umweltministerkonferenz (Alfred Töpfer Akademie für Naturschutz (NNA), 1997) durchgeführt. Seit Herausgabe des Sondergutachtens „Stickstoff: Lösungsstrategien für ein drängendes Umweltproblem“ (SRU, 2015) durch den Sachverständigenrat für Umweltfragen arbeitet das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit an der Entwicklung eines nationalen Aktionsprogramms zur Stickstoffminderung. Unter Federführung des BMU wurde 2017 der erste Stickstoffbericht der Bundesregierung veröffentlicht (BMUB, 2017). Dort werden die Vorteile einer sektorübergreifenden Behandlung

der Stickstoffproblematik für die Bundesregierung benannt. Sinngemäß heißt es im Stickstoffbericht der Bundesregierung:

„Eine integrierte Stickstoffstrategie ist deshalb lohnend, weil die Gesamtmenge an reaktivem Stickstoff im System gemindert werden muss, um ökologisch wie ökonomisch angemessene und ausbalancierte Lösungsansätze und Reduktionsanforderungen zu schaffen. Durch ressortübergreifende Zusammenführung der Aktivitäten lassen sich Doppelarbeit vermeiden und Synergieeffekte nutzen. Ein Gesamtüberblick über die diversen Maßnahmen, die in den verschiedenen Ressorts unabhängig voneinander zum Einsatz kommen können, ist notwendig, um Synergien möglichst effektiv zu nutzen und Minderungsdefizite zu bilanzieren. Nur mit einer integrierten Vorgehensweise lassen sich ökonomische Kosten-Nutzen-Abschätzungen über alle betroffenen Gesellschafts- und Wirtschaftsbe-
reiche aufstellen. Darüber hinaus lässt sich nur mit integrierten Lösungsansätzen effektiv vermeiden, dass Problembereiche von einem Sektor in einen anderen oder von einem Umweltmedium in ein anderes verschoben werden („pollution swapping“). Da Stickstoffemissionen nicht an Landesgrenzen halt machen und die anthropogene Beeinflussung der Stickstoffströme europa- und weltweit ein gravierendes Problem darstellen, sind einzelsektorale oder nationale Lösungsansätze nicht ausreichend. Eine übergreifende nationale Strategie sollte daher eingebettet sein in europäische und internationale Aktivitäten. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Kohärenz und Konsistenz, Effektivität und Effizienz die Erfolgskriterien einer gelungenen politischen Herangehensweise sein müssen, und dass sich dies am besten mit einer übergreifenden, integrierten Zusammenarbeit erreichen lässt. Nicht zuletzt lassen sich auch der Öffentlichkeit die unterschiedlichen Facetten und Zusammenhänge der Stickstoffproblematik besser in einem Gesamtüberblick vermitteln. Ein breites Problembewusstsein ist erforderlich, um tragfähige Veränderungsprozesse in den Bereichen Landwirtschaft, Mobilität, Energie und Konsum einzuleiten und zu stützen.“

Das integrierte Stickstoffziel zum Erreichen rechtlicher Anforderungen

Um den Umfang zur erforderlichen Reduktion von Stickstoff sichtbar zu machen, ließ das Umweltbundesamt im Rahmen eines Forschungsprojektes ein wirkungsorientiertes, integriertes Stickstoffziel für Deutschland ableiten. Das integrierte Handlungsziel markiert die maximale Menge Stickstoff, die in Deutschland pro Jahr freigesetzt werden darf, um die gegenwärtig gesetzten Umwelt- und Gesundheitsziele zu erreichen. Es setzt also einen quantitativen Rahmen für einen verträglichen Umgang mit Stickstoffverbindungen in den unterschiedlichen Wirtschaftsbereichen, ohne einen einzelnen Bereich hervorzuheben. Das integrierte Ziel ermöglicht die zusammenfassende Bilanzierung der Erfolge oder Misserfolge gesellschaftlichen Handelns zur Stickstoffminderung. Gleichzeitig erleichtert es die Kommunikation der Problemsituation in Richtung Politik und Öffentlichkeit und stärkt so das öffentliche Bewusstsein und die Sensibilität für politische Maßnahmen (Heldstab et al., 2020; Geupel et al., 2021). Das nationale, integrierte Stickstoffziel erfüllt damit eine ähnliche kommunikative Funktion wie die Planetaren Belastbarkeitsgrenzen auf globaler Ebene (Rockström et al., 2009; Steffen et al., 2015) oder das 1,5 °C-Ziel zum Schutz des Klimas der Weltgemeinschaft für den globalen Klimaschutz (UNFCCC, 2015). Das Umweltbundesamt schlägt vor, dass integrierte Ziel in das Stickstoff-Aktionsprogramm aufzunehmen.

Wie nachfolgend näher erläutert, baut dieses Ziel auf bestimmten politischen Handlungs- und Zwischenzielen bis zum Jahr 2030 auf. Das Erreichen des gesetzten Stickstoffziels garantiert daher noch keinen nachhaltigen Umweltzustand, sondern ist als Zwischenziel zu verstehen. Beispielsweise wird die Belastungssituation für Landökosysteme durch die bis 2030 festgelegte Minderung der zu hohen Emissionen verbessert werden, aber die Ökosysteme

werden dann noch nicht flächendeckend vor zu hohen Einträgen von Stickstoff aus der Atmosphäre geschützt sein. Um Mensch und Umwelt besser zu schützen, sollte die Stickstofffreisetzung dennoch in einem ersten Schritt auf jährlich 1.000 kt N a⁻¹ (oder 1 Mio. t) für Deutschland begrenzt werden. Gegenüber der derzeitigen Freisetzung müsste die jährliche Gesamtfreisetzung an reaktivem Stickstoff um rund ein Drittel reduziert werden. Bei 83 Millionen Einwohnern bedeutet das eine Begrenzung der Stickstofffreisetzung auf etwa 12 kg N pro Jahr pro Person.

Methode zur Berechnung des integrierten Stickstoffziels

Bei der Herleitung des Ziels wurden Wirkungen in verschiedenen Umweltmedien und Minderungsanforderungen in unterschiedlichen Emissions- und Wirtschaftssektoren zu einem gemeinsamen Wert integriert. Konkret bezieht es Wirkungsindikatoren für sechs Umweltbereiche ein, für welche jeweils die maximale Menge an Stickstoffeinträgen pro Jahr berechnet wurde, um entsprechende Qualitätsziele im räumlichen Durchschnitt für Deutschland zu erreichen (Tabelle 3). Die zu Grunde gelegten Qualitätsziele der jeweiligen Wirkungsindikatoren wurden aus der bestehenden Gesetzeslage übernommen. Dabei handelt es sich um Konzentrations- oder Emissionsgrenzwerte bzw. maximale Eintragsfrachten, mit denen Luft, Wasser und Lebewesen vor übermäßiger Stickstoffbelastung geschützt werden sollen. Durch die Betrachtung der sechs Umweltbereiche wurden maximale Freisetzungsraten für Ammoniak (NH₃), Nitrat (NO₃-), Stickstoffoxid (NO_x), Lachgas (N₂O) und Gesamtstickstoff (N) unter der Annahme berechnet, dass die Konzentrations- oder Qualitätsziele in Deutschland im Durchschnitt erreicht werden (s. Tabelle 3). Das integrierte Stickstoffziel ist die Summe der jeweils niedrigsten maximal zulässigen Stickstofffreisetzungsraten pro Stickstoffverbindung, ausgedrückt als Gesamtstickstoff.

