

# Überdosis Stickstoff

Wann wird eine Lösung selbst zum Problem?



LNCU.de  
ID 36415  
CC-BY-SA 4.0  
Online abrufen

## Aufgaben

- 1 Sehen Sie das Video (ab Minute 3:14). Benennen Sie die Stickstoffverbindungen, die darin als problematisch dargestellt werden.
- 2 Beschreiben Sie, an welchen Stellen der Mensch in den natürlichen Stickstoffkreislauf eingreift und woher der zusätzliche reaktive Stickstoff stammt.

## M1 **Leben braucht den Stickstoffkreislauf - aber...**



Milliarden Menschen verdanken ihr Leben dem reaktiven Stickstoff. Doch der Überfluss gefährdet Böden, Gewässer, Klima – und überschreitet die Grenzen des Planeten.

**VIDEO**



Mit dem Klick auf diesen Hinweis aktivierst du Inhalte von einem Drittanbieter. Dabei wird eine Verbindung zu dessen Servern hergestellt und deine IP-Adresse übertragen. Der Anbieter nutzt ggf. Cookies und Tracking-Tools, um dein Nutzungsverhalten zu analysieren.

Video 1: Der Stickstoffkreislauf wird von Menschen beeinflusst <sup>1</sup> <sup>2</sup>

## Aufgaben

### Expertenphase (in Gruppen, je drei Themenfelder):

- 3 Lesen Sie Ihre drei zugeteilten Themenfelder gründlich und analysieren Sie für jedes: (a) Welcher menschliche Eingriff liegt vor? (b) Welches Problem entsteht – mit der zentralen Zahl? (c) Welcher Lösungsansatz greift? Wo Ihnen der fachliche Hintergrund fehlt, recherchieren Sie gezielt nach (z. B. Nitrifikation/Denitrifikation, thermische  $\text{NO}_x$ -Bildung, SCR-Katalysator).

### Kartenarbeit:

- 4 Laden Sie die Kreislaufgrafik herunter. Markieren Sie für jedes Ihrer drei Themenfelder die passende Stelle im Kreislauf und fügen Sie ein knappes Textfeld ein nach dem Muster: Eingriff – Problem – Lösungsansatz.

### Austausch und Sicherung:

- 5 Stellen Sie Ihre drei markierten Stellen einer anderen Gruppe vor und erläutern Sie sie; ergänzen Sie gegenseitig Ihre Grafiken, bis alle sechs Eingriffe verortet sind.

## M2 Genauer hingeschaut

### Überdüngung der Böden

#### Das Problem

70 kg Stickstoff pro Hektar – jedes Jahr zu viel.

So hoch war der durchschnittliche Stickstoffüberschuss der deutschen Landwirtschaft im Mittel der Jahre 2019 bis 2023; seit 1994 (117 kg) ist er zwar deutlich gesunken und erreicht erstmals den politischen Zielwert, doch gelöst ist das Problem damit nicht. 3 Den Überschuss wandeln Bodenbakterien zu Nitrat um (Nitrifikation), das mobil ist und ins Grundwasser ausgewaschen wird. An rund einem Viertel der Messstellen des EU-Nitratmessnetzes überschreitet es den Trinkwasser-Grenzwert von 50 mg/L. 4

#### Lösungsansätze oder Mutmacher

Was helfen könnte:

- Chemisch wirken Nitrifikationshemmer: Sie blockieren das Enzym der nitrifizierenden Bakterien, sodass Ammonium länger im Boden gebunden bleibt und weniger Nitrat ausgewaschen wird.
- Agronomisch helfen die sensorgesteuerte Präzisionsdüngung und der Anbau von Leguminosen, die Luftstickstoff biologisch binden und Mineraldünger einsparen.
- Politisch begrenzen die EU-Nitratrichtlinie und die Düngeverordnung die erlaubten Mengen und Zeiten. 5

