

Für Mensch & Umwelt

Journalistenworkshop “Stickstoff – die unterschätzte Umweltgefahr”

Lebenswichtiger Problemstoff – Eine Einführung in die Stickstoffproblematik

Markus Geupel

Fachgebiet II 4.3 "Luftreinhaltung & terrestrische Ökosysteme"

Gliederung

- 1 STICKSTOFFFORMEN, BEGRIFFSDEFINITION**
- 2 BIOLOGISCHER STICKSTOFFKREISLAUF**
- 3 WIRKUNGEN DER VERBINDUNGEN DES STICKSTOFFS**
- 4 ANTHROPOGENE STICKSTOFFFIXIERUNG GLOBAL UND IN DEUTSCHLAND**
- 5 BESTEHENDE REGELUNGEN UND WARUM SIE NICHT AUSREICHEN**
- 6 INTEGRIERTE KONZEPTE**

Stickstoffformen, Begriffsdefinition



N_2 --- elementarer Stickstoff



Organischer Stickstoff

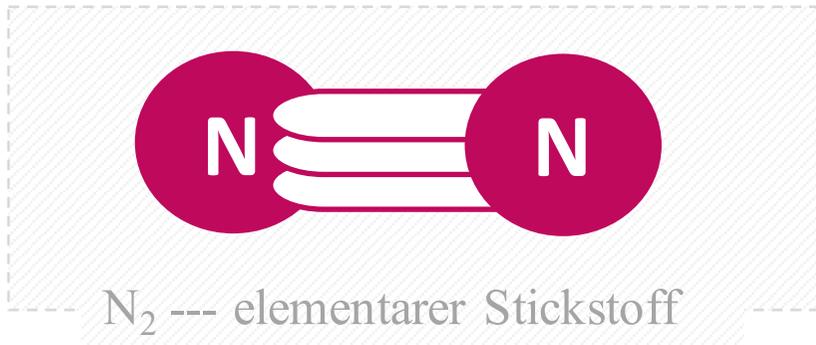
reaktive
Stickstoffverbindungen



NO_x --- oxidierter Stickstoff
 NH_y --- reduzierter Stickstoff

anorganischer Stickstoff

Stickstoffvorkommen, biologischer Stickstoffkreislauf, limitierender Faktor



Elementarer Stickstoff

- 78 % der Atmosphäre
- Stabile Dreifachbindung zwischen zwei Stickstoffatomen
- Sehr hoher Energieaufwand nötig, um die Dreifachbindung zu spalten
- Biologische Katalyse: NITROGENASE
- Hohe Energiezufuhr: BLITZSCHLAG
- Technisch: HABER-BOSCH

Stickstoffoxide

- Natürlich: BLITZSCHLAG
- Anthropogen: Verbrennungsprodukt
- Verkehr, Energie, Industrie

Reduzierter Stickstoff:

- Natürlich: Abbau org. Substanz (Ammonifikation), biologische N-Fixierung (Nitrogenase)
- Anthropogen: Haber-Bosch-Verfahren