Tabelle 3

Berücksichtige Umweltbereiche, Qualitätsziele und resultierende N-Freisetzungsraten bzw. integriertes Stickstoffziel (kt N pro Jahr) (Tabellen 12 und 17 in Heldstab et al. (2020)*, angepasst auf aktuelle Referenzsituation)

Nr.	Umweltbereich	Qualitätsziel	Stickstoff-Verbindung	Integriertes Stickstoffziel und skalierte max. Freisetzungsraten je Umweltbereich; in Klammern: Ist-Situation Freisetzungen im Basisjahr 2015
1.	Terrestrische Ökosysteme – Eutrophierung (Deposition)	Reduzierung der Überschreitung der kritischen Belastungsgrenzen für Eutrophierung um 35 % von 2005 bis 2030 (European Commission, 2013; European Union, 2016)	NH ₃ - und NO _x -Emissionen	359 (563) NH₃-N 155 (375) NO_x-N
2.	Oberflächen-gewässer zur Verhinderung der Eutro-phierung von Küstengewäs- sern	Gesamt-Stickstoff-Konzentration zum Schutz der Nordsee, (2,8 mg N l ⁻¹) und der Ostsee (2,6 mg N l ⁻¹) (Bundesregierung, 2016)	Gesamt-N-Fracht	300 (356) N_{total}
3.	Grundwasser-qualität betroffen durch Nitrat	NO ₃ --Konzentration im Grundwas- ser: 50 mg l ⁻¹ (European Council, 1991)	NO ₃ -Leaching	121 (148) NO₃-N
4.	Klima betroffen durch Lachgas- Emissionen	N ₂ O-Emissionen: langfristiges Ziel Reduktion, 80–95 % (BMU – Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2016)	N ₂ O-Emissi- onen	65 (83) N₂O-N
5.	Vegetation beeinflusst durch NH₃-Konzent- ration	NH ₃ --Critical Level für höhere Pflanzen: 3 µg m ⁻³ NH ₃ (Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (CLRTAP), 2017)	NH ₃ -Emissionen	416 (625) NH₃-N
6.	Menschliche Gesundheit betroffen durch Stickstoffdioxid	NO ₂ -Konzentration: WHO-Wirkungs- schwelle für den Hintergrund: 20 µg m ⁻³ (World Health Organization, 2013)	NO _x -Emissionen	223 (361) NO_x-N
Integriertes Stickstoffziel (Σ1.–4.)				1.000 (1.525) kt N a⁻¹

* nur die hellblau hinterlegten Umweltbereiche 1–4 fließen in das integrierte Stickstoffziel ein; alle Werte wurden hinsichtlich des aktualisierten Referenzszenarios, welches im Gegensatz zum Szenario im Forschungsbericht bereits beschlossene Maßnahmen wie Klimaschutzgesetz (2019) oder Düngeverordnung (2020) berücksichtigt, angepasst.

Für den Umweltbereich „Eutrophierung von terrestrischen Ökosystemen“ (1) wurden die Zielstellungen des nationalen Luftreinhalteprogramms übernommen. In diesem Programm zur Umsetzung der neuen EU-Richtlinie über die Reduktion der nationalen Emissionen bestimmter Luftschadstoffe (NEC-Richtlinie)⁴ in Deutschland, werden u. a. Ammoniak- und Stickstoffoxidreduktionsverpflichtungen vorgegeben. Mittels Modellrechnungen wurde geschätzt, dass die mit der NEC-Richtlinie vereinbarten Emissionsminderungen die Fläche derjenigen Ökosysteme, die von zu hoher Stickstoffdeposition betroffen sind, im Jahr 2030 gegenüber dem Jahr 2005 um 35 % verringern wird.

Für den Umweltbereich „Oberflächengewässer und Küstenökosysteme betroffen durch Eutrophierung“ (2) wurden die Zielstellungen der Oberflächengewässerverordnung (Bundesregierung, 2016) zu Grunde gelegt. Am Übergabepunkt zwischen limnischen und marinen Systemen soll die Stickstoffkonzentration zum Schutz der Nordsee vor Eutrophierung $2,8 \text{ mg l}^{-1}$ und zum Schutz der Ostsee vor Eutrophierung $2,6 \text{ mg l}^{-1}$ betragen. Die Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) hat Daten der Flussgebietsgemeinschaften ausgewertet und Zielfrachten bzw. den erforderlichen Minderungsbedarf zur Einhaltung der Konzentrationsgrenzwerte berechnet. Diese Ergebnisse wurden in das Stickstoffziel übernommen.

Für den Umweltbereich „Grundwasserqualität betroffen durch Nitrat“ (3) wurden die mittleren Nitratkonzentrationen im Sickerwasser der Grundwassermessstellen der Länder herangezogen. Gearbeitet wurde mit dem Durchschnitt der Jahre 2010–2017 gearbeitet. Für diejenigen Landwirtschaftsflächen, an denen eine Messtelle eine Überschreitung des Grenzwerts der Nitratrichtlinie⁵ von 50 mg l^{-1} anzeigte, wurde berechnet, um wieviel der Flächenbilanzüberschuss der Landwirtschaft reduziert werden muss, um die Zielkonzentration einhalten zu können. Dabei wurde unter Vorsorgegesichtspunkten die Sickerwasserkonzentration der Grundwasserkonzentration gleich-

gesetzt und vereinfacht davon ausgegangen, dass die Grundwasserkonzentration von Nitrat nur durch landwirtschaftliche Aktivitäten beeinflusst wird.

Beim Umweltbereich „Klima“ (4) wurde eine zulässige Lachgas-Freisetzung berechnet, die sich an den Langfristzielen für Treibhausgasemissionen des Klimaschutzplans 2050 der Bundesregierung (BMUB 2016) orientiert. Dazu wurden erforderliche Treibhausgasminderungsraten (in % CO_2 -Äquivalente) vereinfacht auf erforderliche N_2O -Minderungen übertragen. Aus Vorsorgegesichtspunkten wird der berechnete Wert für 2050 in die Zielstellung übernommen. Eine Skalierung auf 2030 würde sich auf Grund der geringen absoluten Größe nicht auf das Endergebnis auswirken.

Für den Umweltbereich „Vegetation betroffen durch Ammoniak in der Außenluft“ (5) wurde die kritische Grenzkonzentration für Ammoniak ($3 \mu\text{g m}^{-3}$), welche die UNECE Luftreinhaltekonvention im Göteborg-Protokoll⁶ zum Schutz höherer Pflanzen empfiehlt, zu Grunde gelegt. Durch Korrelation von Zeitreihen von Konzentrations- und Emissionswerten über Deutschland und auf Basis der Annahme, dass Ammoniak nach seiner Freisetzung vor allem in kurzer Distanz seine Wirkung auf die Vegetation ausübt, ließ sich eine maximal zulässige Ammoniakemission berechnen, um die vorgegeben Grenzkonzentration im Mittel einzuhalten.

Für den Umweltbereich „Menschliche Gesundheit betroffen durch Stickstoffdioxid in der Luft“ (6) wurde der von der Weltgesundheitsorganisation (WHO) vorgeschlagene Hintergrundkonzentrationswert für Stickstoffdioxid von $20 \mu\text{g m}^{-3}$ im Jahresmittel als Maßstab herangezogen. Der gesetzlich festgelegte Wert von $40 \mu\text{g m}^{-3}$ lässt sich für die Herleitung einer integrierten Zielstellung nicht nutzen, da Konzentrationen in dieser Größenordnung nur kleinräumig an stark befahrenen Straßen auftreten und sich diese Überschreitungen deutschlandweit derzeit nicht hinreichend genau modellieren lassen. Unter der Annahme, dass sich die NO_2 -Konzentrationen der Hintergrund-Messstationen proportional zur Summe

4 RICHTLINIE (EU) 2016/2284 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 14. Dezember 2016 über die Reduktion der nationalen Emissionen bestimmter Luftschadstoffe, zur Änderung der Richtlinie 2003/35/EG und zur Aufhebung der Richtlinie 2001/81/EG

5 RICHTLINIE (91/676/EWG) DES RATES vom 12. Dezember 1991 zum Schutz der Gewässer vor Verunreinigungen durch Nitrat aus landwirtschaftlichen Quellen

6 Protocol to the 1979 Convention on Long-range Transboundary Air Pollution to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone (http://www.unece.org/env/lrtap/status/lrtap_s.html)

der nationalen NO_x -Emissionen verhält⁷, wurde eine national zulässige maximale Emission berechnet, um die Zielstellung einhalten zu können.