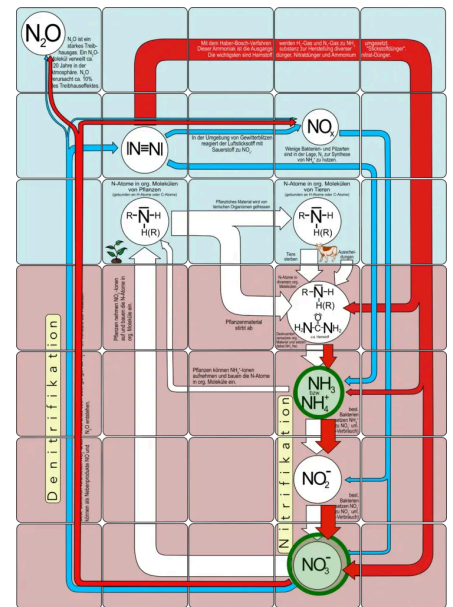


Abb. 1: Menschliche Einflüsse auf den Stickstoffkreislauf 32

### Stickstoff aus dem Verkehr ( $\text{NO}_x$ )

#### Das Problem

36 Prozent – der Verkehr ist der größte  $\text{NO}_x$ -Verursacher.

2024 stammte mehr als ein Drittel der Stickstoffoxid-Emissionen in Deutschland aus dem Verkehr; kein anderer Sektor trägt mehr zur  $\text{NO}_x$ -Belastung bei. 6 In Verbrennungsmotoren reagiert bei über 1.300 °C der reaktionsträge Luftstickstoff mit Sauerstoff zu Stickstoffmonoxid; diese Bildung ist endotherm, sodass das Gleichgewicht erst bei solch hohen Temperaturen auf der Seite des NO liegt (thermische  $\text{NO}_x$ -Bildung). Kühlt das Abgas ab, müsste sich das Gleichgewicht eigentlich umkehren – bei niedriger Temperatur ist NO gegenüber Stickstoff und Sauerstoff instabil –, doch der Rückzerfall ist kinetisch so stark gehemmt, dass er in endlicher Zeit praktisch nicht abläuft: Das NO bleibt metastabil „eingefroren“. Stattdessen entsteht daraus in der Atmosphäre braunes, stechend riechendes Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ), das die Atemwege reizt, bodennahes Ozon fördert und über die Bildung von Salpetersäure zum sauren Regen beiträgt.

Im Vergleich zur Landwirtschaft fällt der Verkehr beim gesamten Stickstoffeintrag zwar weniger ins Gewicht: Von dem, was aus der Luft niedergeht, stammen rund zwei Drittel aus

landwirtschaftlichem Ammoniak und nur etwa ein Drittel aus den Stickoxiden von Verkehr und Industrie.<sup>7</sup> Harmlos ist  $\text{NO}_x$  damit aber nicht: Mit dem Regen verteilt es sich großflächig und düngt auch nährstoffarme Lebensräume, die gar nicht gedüngt werden sollen – 2019 waren noch 69 % der Fläche empfindlicher Ökosysteme durch zu hohe Stickstoffeinträge überlastet, was spezialisierte Arten verdrängt.<sup>8</sup>

### Lösungsansätze oder Mutmacher

Was helfen könnte:

- Chemisch reinigt der SCR-Katalysator das Abgas: Aus eingespritzter Harnstofflösung (AdBlue) entsteht Ammoniak, der mit den Stickoxiden zu harmlosem Stickstoff und Wasser reagiert – im optimalen Betriebsbereich bis zu 90 Prozent, im Stadtverkehr mit Kaltstart und Kurzstrecke deutlich weniger.<sup>9</sup> Dass die Technik wirkt, heißt aber nicht, dass sie immer voll genutzt wird: Im Abgasskandal („Dieselgate“) machte die US-Umweltbehörde EPA 2015 öffentlich, dass Volkswagen eine illegale Abschalteneinrichtung einsetzte – eine Software, die den Prüfstand erkannte und die Abgasreinigung nur dort voll arbeiten ließ, während der  $\text{NO}_x$ -Ausstoß auf der Straße um ein Vielfaches höher lag; betroffen waren weltweit rund 11 Millionen Diesel-Fahrzeuge.<sup>10</sup>
- Politisch wird das Tempolimit diskutiert: Tempo 100 auf Autobahnen und 80 km/h auf Außerortsstraßen würde laut Umweltbundesamt die  $\text{NO}_x$ -Emissionen um bis zu rund 16 Prozent senken.<sup>11</sup>

## Lebensmittelverschwendung und Fleischkonsum

### Das Problem

10,8 Millionen Tonnen Lebensmittel – jedes Jahr im Müll.