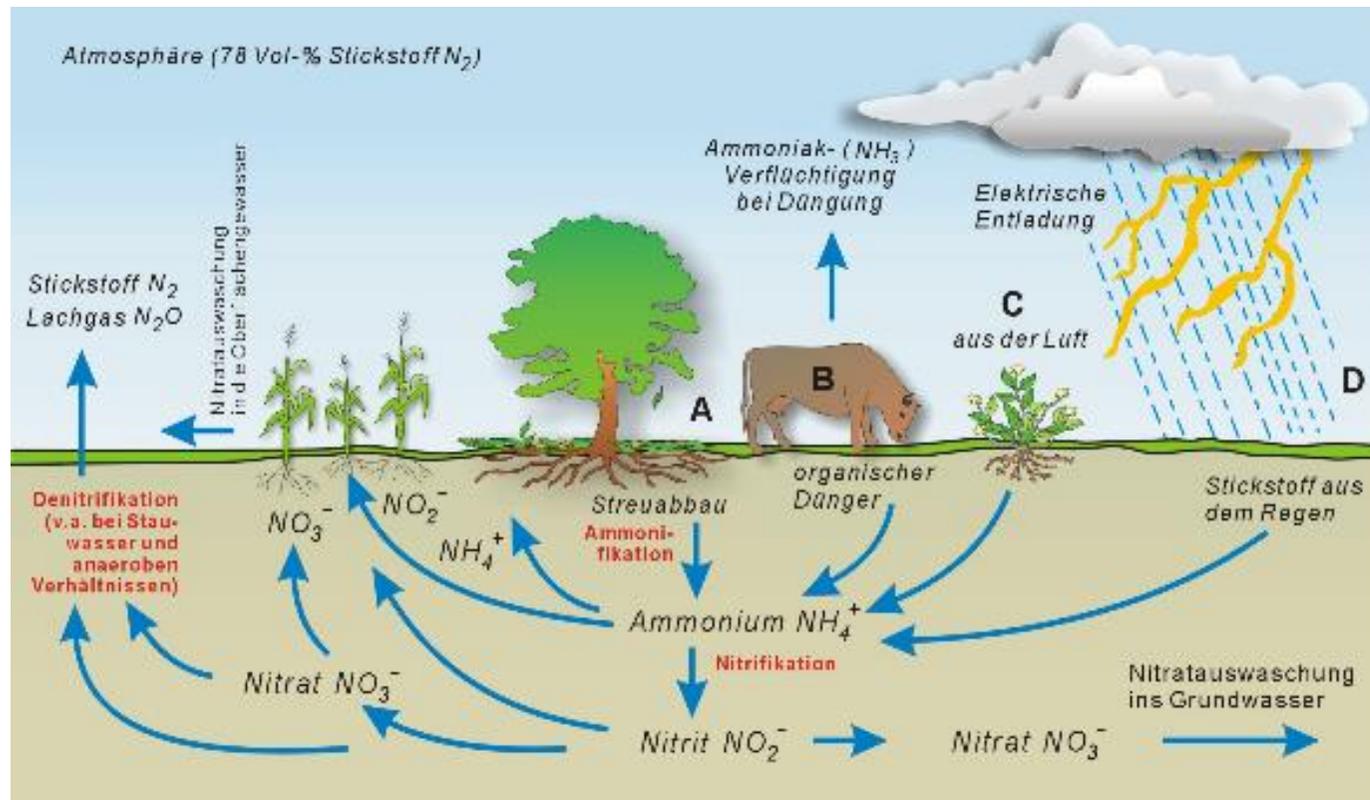
Nitrat

- Entsteht aus Stickstoffoxiden in der Atmosphäre
- Entsteht bei der Nitrifikation im Boden

Lachgas

- Nebenprodukt bei der Denitrifikation
- Adipinsäuresynthese

Stickstoffvorkommen, biologischer Stickstoffkreislauf, limitierender Faktor



Stickstoffkreislauf

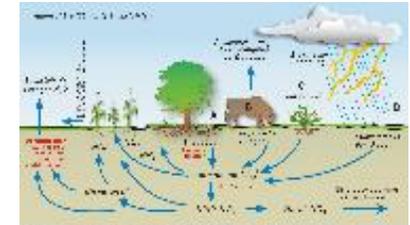
- Eng geschlossener Kreislauf
- Alle Lebewesen sind angewiesen auf Reaktiven Stickstoff
- Baustein in pflanzlichen und tierischen Proteinen (Eiweißen) und im Erbgut (DNA)
- Nährstoff
- Eingebaut in Lebewesen spricht man von organischem Stickstoff
- Der Körper eines Erwachsenen Menschen (Körpergewicht 70 kg) enthält 2 kg Stickstoff
- Effektive Nutzung von Reaktivem Stickstoff
- Die Natur kennt praktisch keine Verluste von reaktivem Stickstoff
- Frei werdender anorganischer Stickstoff wird praktisch sofort von Pflanzen für Wachstum aufgenommen
- Denitrifikation $NO_3^- \rightarrow N_2$ „Nitratatmung“ (Abbauleistung hängt u.a. vom Sulfidgehalt ab)
- N als Nährstoff limitierender Faktor in terrestrischen Systemen

Quelle: Lernort Boden, Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz 2006.