Die Stickstoffverbindungen Ammoniak und Stickstoffoxid treten beide je zweimal in unterschiedlichen Wirkungsindikatoren auf. Um eine Doppelzählung zu vermeiden, wurde jeweils nur die empfindlichere maximale Freisetzungsrate von beiden Wirkungsindikatoren in das integrierte Stickstoffziel einbezogen. Daher wurde der Ammoniak-Wert des Qualitätsziels (5), der weniger sensitiv ist als der für den Umweltbereich „Eutrophierung von terrestrischen Ökosystemen“ (1), für das Gesamtziel nicht berücksichtigt. Ebenso wurde der Stickstoffoxid-Wert zum Qualitätsziel (6) für die menschliche Gesundheit für das Gesamtziel nicht berücksichtigt, weil die Zielstellung für Stickstoffoxid im Umweltbereich „Eutrophierung von terrestrischen Ökosystemen“ (1), die aus dem Nationalen Luftreinhalteprogramm resultiert, strenger ist. In Tabelle 3 sind die vier in das Stickstoffziel einbezogenen Wirkungsindikatoren grau hinterlegt.

Das Ziel wurde unter Berücksichtigung der aktuellen politischen Rahmenbedingungen bis zum Jahr 2030 in Deutschland abgeleitet. Der Wert von jährlich 1.000 kt spiegelt daher die nach den geltenden Rechtsvorschriften erforderliche Reduzierung bis 2030 wieder. Das vorgeschlagene integrierte Stickstoffziel ist als politisches Handlungsziel zu verstehen und nicht als umfassendes Umweltqualitätsziel zu interpretieren.

Einordnung des integrierten Stickstoffziels

Die oben beschriebene Methode und der resultierende Zielwert enthalten Unsicherheiten. Die Auswahl der Indikatoren, Datengrundlagen, Qualitätsziele und Festlegung der Methodik hat das rechnerische Resultat von einer Freisetzung von 1.000 kt Stickstoff pro Jahr beeinflusst. Dennoch gibt der Wert eine belastbare Größenordnung vor, auf die gesellschaftliches Handeln und politische Maßnahmenplanung in einem ersten Schritt zielen muss. Die Größenordnung des Stickstoffziels stimmt gut überein mit anderen nationalen Zielstellungen, wie die der NEC-Richtli-

nie⁴. Außerdem passt die resultierende pro-Kopf-Rate von etwa 12 kg Stickstoff pro Jahr⁸ gut überein mit der historischen global-durchschnittlichen pro-Kopf-Freisetzung zu Beginn des industriellen Zeitalters (Galloway et al., 2014).

Durch die Integration von Qualitätszielen für Ammoniak, Stickstoffoxid, Nitrat und Lachgas wurde ein einheitlicher Wert für Gesamtstickstoff (N) abgeleitet. Das integrierte Ziel beinhaltet keine regionale oder lokale Auflösung, sondern gilt für die nationale Ebene. Demgegenüber weisen stickstoffbezogene Umweltwirkungen lokale bzw. regionale Muster und Besonderheiten auf bzw. werden durch spezifische Stickstoffverbindungen hervorgerufen. Mit dem nationalen Wert alleine lässt sich daher nicht steuern, dass Maßnahmen dort getroffen werden, wo Grenzwertüberschreitungen nach wie vor ein Problem sind. Das integrierte Ziel setzt aber einen neuen nationalen Rahmen für den übergreifenden Handlungsbedarf. Dieser Rahmen muss von bestehenden räumlich aufgelösten Indikatoren und einer räumlich expliziten Maßnahmenplanung unterstützt werden. Bestehende Indikatoren auf Basis von räumlich detaillierten Überwachungsnetzen oder detaillierten Modellierungsansätzen (<https://www.umweltbundesamt.de/daten>) sollen daher nicht ersetzt werden, sondern müssen Teil des Aktionsprogramms zur Stickstoffminderung sein. Auch sollten die Teilziele für Ammoniak, Stickstoffoxid, Nitrat und Lachgas zusätzlich stets unabhängig voneinander überprüft werden, um eine Zielverfehlung in einem Umweltbereich nicht durch eine Übererfüllung in einem anderen Bereich zu kompensieren.

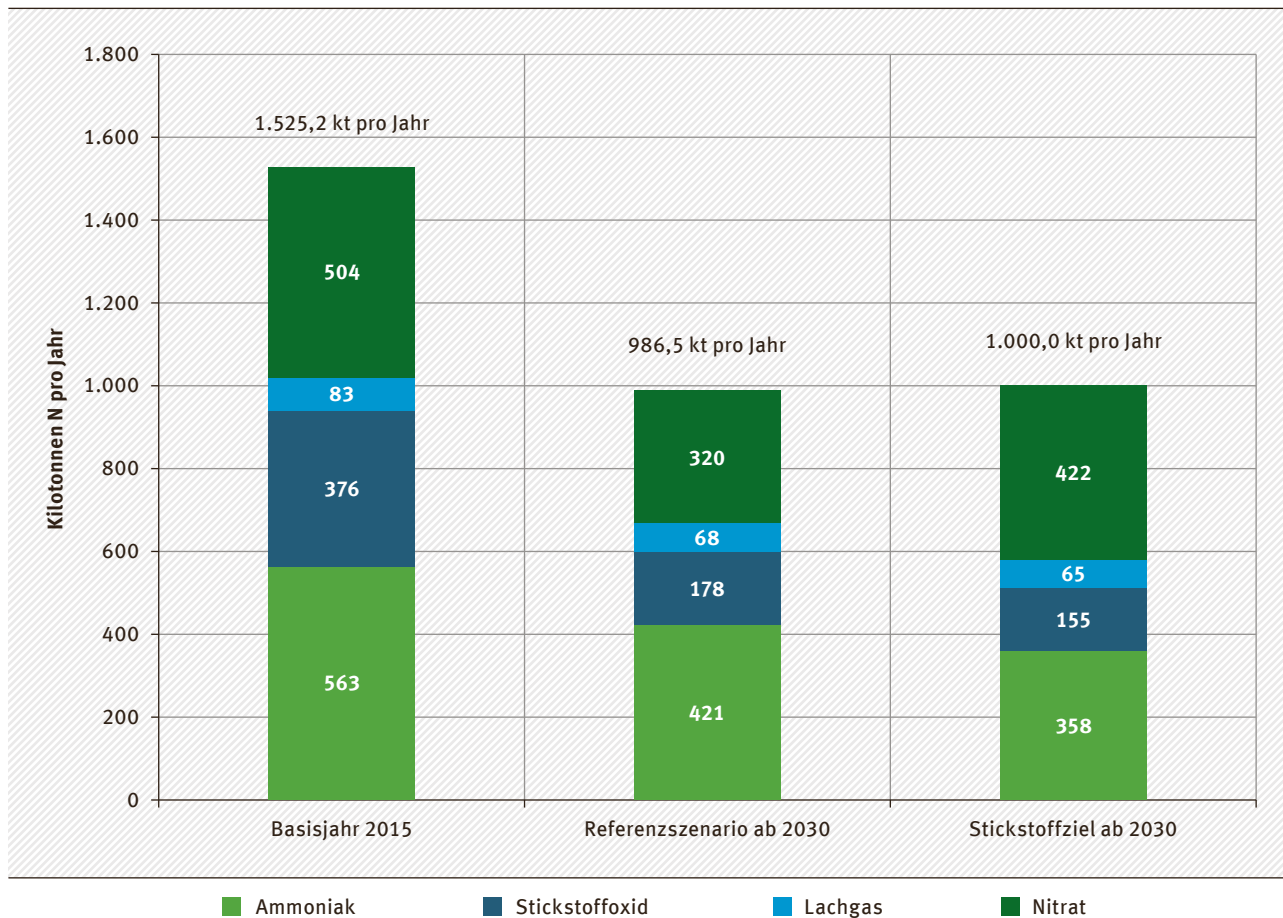
Das integrierte Stickstoffziel illustriert den dringenden Handlungsbedarf bei der Stickstoffminderung und unterstützt die öffentliche Bewusstseinsbildung für das Stickstoffproblem. Gleichzeitig hilft es, den Erfolg gesellschaftlicher Anstrengungen zu überprüfen und sichtbar zu machen. Das integrierte Ziel einer maximalen Freisetzung von 1.000 kt Stickstoff pro Jahr ($1 \text{ Mio. t N a}^{-1}$) kann daher künftig den Rahmen für die weitere Maßnahmenplanung innerhalb des Aktionsprogramms zur Stickstoffminderung setzen.