So viel Lebensmittel wurden 2022 in Deutschland weggeworfen, mehr als die Hälfte davon (58 %, rund 6,3 Mio. Tonnen) stammt aus privaten Haushalten.<sup>12</sup> Jedes Lebensmittel trägt einen Stickstoff-Fußabdruck: Für seinen Anbau wurde mit Haber-Bosch-Stickstoff gedüngt – wird es weggeworfen, gelangte dieser reaktive Stickstoff umsonst in die Umwelt. Besonders schwer wiegen tierische Produkte: Ihr Futter muss gedüngt werden, die Tiere scheiden Stickstoff als Ammoniak aus, und beim mikrobiellen Abbau entsteht zusätzlich das Klimagas Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ).

### Lösungsansätze oder Mutmacher

Was helfen kann:

- Die Hebel liegen hier nah an der eigenen Lebenswelt: Wer bewusst einkauft, Reste verwertet und Haltbarkeitsdaten richtig deutet – das Mindesthaltbarkeitsdatum ist kein Verfallsdatum –, vermeidet unnötigen Stickstoffeintrag. Wer den Anteil tierischer Lebensmittel senkt, spart zusätzlich: Mit veganer Ernährung lässt sich der ernährungsbezogene Stickstoff-Fußabdruck gegenüber dem deutschen Durchschnitt halbieren.<sup>13</sup>
- Politisch hat sich Deutschland mit dem UN-Nachhaltigkeitsziel 12.3 verpflichtet, die Lebensmittelabfälle bis 2030 zu halbieren.<sup>14</sup>

## Lachgas, Klima, Artensterben

### Das Problem

273-mal stärker als  $\text{CO}_2$  – das unterschätzte Klimagas.

Über einen Zeitraum von 100 Jahren wirkt Lachgas (Distickstoffmonoxid,  $\text{N}_2\text{O}$ ) 273-mal so stark auf das Klima wie dieselbe Menge Kohlenstoffdioxid.<sup>15</sup> Seine Konzentration ist von 270 ppb in vorindustrieller Zeit auf 338 ppb im Jahr 2024 gestiegen – eine Zunahme um rund ein Viertel.<sup>16</sup>  $\text{N}_2\text{O}$  entsteht vor allem im Boden: Bauen Bakterien unter

sauerstoffarmen Bedingungen Nitrat ab (Denitrifikation), entweicht Lachgas als Nebenprodukt – auf stark gedüngten Flächen besonders viel. In der Stratosphäre zerstört es zudem Ozon und ist heute die wichtigste vom Menschen verursachte ozonschädigende Substanz<sup>17</sup>; an Land verdrängt der Stickstoffeintrag spezialisierte Arten – in zwei Dritteln der europäischen Wälder hat er mindestens 10 % der Pflanzenvielfalt gekostet.<sup>18</sup>

## Lösungsansätze oder Mutmacher

Was helfen kann:

- Der wirksamste Hebel ist eine geringere und bedarfsgerechtere Stickstoffdüngung – es greifen also dieselben Maßnahmen wie gegen die Überdüngung der Böden: Nitrifikationshemmer, Präzisionsdüngung und eine strengere Düngeverordnung.
- Anders als die FCKW wird Lachgas vom internationalen Ozonschutzabkommen (Montrealer Protokoll) nicht erfasst – es kann also nicht per Verbot ‚abgeschaltet‘ werden. Die Minderung muss deshalb an der Hauptquelle ansetzen: der Stickstoffdüngung in der Landwirtschaft.<sup>19</sup>