⁷ Bei der Berechnung wurde die Annahme getroffen, dass nur 98 % der Hintergrundmessstationen ausschließlich durch großräumige, nationale Emissionen beeinflusst werden während 2 % der Stationen (diejenigen mit den höchsten Messwerten) zusätzlich durch lokale Einflüsse geprägt sind.

⁸ $1000 \text{ kt} / 83 \text{ Mio. Einwohner} = 12 \text{ kg} / \text{Einwohner}$

Abbildung 8

Stickstoffflüsse im Basisjahr 2015 und im Referenzszenario in 2030 im Vergleich zu den Zielwerten in 2030 (siehe auch Tabelle 3)*



* Der Wert von 1.525 kt weicht von den im Kapitel 3 dargestellten 1.574 kt ab, weil unterschiedliche Zeiten zu Grunde liegen (Mittelwert 2010–2014 vs. Jahreswert 2015) und weil für die Quantifizierung der Basissituation im Kapitel 3 die Methode nach Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (2013) und im Kapitel 4 nur nationale, rechtliche Anforderungen zu Grunde gelegt wurden.

Quelle: Umweltbundesamt

Erwartete Emissionsentwicklung und Ziellücken im Jahr 2030

In der Luftreinhaltung, im Klimaschutz und in der Landwirtschaft sind bereits politische Maßnahmenpakete auf den Weg gebracht, die bis zum Jahr 2030 eine Minderung der Stickstoffeinträge in die Umwelt erwarten lassen. Um die damit verbundene, zu erwartende Entwicklung sichtbar zu machen, wurde aufbauend auf dem Bericht „Maßnahmenvorschläge für ein Aktionsprogramm zur integrierten Stickstoffminderung“ (Oehlmann et al., 2021) für das Jahr 2030 ein aktualisiertes Referenzszenario aufgestellt. Dafür wurden zu erwartende Emissionsminderungen für Luftschadstoffe (NO_x und NH_3) und Treibhausgase (hier N_2O betreffend) sowie für Nitratfrachten (NO_3^-) bis zum Jahr 2030 prognostiziert. Grundlage dafür sind die aktualisierten Luftschadstoff-Projektionen zum Nationalen Luftreinhaltungsprogramm zur NEC-

Richtlinie⁹, die Lachgas-Projektionen unter Berücksichtigung des Klimaschutzprogramms 2030 (Stand 29. Januar 2020) (Harthan et al., 2020) sowie aktuelle Annahmen zur Abschätzung der Wirksamkeit der im Jahr 2020 aktualisierten Düngeverordnung (Bundesregierung, 2020) im Hinblick auf die Entwicklung landwirtschaftlicher Nitratausträge (Haß et al., 2020). Die Abbildung 8 zeigt, dass dem Zielwert von 1.000 kt N a^{-1} Stickstoffflüsse in Höhe von 1.525 kt N a^{-1} im Basisjahr 2015 gegenüberstehen¹⁰ und, dass durch aktuelle politische Maßnahmenpakete bis zum Jahr 2030 mit einer Erfüllung des übergreifenden Handlungsziels zu rechnen ist.

⁹ https://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/nec_revised/projected/envgydydq/

¹⁰ Der Wert von 1.525 kt weicht von den im Kapitel 3 dargestellten 1.574 kt ab, weil unterschiedliche Zeiten zu Grunde liegen (Mittelwert 2010–2014 vs. Jahreswert 2015) und weil für die Quantifizierung der Basissituation im Kapitel 3 die Methode nach Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (2013) und im Kapitel 4 nur nationale, rechtliche Anforderungen zu Grunde gelegt wurden.

Unabhängig vom übergreifenden Ziel müssen aber auch die Teilziele erreicht werden (s. o.). Insbesondere die novellierte Düngeverordnung und die damit in Verbindung stehenden Annahmen zur möglichen Entwicklung bei den nationalen Nitratausträgen lassen erwarten, dass zur Erreichung des hier vorgeschlagenen aggregierten Teilziels zu Nitrat keine weiteren Maßnahmen erforderlich sind. Für Lachgas, Stickstoffoxide und Ammoniak sollten nach den gegenwärtigen Schätzungen im Rahmen des Aktionsprogramms zur Stickstoffminderung dringend weitere Maßnahmen umgesetzt werden, um auch die diesbezüglichen Teilziele erreichen zu können.

Die hier aufgezeichneten Referenzentwicklungen lassen jeweils ausschließlich eine geschätzte Aussage für die nationale Ebene zu. Für Nitrat zeigt sie zwar an, dass man sich auf dem richtigem Weg befindet, die wichtige Frage, inwiefern mit der novellierten Düngeverordnung Nitratkonzentrationszielwerte aber auch an einzelnen Messstellen erreichbar sind, lässt sich hier jedoch nicht prognostizieren.

Neben der konsequenten Umsetzung der oben genannten beschlossenen Maßnahmenpakete ist daher vor allem die regelmäßige Überprüfung der tatsächlichen Emissionsentwicklung und Erfolge auch auf regionaler und lokaler Ebene im Vergleich zu Qualitätszielwerten unabdingbar.

Maßnahmenbewertung für ein Aktionsprogramm Stickstoffminderung

Um die Entwicklung des Aktionsprogramms zur Stickstoffminderung vorzubereiten und die Auswahl von Maßnahmen zu begründen, hat das UBA im Rahmen eines weiteren Forschungsprojekts ein umfangreiches, umfassendes sektorübergreifendes Maßnahmeninventar erstellen lassen (Oehlmann et al., 2021). Für das Inventar wurden bestehende Maßnahmenkataloge sowie weitere nationale und vor allem auch internationale Literaturquellen ausgewertet.

Alle im Inventar enthaltenen Maßnahmen wurden einheitlich nach den Kriterien Effektivität, Effizienz, technische Umsetzbarkeit und potentielle Zielkonflikte mit anderen Umweltbereichen bewertet. Zudem wurde eine rechtliche Beurteilung der Maßnahmenoptionen durchgeführt und die Umsetzbarkeit beurteilt. Ergänzend wurden Einschätzungen zu

gesellschaftlicher und politischer Akzeptanz vorgenommen und potentielle Verlagerungseffekte ins Ausland berücksichtigt.

Potentielle Maßnahmen mit hoher Effektivität und gleichzeitig hoher Effizienz wurden vor allem in den Sektoren Verkehr und Landwirtschaft identifiziert. Maßnahmen im Energiesektor sowie in Haushalt und Industrie sind im Vergleich dazu weniger effektiv bzw. teurer.

Im Landwirtschaftssektor gehören dazu zur weitergehenden Ammoniakminderung die Einführung einer Stickstoffüberschussabgabe, die Einführung einer Flächenbindung in der Nutztierhaltung, strengere Bilanzobergrenzen in der Stoffstrombilanzverordnung, nährstoffangepasste Multiphasenfütterung in der Schweine- und Geflügelhaltung sowie weitergehende, verpflichtende Vorgaben zur Ausbringung von Wirtschaftsdünger.

Zu den Maßnahmen zur weitergehenden NO_x -Minderung im Verkehrssektor, die besonders effizient und effektiv sind, gehören insbesondere die Angleichung des Steuersatzes von Diesel an den von Benzin, die Abschaffung der Entfernungspauschale, die Einführung einer Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h auf Bundesautobahnen, eine bundesweite fahrleistungsabhängige Pkw-Maut, eine Reform des Dienstwagenprivilegs sowie die Ausweitung der Lkw-Maut auf alle Straßen sowie alle Lkw ab 3,5 Tonnen.

In der abschließenden Diskussion des Aktionsprogramms sind weitere Bewertungskriterien, wie gesellschaftliche und politische Akzeptanz sowie technische und juristische Umsetzbarkeit, zu betrachten, in deren Ergebnis sich auch andere Maßnahmen wie zum Beispiel die Förderung von E-Mobilität oder die Ermäßigung für Elektrobusse bei der EEG-Umlage als empfehlenswert erweisen können.

Letztlich obliegt es der Politik, die geeignete Auswahl an Maßnahmen zu treffen, um regionale und nationale Zielstellungen zur Reduzierung der Stickstoffemissionen möglichst bis zum Jahr 2030 zu erreichen. Mit dem Maßnahmenkatalog des Umweltbundesamtes steht ein geeignetes Instrumentarium zur Verfügung, um ein Aktionsprogramm zur Stickstoffminderung aufzustellen.

Bürgerdialog – Stickstoff geht uns alle an

Obwohl unser Ernährungs-, Konsum- und Mobilitätsverhalten unseren persönlichen „Stickstoff-Fußabdruck“ beeinflusst, ist die Wahrnehmung der Thematik in der Gesellschaft bisher unzureichend. Und dass trotz der vielfältigen Stickstoff-Wirkungen auf die Umwelt und die Gesundheit und obwohl Stickstoff eine essentielle Ressource in der Nahrungsmittelproduktion ist. Bestehende Informationsdefizite und lokale Unterschiede im Ausmaß und in der Art der Betroffenheit führen dazu, dass in der Bevölkerung die Stickstoffproblematik bisher allenfalls in Teilaspekten wahrgenommen wird. Im Rahmen eines von BMU und UBA initiierten breiten Bürgerdialogs wurden daher die Teilnehmenden für die übergreifende Thematik sensibilisiert und Ideen sowie Vorschläge für Minderungsmaßnahmen gesammelt. Dabei wurde insbesondere der lokalspezifische, kreative und externe Blick der ausgewählten Bürgerinnen und Bürger angesprochen. Im Zentrum des Beteiligungsverfahrens stand, in Erfahrung zu bringen, welche Maßnahmen und Instrumente von den Teilnehmenden präferiert werden, um Stickstoffemissionen zu verringern.

Insgesamt nahmen 110 Teilnehmerinnen und Teilnehmer an vier Dialogveranstaltungen im September und Oktober 2019 teil, die über ein Zufallsverfahren mit dem Ziel ausgewählt und eingeladen wurden, eine möglichst heterogene Gruppenzusammensetzung zu erreichen.

Die Teilnehmerinnen und Teilnehmer entwickelten in vier thematischen Regionalkonferenzen in Weimar, Duisburg, Oldenburg und Stuttgart eigene Vorschläge zur Minderung der Stickstoffemissionen. Mit Hilfe unterschiedlicher Diskussionsformate erarbeiteten sie insgesamt 31 Vorschläge, wie Stickstoffemissionen in den Verursacherbereichen „privater Konsum“, „Industrie und Güterverkehr“, „Landwirtschaft“ und „Mobilität“ gemindert werden können. Die Maßnahmenvorschläge reichen von Steuern, finanziellen Zuschüssen (Subventionen) und Verboten über Standardsetzung bis hin zu verbesserten Berufs- und Schulausbildungen sowie Informationskampagnen. Während einer abschließenden zweitägigen Konferenz wurden die 31 Vorschläge der Regionalkonferenzen von 23 gelosten Delegierten zusammengeführt und im Gesamtzusammenhang diskutiert. So wurden schließlich 16 Maßnahmenvorschläge aggregiert beziehungsweise ausgewählt und vertieft

ausgearbeitet. Im Februar 2020 wurde der aus den Konferenzen resultierende Bürgerratschlag veröffentlicht und anschließend dem BMU übergeben (BMU, 2020). Kernelemente dieses Ratschlags sollen in das Stickstoff-Aktionsprogramm des Bundesministeriums für Umwelt einfließen.