## Globale Ungleichheit: Hunger und Überfluss

### Das Problem

48 Prozent der Menschheit leben von künstlichem Stickstoff.

Knapp die Hälfte der Weltbevölkerung wird durch Stickstoff ernährt, der mit dem Haber-Bosch-Verfahren gewonnen wurde – ohne synthetischen Dünger könnte die Erde über acht Milliarden Menschen nicht ernähren.<sup>20</sup> Seit Beginn des 20. Jahrhunderts wandelt das Verfahren Luftstickstoff bei etwa 450 °C und 200 bar an einem Eisenkatalysator in Ammoniak um – die Grundlage aller Stickstoffdünger; rund 70 % des Ammoniaks fließen in Dünger, doch das Verfahren verbraucht etwa 2 % des globalen Endenergiebedarfs und verursacht rund 450 Mio. t CO<sub>2</sub> pro Jahr.<sup>21</sup> Der Segen ist allerdings ungleich verteilt: Während in Europa und Asien der Überschuss Grundwasser und Klima belastet, fehlt es in weiten Teilen Afrikas an Dünger – pro Kopf setzt Afrika nur etwa 5 kg Mineraldünger im Jahr ein, Europa rund 32 kg und Ozeanien sogar 79 kg.<sup>22</sup> Dort, wo zu wenig Stickstoff verfügbar ist, verarmen die Böden und die Ernten bleiben gering.

### Warum fehlt es in Afrika an Düngemitteln?

Dass in Afrika so wenig Mineraldünger eingesetzt wird, liegt kaum daran, dass die Bäuerinnen und Bauern ihn nicht wollten – es ist vor allem eine Frage von Preis und Zugang. Dünger ist für viele Kleinbetriebe im Verhältnis zum Einkommen schlicht zu teuer, und ausgerechnet dort, wo die Menschen am wenigsten Geld haben, ist er oft teurer als in Europa: Rund 80 Prozent des in Subsahara-Afrika genutzten Düngers werden importiert, und Fracht, Finanzierung und Logistik treiben den Preis nach oben.<sup>23</sup> Hinzu kommt die Strecke ins Landesinnere: In Binnenländern liegt das Verhältnis von Dünger- zu Erzeugerpreis spürbar höher als in Küstenländern, weil der Transport vom Hafen über schlechte Straßen und ohne dichtes Händlernetz teuer ist.<sup>24</sup> Erschwerend wirkt, dass Dünger zur Aussaat bezahlt werden muss, der Ertrag aber erst Monate später kommt – ohne Kredite oder Ersparnisse können viele diese Vorleistung nicht stemmen, selbst wenn sich der Dünger rechnen würde. Und weil bei unsicherem Regen jede gekaufte Tüte ein Wagnis ist – bleibt der Niederschlag aus, ist das Geld verloren –, halten sich viele zurück. Ein Teil der Lücke wird über organische Quellen wie Mist, Kompost und stickstoffbindende Leguminosen ersetzt, doch das mildert den Mangel nur, es schließt ihn nicht.<sup>25</sup> Verschärft wird all das durch externe Schocks: Der Preissprung von 2021/22 – Energiekrise und Krieg in der Ukraine – ließ die Düngerpreise in vielen Ländern binnen zwei Jahren etwa auf das Doppelte steigen.<sup>26</sup> Hier schließt sich der Kreis zur Chemie: Weil der Wasserstoff für das Haber-Bosch-Verfahren überwiegend aus Erdgas gewonnen wird, schlägt ein Anstieg des Gaspreises direkt auf den Düngerpreis durch.