Kosten-Nutzen-Analyse

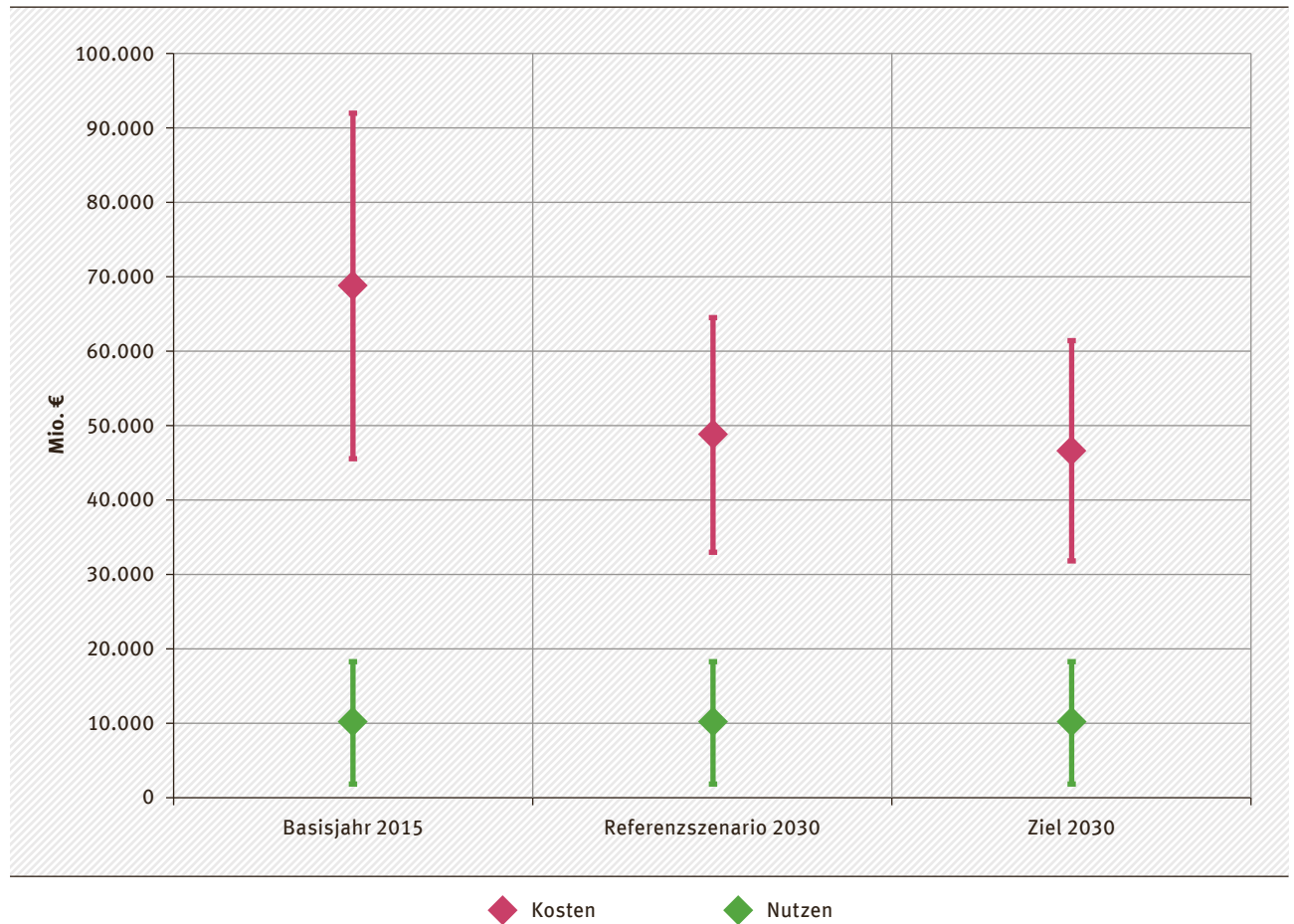
Der Eintrag von Stickstoff in die Umwelt ist mit Kosten und Nutzen verbunden. Die Stickstoffdüngung steigert die Erträge in der landwirtschaftlichen Produktion und hat damit einen Nutzen, welcher mit Kosten der Düngerausbringung verbunden ist. Neben diesen unmittelbaren Kosten und Nutzen verursacht der Stickstoffeintrag aber auch Schäden an der Umwelt und der menschlichen Gesundheit. Für die Gesellschaft sind diese Auswirkungen (z. B. Verunreinigung des Trinkwassers, Biodiversitätsverlust) ebenfalls mit Kosten verbunden. Werden Maßnahmen zur Minderung des Stickstoffausstoßes ergriffen, gelangt weniger Stickstoff in die Umwelt. Dadurch reduzieren sich die negativen Umweltwirkungen und die damit verbundenen gesellschaftlichen Kosten.

Eine volkswirtschaftliche Kosten-Nutzen-Analyse für Stickstoff ermöglicht eine transparente Gegenüberstellung aller relevanten Kosten und Nutzen. Sie liefert damit eine weitere wichtige Entscheidungsgrundlage für die Entwicklung eines Stickstoff-Aktionsprogramms.

Im Rahmen des oben genannten Forschungsprojekts (Oehlmann et al., 2021) wurden Kosten und Nutzen für den Umgang mit Stickstoff in Deutschland abgeschätzt. Die Analyse lässt den Schluss zu, dass die volkswirtschaftlichen Kosten, unter anderem verursacht durch Schädwirkungen auf Umwelt und Gesundheit in Höhe etwa 70 Mrd. Euro, den Nutzen vor allem durch landwirtschaftliche Erträge in Höhe von etwa 10 Mrd. € zum Zeitpunkt 2015 um ein Vielfaches übersteigen. Abbildung 9 zeigt, dass durch konsequente Umsetzung der aktuell bereits beschlossenen Maßnahmenpakete bis 2030 eine leichte Verbesserung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses zu erwarten ist. Die Analyse zeigt aber auch, dass selbst bei der Begrenzung der jährlichen Stickstoffeinträge auf 1.000 kt Stickstoff die durch Schäden verursachten Kosten immer noch höher sind, als der Nutzen. Dies unterstreicht, dass das Stickstoffziel 2030 nur als Zwischenziel zu sehen ist, welches zwar die negativen Auswirkungen verringert, aber noch

Abbildung 9

Überschlägige Kosten und Nutzen durch reaktiven Stickstoff in Deutschland [in Mio. €] für das Jahr 2015, für das Referenzszenario 2030 und für das Stickstoffziel von 1000 kt N pro Jahr



Quelle: Oehlmann et al., 2021, verändert

keinen ausreichenden Schutz der Umwelt und der menschlichen Gesundheit gewährleistet. Für weitergehenden, umfassenden Schutz müsste in Zukunft neben dem Stickstoffziel nicht zuletzt auch die zu Grunde liegenden Umweltqualitätsziele verschärft werden.

Die Kosten und Nutzen des Stickstoffs wurden nach der von van Grinsven et al. (2013) veröffentlichten Methode berechnet. Die Kosten der Umwelt- und Gesundheitswirkungen wurden anhand der Datengrundlage zur ökonomischen Bewertung von Umweltschäden des Umweltbundesamtes (Bünger & Matthey, 2020) ermittelt.

5. Durch kluge Maßnahmen der gesellschaftlichen Verantwortung gerecht werden

Die vorangestellte Analyse zeigt, dass Deutschland im Umgang mit Stickstoff nach wie vor Defizite aufweist. Stickstoffemissionen durch Verbrennungsprozesse müssen weiter gemindert und der Umgang mit der Ressource Stickstoff in der Landwirtschaft weiter optimiert werden, um das vom Umweltbundesamt entwickelte integrierte Stickstoff-Handlungsziel von 1.000 kt N a⁻¹ bis zum Jahr 2030 zu erreichen.

Erster und wichtigster Schritt ist aus Sicht des Umweltbundesamtes die Verabschiedung eines integrierten Aktionsprogramms zur Stickstoffminderung, mit dem sich die Bundesregierung ressortübergreifend dazu bekennt, dass gemeinsame Anstrengungen erforderlich sind, um Synergien zu heben und effizient zu wirtschaften. Vor allem ist eine ambitionierte Umsetzung der beschlossenen Maßnahmen in den Bereichen Düngung, Luftreinhaltung und Klimaschutz von Bedeutung. Eine Maßnahmenanalyse im Auftrag des Umweltbundesamtes hat gezeigt, dass darüber hinaus ausreichend geeignete, sektorspezifische Einzelmaßnahmen vorliegen, um das integrierte Stickstoffmindestziel und seine Teilziele zu erreichen.

Die Einbettung eines solchen Aktionsprogramms in eine tragfähige, ressortabgestimmte Strategie in einem nächsten Schritt schafft die nötige Verbindlichkeit für mittel- bis langfristiges Handeln und langfristigen Wandel hin zu einem nachhaltigen Stickstoffmanagement auf nationaler Ebene. Langfristig wird nur mit weiteren flankierenden Maßnahmen und Prozessen eine Transformation der Gesellschaft in den besonders relevanten Bereichen Ernährung und Mobilität möglich sein, damit wir alle die mit unserem Handeln verbundenen, individuellen Stickstoffemissionen und andere negative Umweltauswirkungen mindern können. Vor allem unser Ernährungs- und Mobilitätsverhalten beeinflussen unseren persönlichen „Stickstoff-Fußabdruck“. Insbesondere eine zurückhaltende Nutzung von motorisiertem Individualverkehr oder Flugzeug bzw. ein maßvoller Konsum tierischer Lebensmittelerzeugnisse können sich positiv auf den Stickstoffkreislauf auswirken. Beides bringt auch Synergien für den Klimaschutz, denn der Übergang zu einer stickstoffeffizienten Gesellschaft sowie stickstoffbewusstes

Verhalten schonen auch das Klima. Unterstützend in diesem Zusammenhang wären Prozesse, die von Bildungs- und Beratungskonzepten für allgemeinbildende und fachspezifische Schulen bis hin zu Optimierungen des bestehenden Rechtsrahmens reichen. Insbesondere bei der Entwicklung einer politischen Strategie zur Stickstoffminderung sollten die großen zu erwartenden Synergien zum Klimaschutz eine bedeutende Rolle spielen.