## Lösungsansätze oder Mutmacher

Was helfen kann:

- Zwei Ansätze weisen nach vorn. „Grüner“ Ammoniak aus Wasserstoff von erneuerbarem Strom könnte die enormen CO<sub>2</sub>-Emissionen des Verfahrens drastisch senken; weil er ohne Erdgas auskommt, ließe er sich zudem dezentral mit eigenem Solar- und Windstrom in kleinen, modularen Anlagen nah bei den Feldern herstellen – für Regionen wie Afrika eine Chance, Importabhängigkeit, Transportaufschläge und Gaspreis-Schocks zugleich zu umgehen.<sup>27</sup> Noch ist diese Produktion allerdings teurer als importierter Dünger, sodass solche Anlagen kurzfristig kaum wirtschaftlich sind.<sup>28</sup>
- Der zweite Hebel ist eine höhere Stickstoffnutzungseffizienz: Weltweit nimmt bislang nur etwa die Hälfte des ausgebrachten Stickstoffs die Pflanze auf – weniger Verluste verringern die Umweltlast und helfen zugleich, die Schere zwischen Mangel und Überfluss zu schließen.

## Tote Zonen

### Das Problem

Über 500 Tote Zonen – und es werden mehr.

Tote Zonen sind Meeresgebiete, in denen der Sauerstoffgehalt unter 2 mg pro Liter fällt – zu wenig für die meisten Fische und Bodentiere. Ursache ist fast immer ein Übermaß an Stickstoff und Phosphor: Über die Flüsse gelangen die Nährstoffe ins Küstenmeer und lösen eine Massenvermehrung von Algen aus; sterben diese ab, zehren Bakterien beim Abbau den Sauerstoff des Tiefenwassers auf, bis Hypoxie und schließlich Anoxie entstehen – in der sauerstofffreien Schicht bilden Bakterien zusätzlich giftigen Schwefelwasserstoff. 2008 waren weltweit über 400 solcher Gebiete mit zusammen über 245.000 km<sup>2</sup> dokumentiert; seither hat sich ihre Zahl auf inzwischen über 500 vergrößert – bei lückenhafter Überwachung womöglich bis zu 700.<sup>29</sup> <sup>30</sup>

## Lösungsansätze oder Mutmacher

Was helfen kann:

- Hoffnungslos ist die Lage nicht: Im Schwarzen Meer sanken nach 1990 die Nährstoffeinträge drastisch – Stickstoff um etwa 20 %, Phosphor um rund 50 % –, und die Zahl der nachgewiesenen am Boden lebenden Arten verdoppelte sich zwischen 1980 und 2000; das gilt als die weltweit erste dokumentierte Umkehrung einer marinen Toten Zone.<sup>31</sup>
- Die Lehre ist einfach: Weniger Stickstoff bedeutet mehr Leben im Meer – und die Werkzeuge dafür liefern die anderen Themenfelder, von der Düngeverordnung über die Präzisionsdüngung bis zu saubereren Motoren.



## Wo lohnt Eingreifen am meisten?

- Welcher der genannten menschlichen Eingriffe in den Stickstoffkreislauf ist Ihrer Einschätzung nach der folgenreichste? Begründen Sie anhand von Kriterien (zum Beispiel Schwere der Folgen, Reichweite, Umkehrbarkeit oder Wirksamkeit der verfügbaren Lösung).
- Gehen Sie ähnlich bei den Maßnahmen gegen den Stickstoffeintrag vor. Bei welchen sind Sie persönlich wirkmächtig? Wo handelt es sich eher um politische Entscheidungen.



## Grüner Ammoniak für Afrika – Befreiung oder teures Versprechen?

In weiten Teilen Afrikas fehlt es an Dünger. Mit „grünem“ Ammoniak geht das Versprechen einher, ihn künftig dezentral vor Ort herzustellen – unabhängig von Importen und Gaspreisen. Noch aber ist diese Produktion teurer als eingeführter Dünger, und die großen Projekte zielen bislang auf den Export.

- Fassen Sie in eigenen Worten zusammen, was „grüner“ Ammoniak ist und worin er sich vom herkömmlichen Haber-Bosch-Verfahren unterscheidet.
- Beurteilen Sie: Ist die dezentrale Produktion von grünem Ammoniak für Afrika eher eine Chance oder ein teures Versprechen? Erläutern Sie, welche Entwicklung Sie dazu bringen würde, Ihre Einschätzung zu ändern.



Les- und Hör Tipp: Die Wissenschaftsjournalistin Anne Preger hat ein ganzes Buch über die globale Stickstoff-Überdosis geschrieben. Im [SWR-Feature](#) erzählt sie darüber

## Einzelnachweise

- 1 Video online verfügbar unter <https://youtu.be/Mk5v2Z8GoQg>
- 2 Teil eines größeren Materialangebots, Lüsse, M., Brockhage, F., Pietzner, V. and Beeken, M. (2021), Nachhaltige Unterrichtsvorschläge zur Stickstoffproblematik. Chem. Unserer Zeit, 55: 186-191. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ciuz.202000005>
- 3 Umweltbundesamt: Stickstoffeintrag aus der Landwirtschaft und Stickstoffüberschuss. Indikator, Stand 2026. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltzustand-trends/land-forstwirtschaft/stickstoffeintrag-aus-der-landwirtschaft> (letzter Abruf: Juni 2026)
- 4 BMLEH/BMUV: Nitratbericht 2024, Pressemitteilung Nr. 65/2024 vom 04.07.2024 (25,6 % der Messstellen des EU-Nitratmessnetzes > 50 mg/l, Zeitraum 2020–2022). <https://www.bmleh.de/SharedDocs/Archiv/Pressemitteilungen/2024/065-Nitratbericht.html> (letzter Abruf: Juni 2026)
- 5 Umweltbundesamt: Reaktiver Stickstoff in Deutschland – Maßnahmen. UBA-Umweltatlas Reaktiver Stickstoff. <https://www.umweltbundesamt.de/umweltatlas/reaktiver-stickstoff> (letzter Abruf: Juni 2026)
- 6 Umweltbundesamt: Emissionen des Verkehrs. Stand 2026 (Verkehr 2024: 36 % der NO<sub>x</sub>-Emissionen, mit Abstand größter Verursacher). <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltzustand-trends/verkehr/emissionen-des-verkehrs> (letzter Abruf: Juni 2026)
- 7 Umweltbundesamt: Deposition von Stickstoffverbindungen (rund 2/3 reduzierter Stickstoff/Ammoniak aus der Landwirtschaft, 1/3 oxidierter Stickstoff aus Verkehr und Industrie). <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe-oekosysteme/eintraege-von-schadstoffen/deposition-von-stickstoffverbindungen> (letzter Abruf: Juni 2026)
- 8 Umweltbundesamt: Indikator Eutrophierung durch Stickstoff (2019 Critical Loads auf 69 % der Fläche empfindlicher Ökosysteme überschritten; 2005: 79 %). <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-eutrophierung-durch-stickstoff> (letzter Abruf: Juni 2026)
- 9 Umweltbundesamt: Technische Nachrüstung senkt NO<sub>x</sub>-Ausstoß von Diesel-Pkw wirksam (SCR entfernt im optimalen Betriebsbereich bis zu 90 % der NO<sub>x</sub>). <https://www.umweltbundesamt.de/themen/technische-nachruistung-senkt-nox-ausstoss-von> (letzter Abruf: Juni 2026)