Da Stickstoff auch in Europa, und global von umwelt-, wirtschafts- und ernährungspolitischem Interesse ist, sollte eine übergreifende nationale Strategie auch eingebettet sein in europäische und internationale Aktivitäten. Jüngst haben die Niederlande eine „Stickstoffkrise“ ausgerufen und zu drastischen Maßnahmen gegriffen, um Ökosysteme besser vor der Stickstoffbelastung aus der Luft, hervorgerufen durch landwirtschaftliche und verbrennungsgetriebene Emissionen zu schützen. Hintergrund war die unzureichende Umsetzung der EU-Richtlinie zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen.¹¹ Über den Handel mit Wirtschaftsdünger macht Stickstoff auch nicht an der Grenze zwischen Deutschland und den Niederlanden halt.

Auf internationaler Ebene befasst sich das globale Wissenschaftler-Netzwerk der „International Nitrogen Initiative (INI)“ damit, integrierte Lösungen für das komplexe System Stickstoffkreislauf zu suchen und zu implementieren. Die 8. Globale Konferenz der INI findet im Juni 2021 als online-event statt. Gastgeber sind das Umweltbundesamt und das Ministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Die Konferenz läuft unter der Überschrift „Nitrogen and the UN Sustainable Development Goals“ (www.ini2021.com). Sie ist ein wichtiger Baustein zur Entwicklung eines global nachhaltigen Stickstoffmanagements. Mit der Ausrichtung der Konferenz möchte Deutschland seine Bemühungen, integrierte Lösungsansätze zu erarbeiten, unterstreichen und gleichzeitig die Zusammenkunft internationaler

¹¹ Richtlinie 92/43/EWG des Rates vom 21. Mai 1992 zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen.

Expertinnen und Experten nutzen, um nationale Wege zur Stickstoffminderung zu optimieren und das nationale öffentliche Bewusstsein zum Stickstoffkreislauf zu stärken.

Die Konferenz „INI2021“ knüpft an die „Stickstoff-Resolution“ zum nachhaltigen Stickstoffmanagement der vierten UN-Umweltversammlung (UNEA-4) an

(UNEP, 2019). Mit dieser haben auch die Umweltministerinnen und Umweltminister der Vereinten Nationen zum Ausdruck gebracht, dass sektor- und medienübergreifende Zusammenarbeit innerhalb der Vereinten Nationen, mit dem Ziel den Umgang mit Stickstoff zu optimieren, einen wichtigen Beitrag zum Erreichen der Nachhaltigkeitsziele leisten kann.

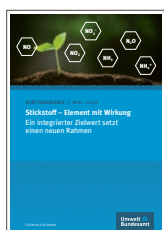
Glossar

anthropogen	Durch Menschen hervorgerufen
CLRTAP	Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution
Critical Loads	Maß, um die Empfindlichkeit von Ökosystemen zu bewerten. Es handelt sich dabei um naturwissenschaftlich begründete Belastungsgrenzen für atmosphärische Schadstoffeinträge pro Flächen- und Zeiteinheit.
Denitrifikation	Mikrobiologische Umwandlungsprozesse in Gewässern und Böden, bei dem Nitrat in molekularen Luftstickstoff (N_2) gewandelt wird.
Deposition	Die Ablagerung von Luftschadstoffen; sie werden gasförmig, als Partikel oder in Niederschlägen und Luftfeuchtigkeit gelöst in Ökosysteme eingetragen.
Eutrophierung	Eine durch menschliche Aktivitäten verursachte Anreicherung von Nährstoffen in Ökosystemen
FFH-Richtlinie	EU-Richtlinie zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen
Genfer Luftreinhaltekonvention	Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung (Convention on Long-range Transboundary Air Pollution) der UN Weltwirtschaftskommission
kt	Kilotonne, 1000 Tonnen
kt $N\ a^{-1}$	Kilotonne Stickstoff pro Jahr
mg l^{-1}	Milligramm pro Liter
N	Stickstoff
NH_3	Ammoniak
NH_4^+	Ammonium
NO_2^-	Nitrit
NO_3^-	Nitrat
NO_x	Stickstoffoxid
N_2O	Lachgas
NEC-Richtlinie	Richtlinie (EU) 2016/2284 des europäischen Parlamentes und des europäischen Rates vom 14. Dezember 2016 über die Reduktion der nationalen Emissionen bestimmter Luftschadstoffe, zur Änderung der Richtlinie 2003/35/EG und zur Aufhebung der Richtlinie 2001/81/EG
Reaktiver Stickstoff	Stickstoffverbindungen, die sehr reaktionsfreudig sind: Sie verbinden sich in unterschiedlicher Zusammensetzung mit organischen und anorganischen Stoffen und sind in der Lage, diese Verbindungen schnell zu wechseln.
Tg	Teragramm; entspricht 1000 kt
UNECE	Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (englisch United Nations Economic Commission for Europe)
Versauerung	Abnehmender pH-Wert eines Systems (z. B. Boden oder Gewässer); dies wird durch sogenannte versauernde Substanzen verursacht.
$\mu g\ m^{-3}$	Mikrogramm pro Kubikmeter