- 10 US-Umweltbehörde EPA: Notice of Violation gegen Volkswagen vom 18.09.2015 (illegale Abschaltvorrichtung im Dieselmotor EA 189; im Realbetrieb NO<sub>x</sub> um ein Vielfaches über dem Grenzwert). VW räumte weltweit rund 11 Mio. betroffene Fahrzeuge ein. <https://www.epa.gov/vw> (letzter Abruf: Juni 2026)
- 11 Umweltbundesamt: Tempolimit (Friedrich et al. 2024: NO<sub>x</sub>-Rückgang zwischen 5,1 % im Szenario T130/100 und 16,1 % im Szenario T100/80). <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/nachhaltige-mobilitaet/tempolimit> (letzter Abruf: Juni 2026)
- 12 BMLEH/Umweltbundesamt: Lebensmittelabfälle in Deutschland – aktuelle Zahlen nach Sektoren (für 2022 an die EU-Kommission berichtet: 10,8 Mio. t, davon 58 % bzw. 6,3 Mio. t aus privaten Haushalten). <https://www.bmleh.de/DE/themen/ernaehrung/lebensmittelverschwendung/studie-lebensmittelabfaelle-deutschland.html> (letzter Abruf: Juni 2026)
- 13 Umweltbundesamt: Wie schlägt sich der Ernährungsstil in der persönlichen Stickstoffbilanz nieder? UBA-Umweltatlas Reaktiver Stickstoff (vegane Ernährung halbiert den ernährungsbezogenen Stickstoff-Fußabdruck gegenüber dem deutschen Durchschnitt). <https://www.umweltbundesamt.de/umweltatlas/reaktiver-stickstoff/mein-handeln/was-koennen-wir-tun/wie-schlaegt-sich-der-ernaehrungsstil-in-der> (letzter Abruf: Juni 2026)
- 14 UN-Nachhaltigkeitsziel (SDG) 12.3: Halbierung der Pro-Kopf-Lebensmittelabfälle bis 2030; in Deutschland umgesetzt über die Nationale Strategie zur Reduzierung der Lebensmittelverschwendung. <https://www.bmleh.de/DE/themen/ernaehrung/lebensmittelverschwendung/strategie-lebensmittelverschwendung.html> (letzter Abruf: Juni 2026)
- 15 IPCC, Sechster Sachstandsbericht (AR6), WG1, Kap. 7 (Forster et al. 2021): GWP<sub>100</sub> von N<sub>2</sub>O = 273. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-7/> (letzter Abruf: Juni 2026)
- 16 World Meteorological Organization (WMO): Greenhouse Gas Bulletin No. 21, 15.10.2025 (N<sub>2</sub>O 2024: 338,0 ppb; vorindustriell 270,1 ppb, also 12,5 % des vorindustriellen Niveaus). <https://wmo.int/publication-series/wmo-greenhouse-gas-bulletin-no-21> (letzter Abruf: Juni 2026)
- 17 Ravishankara, A. R.; Daniel, J. S.; Portmann, R. W. (2009): Nitrous Oxide (N<sub>2</sub>O): The Dominant Ozone-Depleting Substance Emitted in the 21st Century. Science 326, 123–125. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1176985> (letzter Abruf: Juni 2026)
- 18 Sutton, M. A. et al. (Hrsg.): The European Nitrogen Assessment. Cambridge University Press, 2011 (atmosphärische Stickstoffdeposition verurachte über zwei Drittel der europäischen Wälder mindestens 10 % Verlust der Pflanzenvielfalt). <https://www.cambridge.org/core/books/europe>