Literatur

- Alfred Töpfer Akademie für Naturschutz (NNA) (1997).** Stickstoffminderungsprogramm. NNA-Berichte. 10. Schneverdingen
- Bach, M., et al. (2020).** Reaktive Stickstoffflüsse in Deutschland 2010–2014 (DESTINO Bericht 2), FKZ 3716 51 200 0. UBA-Texte. 64/2020. M. Geupel. Umweltbundesamt. Dessau-Rosslau
- BMU – Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit (2016).** Climate Action Plan 2050 – Principles and goals of the German government's climate policy. Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). BMU. Berlin
- BMU (2020).** „Stickstoff: Zu viel des Guten! Warum kommt zu viel Stickstoff in die Umwelt und wie können wir gemeinsam das richtige Maß finden?“. zuletzt aufgerufen am 04.03.2020, unter <https://www.stickstoff-dialog.de/>.
- BMUB (2017).** Stickstoffeintrag in die Biosphäre – Erster Stickstoff-Bericht der Bundesregierung. Bundesministerium für Umwelt (BMUB). Berlin
- Bundesamt für Naturschutz (BfN) (2016).** Daten zur Natur 2016. BfN. BfN. Bonn
- Bundesregierung (2016).** Ordinance on the protection of surface waters (Oberflächengewässerverordnung – Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer) Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz. BGBl. I S. 1373 vom 20. Juni 2016. Berlin.
- Bundesregierung (2020).** Düngeverordnung: Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen – geändert am 28. April 2020.
- Bünger, B. and A. Matthey (2020).** Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten – Kostensätze. Broschüre. 2020. Umweltbundesamt, in Veröffentlichung. Dessau-Roßlau
- Cape, J. N., et al. (2009).** Evidence for changing the critical level for ammonia. *Environmental Pollution* **157**(3). 1033–1037.
- Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (CLRTAP) (2013).** Guidance document on national nitrogen budgets. ECE/EB.AIR/119. Expert Panel on Nitrogen Budgets. Genf
- Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (CLRTAP) (2017).** Mapping critical levels for vegetation, Chapter 3. Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads and levels and air pollution effects, risks and trends. ICP Vegetation. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/4292/dokumente/ch3-mapman-2017-10.pdf>.
- Ertl, G. and J. Soentgen (2015).** N Stickstoff – Ein Element schreibt Weltgeschichte. München, oekom Verlag
- European Commission (2013).** A Clean Air Programme for Europe – COM(2013) 918 final European Commission. European Commission. Brussels
- European Council (1991).** Council Directive of 12 December 1991 concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources European Council. 91/676/EEC. Brussels.
- European Union (2016).** Directive (EU) 2016/2284 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2016 on the reduction of national emissions of certain atmospheric pollutants, amending Directive 2003/35/EC and repealing Directive 2001/81/EC. European Union. Brussels.
- Faustini, A., et al. (2014).** Nitrogen dioxide and mortality: Review and meta-analysis of long-term studies. *European Respiratory Journal* **44**(3). 744–753.
- Fowler, D., et al. (2013).** The global nitrogen cycle in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **368**(1621)
- Friedrich, B. (2019).** Fritz Haber at One Hundred Fifty: Evolving views of and on a German Jewish Patriot.
- Geupel, M., et al. (2021).** A National Nitrogen Target for Germany. *Sustainability* **13**(3). 1121.
- Guarnieri, M. and J. R. Balmes (2014).** Outdoor air pollution and asthma. *The Lancet* **383**(9928). 1581–1592.
- Harthan, R. O., et al. (2020).** Abschätzung der Treibhausgas-minderungswirkung des Klimaschutzprogramms 2030 der Bundesregierung. Dessau-Roßlau, Umweltbundesamt
- Haß, M., et al. (2020).** Thünen-Baseline 2020–2030: Agrarökonomische Projektionen für Deutschland. Thünen Report. 82. Johann Heinrich von Thünen-Institut.
- HELCOM (2018).** State of the Baltic Sea – Second HELCOM holistic assessment 2011–2016. Baltic Sea Environment Proceedings. 155.
- Heldstab, J., et al. (2020).** Integrierter Stickstoffindikator, nationales Stickstoffziel und IST-Zustand (DESTINO Teilbericht 1), FKZ 3716 51 200 0. UBA-Texte. 2020. M. Geupel. Umweltbundesamt. Dessau-Rosslau
- ICP Materials (2018).** Inventory and condition of stock of materials at UNESCO world cultural heritage sites (Part II – Risk assessment). Report 83. International Co-Operative Programme on effects on materials including historic and cultural monuments (ICP Materials). ENEA. Rome, Italy
- 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. T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner et al. Cambridge University. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA,
- Kanter, D. R., et al. (2016).** Nitrous oxide's ozone destructiveness under different climate scenarios. 7th International Nitrogen Initiative Conference. D. R. Kanter. Melbourne, International Nitrogen Initiative. http://www.ini2016.com/pdf-papers/INI2016_Kanter_David1.pdf#page=1&zoom=auto,-521,842.
- Leip, A., et al. (2014).** The nitrogen footprint of food products in the European Union. *Journal of Agricultural Science* **152**
- Licht, S., et al. (2014).** Ammonia synthesis by N₂ and steam electrolysis in molten hydroxide suspensions of nanoscale Fe₂O₃. *Science* **345**(6197). 637–640.
- Oehlmann, M., et al. (2021).** Maßnahmenvorschläge für ein Aktionsprogramm zur integrierten Stickstoffminderung. Forschungsprojekt. 3717 11 260 0. M. Geupel. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau, UBA-Texte 78/2021

- Riecken, U., et al. (2006).** Rote Liste der gefährdeten Biotoptypen Deutschlands – zweite Fortgeschriebene Fassung 2006. Münster-Hiltrup, LV Druck im Landwirtschaftsverlag GmbH
- Rockström, J., et al. (2009).** Planetary boundaries: Exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society* **14**(2)
- Schaap, M., et al. (2018).** Modellierung atmosphärischer Stoffeinträge von 2000 bis 2015 zur Bewertung der ökosystem-spezifischen Gefährdung von Biodiversität durch Luftschadstoffe in Deutschland. UBA-Texte. 79/2018. M. Geupel. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau
- Schneider, A., et al. (2018).** Quantifizierung von umweltbedingten Krankheitslasten aufgrund der Stickstoffdioxid-Exposition in Deutschland. *Umwelt & Gesundheit* 2018/01. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau
- Smil, V. (2000).** Enriching the earth: Fritz Haber, Carl Bosch, and the transformation of world food production, Cambridge, Mass.: MIT Press, 2000.
- SRU (2015).** Sondergutachten Stickstoff: Lösungsstrategien für ein drängendes Umweltproblem. Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU). Berlin
- Steffen, W., et al. (2015).** The trajectory of the anthropocene: The great acceleration. *Anthropocene Review* **2**(1). 81–98.
- Steffen, W., et al. (2015).** Planetary Boundaries: Guiding human development on a changing planet. *ScienceXpress* **347**(6223)
- Sutton, M.A., et al. (2011).** The European nitrogen assessment: Sources, Effects and Policy Perspectives. Cambridge, New York, Cambridge University Press
- U.S. Geological Survey (2019).** „Nitrogen Statistics and Information.“ zuletzt aufgerufen am 08.01.2020, unter <https://www.usgs.gov/centers/nmic/nitrogen-statistics-and-information>.
- Umweltbundesamt (2009).** Hintergrundpapier zu einer multimedialen Stickstoffemissionsminderungsstrategie. Hintergrundpapier. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau
- Umweltbundesamt (2015).** Reaktiver Stickstoff in Deutschland – Ursachen, Wirkungen, Maßnahmen. M. Geupel and J. Frommer. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau
- Umweltbundesamt (2017).** Quantifizierung der landwirtschaftlich verursachten Kosten zur Sicherung der Trinkwasserbereitstellung. UBA-Texte. 43/2017. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau
- Umweltbundesamt (2019).** Einfluss von atmosphärischen Stickstoffeinträgen auf die Biodiversität von Insekten in terrestrischen Ökosystemen – Eine Literaturrecherche. Hintergrundpapier. K. Naethe. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau
- Umweltbundesamt (2019).** „Stickstoff- und Phosphoreinträge aus Punktquellen und diffusen Quellen in die Oberflächengewässer in Deutschland.“ zuletzt aufgerufen am 10.01.2020, unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/wasser/fliessgewaesser/eintraege-von-naehr-schadstoffen-in-die#textpart-1>.
- Umweltbundesamt (2021).** Luftqualität 2020 – Vorläufige Auswertung. Hintergrundpapier. A. Minkos, U. Dauert, S. Feigenspan and S. Kessinger. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau
- UNEP (2019).** Sustainable nitrogen management. UNEP/EA.4/L.16. United Nations Environment Assembly of the United Nations Environment Programme – Fourth session
- UNFCCC (2015).** The Paris Agreement. UNFCCC. Paris.
- United Nations (2019).** „World Population Prospects 2019.“ zuletzt aufgerufen am 08.01.2020, unter <https://population.un.org/wpp/Download/Standard/Population/>.
- van Grinsven, H.J.M., et al. (2013).** Costs and Benefits of Nitrogen for Europe and Implications for Mitigation. *Environmental Science & Technology* **47**(8). 3571–3579.
- von Schneidmesser, E., et al. (2016).** Agriculture, Ammonia, and Air Pollution. IASS Fact Sheet. <http://publications.iass-potsdam.de/pubman/faces/viewItemFullPage.jsp>.
- WHO (2016).** Nitrate and nitrite in drinking-water, Draft background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality. in Veröffentlichung. World Health Organization. Geneva
- World Health Organization (2013).** Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP project: final technical report World Health Organization. Geneva



► **Unsere Broschüren als Download**
Kurzlink: bit.ly/2dowYYI

 www.facebook.com/umweltbundesamt.de
 www.twitter.com/umweltbundesamt
 www.youtube.com/user/umweltbundesamt
 www.instagram.com/umweltbundesamt/