- 19 Das Montrealer Protokoll (1987) erfasst Lachgas nicht; vgl. Ravishankara et al. 2009 (DOI 10.1126/science.1176985).
- 20 Erisman, J. W. et al. (2008): How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geoscience* 1, 636–639, hier S. 637 (48 % der Weltbevölkerung 2008). DOI: <https://doi.org/10.1038/ngeo325> (letzter Abruf: Juni 2026)
- 21 International Energy Agency (IEA): Ammonia Technology Roadmap, Oktober 2021 (rund 70 % des Ammoniaks für Dünger; ~2 % des globalen Endenergieverbrauchs; direkte Emissionen ~450 Mt CO<sub>2</sub>/Jahr). <https://www.iea.org/reports/ammonia-technology-roadmap> (letzter Abruf: Juni 2026)
- 22 FAO: FAOSTAT Analytical Brief 68 – Inorganic fertilizers 2000–2021 (2023), Fig. 5: Mineraldünger-Agrarverbrauch pro Kopf 2021 – Afrika 5 kg, Asien 22 kg, Europa 32 kg, Amerika 55 kg, Ozeanien 79 kg. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/1e805298-3176-4081-a071-4e900a4b016b/content> (letzter Abruf: Juni 2026)
- 23 African Development Bank (AfDB): „African governments need to take urgent action on fertiliser shortages“, 2026 (rund 80 % des in Subsahara-Afrika genutzten Düngers werden importiert, oft zu höheren Preisen als in Europa wegen Fracht, Finanzierung und Logistik; der Ukraine-Krieg trieb die Preise zudem auf Rekordhöhen). <https://www.afdb.org/en/news-and-events/african-governments-need-to-take-urgent-action-fertiliser-shortages-92779> (letzter Abruf: Juni 2026)
- 24 Global shocks to fertilizer markets: Impacts on prices, demand and farm profitability. *Food Policy* (2024) / AGRA-Studie (höheres Dünger-zu-Mais-Preisverhältnis in Binnenländern wie Malawi und Sambia als in Küstenländern, beeinflusst durch Transport- und Logistikkosten). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030691922400201X> (letzter Abruf: Juni 2026)
- 25 FAO: FAOSTAT Analytical Brief 68 – Inorganic fertilizers 2000–2021 (2023): die niedrigen Werte in Afrika hängen mit Leistbarkeit und Verfügbarkeit zusammen sowie damit, dass teils auf traditionelle, mineraldüngerfreie Anbaumethoden und organischen Wirtschaftsdünger zurückgegriffen wird. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/1e805298-3176-4081-a071-4e900a4b016b/content> (letzter Abruf: Juni 2026)
- 26 Growing Africa / African Plant Nutrition Institute: The Impact of the Global Fertilizer Crisis in Africa (2022 verdoppelten sich die Düngerpreise in vielen Ländern wie Kenia, Uganda und Tansania zwischen 2020 und 2022). <https://growingafrica.pub/the-impact-of-the-global-fertilizer-crisis-in-africa/> (letzter Abruf: Juni 2026)
- 27 RMI (Rocky Mountain Institute): The Opportunity for Distributed Green Fertilizer in Africa, 2026 (verteilte, modulare grüne Ammoniakanlagen sind rund 1000-mal kleiner als klassische Haber-Bosch-Werke, können nah beim Abnehmer stehen und so Transportkosten und Zwischenhändleraufschläge begrenzen; geeignet u. a. für Kenia, Senegal, Namibia, Ruanda). <https://rmi.org/the-opportunity-for-distributed-green-fertilizer-in-africa/> (letzter Abruf: Juni 2026)
- 28 Techno-economic analysis of low-carbon ammonia and urea production in select African countries, *International Journal of Hydrogen Energy* (2025): der berechnete Preis für grünen Harnstoff in Kenia, Äthiopien und Nigeria liegt deutlich über dem von importiertem fossilem Harnstoff; bei realistischen Kapitalkosten (17 % WACC) kurzfristig nicht wettbewerbsfähig. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319925045513> (letzter Abruf: Juni 2026)
- 29 Diaz, R. J. & Rosenberg, R. (2008): Spreading Dead Zones and Consequences for Marine Ecosystems. *Science* 321 (5891), 926–929 (2008 mehr als 400 Systeme, über 245.000 km<sup>2</sup>; Verdopplung etwa pro Jahrzehnt seit den 1960ern). DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1156401> (letzter Abruf: Juni 2026)
- 30 Breitburg, D. et al. (2018): Declining oxygen in the global ocean and coastal waters. *Science* 359, eaam7240 (über 500 küstennahe Tote Zonen; über 700 Standorte eutrophierungsbedingter Hypoxie). DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aam7240> (letzter Abruf: Juni 2026)
- 31 Global Environment Facility (GEF): Reversal of a Dead Zone – Achieving the World’s First Reversal of a Dead Zone in the Black Sea (Stickstoff –20 %, Phosphor –50 %; Zahl der nachgewiesenen benthischen Arten verdoppelte sich 1980–2000). <https://www.thegef.org/newsroom/feature-stories/reversal-dead-zone-achieving-worlds-first-reversal-dead-zone-black-sea> (letzter Abruf: Juni 2026)
- 32 Andreas Böhm, 2022