Limitierender Faktor: Nährstoff Stickstoff im Boden

NATÜRLICHE SYSTEME

- Auch in natürlichen oder semi-natürlichen Ökosystemen wird durch zusätzliche Stickstoffzufuhr ein zusätzliches Pflanzenwachstum erzielt
- Hier sind es nicht Kulturpflanzen, die gezielt von der zusätzlichen Stickstofffracht profitieren, sondern Pflanzen, die unter natürlichen Nährstoffbedingungen (weniger Stickstoff) weniger Konkurrenzstark wären
- Jede Pflanzenart hat eine ganz bestimmte Lieblingsmahlzeit – ein bestimmter Mix aus Nährstoffen, Licht, Temperatur und Feuchtigkeit
- Von zusätzlichem Stickstoff profitieren daher nur wenige Pflanzenarten durch gesteigertes Wachstum → Verdrängung von anderen Arten, die Stickstoff nicht so gerne mögen, bzw. auf eine ausgewogenere Ernährung achten
- Eutrophierung
- Der zusätzliche Stickstoff kommt meistens aus der Luft



Limitierendes Element: Eutrophierung durch Stickstoffeinträge Terrestrische Ökosysteme



[1] Heiden auf sandigen Böden (Calluna-Heiden)

Foto ©: Maren Meyer-Grünefeldt

[2] Halbtrockenrasen auf karbonatischem Untergrund

Foto ©: Bundesamt für Naturschutz

[3] Birken-Eichenwald feuchter bis frischer Standorte

Foto ©: Fabian Wankmüller



[4] Sandtrockenrasen

Foto ©: Robin Schmidt

GEFÄHRDUNGURSACHE

- Rote Liste Pflanzenarten, Standortveränderungen durch Nährstoffeinträge
- Rote Liste Biotoptypen, Standortveränderungen durch Nährstoffeinträge

Limitierendes Element: Eutrophierung durch Stickstoffeinträge Profiteure unter den Pflanzenarten



[1] Brennnessel (*Urtica dioica*)

Foto ©: Brennnessel at Burg Isenberg, Hattingen, Photo by Simplicius, 2004, GNU/FDL,

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Brennnessel.jpg>

[2] Dichter (untypischer)

Brombeerunterwuchs in Kiefernforst

Foto ©: Markus Geupel

[3] Dichter (untypischer)

Holunderunterwuchs in Kiefernforst

Foto ©: Gerhard Hofmann, Eberswalde

[4] Knoblauchsrauke

Foto ©: Knoblauchsrauke (*Alliaria petiolata*),
Fotografin: Anke Hüper, Karlsruhe,

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Knoblauchrauke01.jpg>

Limitierendes Element: Eutrophierung durch Stickstoffeinträge Meeres- und Küstenökosysteme



[1] Grünalgen auf Wattflächen an der Nordsee

Foto ©: Wera Leujak

[2] Schaumalgen am Nordseestrand

Foto ©: Wera Leujak

[3] In Folge von Sauerstoffmangel verendete Fische am Eckernförder Südstrand am 13.9.2017

Foto ©: Ivo Bobsien LLUR



FOLGEN DER EUTROPHIERUNG

- Algenwachstum
- Massenhafter Abbau von organischer Biomasse durch Bakterien
- Sauerstoffverbrauch
- Sauerstoffarme bzw. -freie Regionen
- Gefahr für Fische und andere Tiere

Direkte Umweltwirkungen durch Stickstoffverbindungen



- klimarelevantes Gas (GWP 265), trägt 6 % zum globalen Klimawandel bei
- Zerstörung der stratosphärischen Ozonschicht, hat mittlerweile die größte Rolle beim Abbau stratosphärischen Ozons übernommen



- Direkte toxische Wirkungen auf Blattorgane
- Indirekt durch Eutrophierung und Versauerung
- Critical Level $1 \mu\text{g m}^{-3}$ empfindliche Ökosysteme, $3 \mu\text{g m}^{-3}$ für höhere Pflanzen
- Trägt zur Feinstaubbildung bei (→ sekundärer Feinstaub)



- Gesundheitliche Wirkungen bei stark belastetem Trinkwasser (Säuglingsblausucht, Methämoglobinämie)
- 50 mg l^{-1}



- vermindert die Lungenfunktion und beeinträchtigt das Herz-Kreislauf-System, Reizung der Schleimhäute
- wichtigste Vorläufersubstanz für die Bildung von bodennahem Ozon
- Trägt zur Feinstaubbildung bei (→ sekundärer Feinstaub)
- Materialschäden als Salpetersäure (HNO3-)

Wie gelangt Stickstoff durch menschliches Handeln in die Umwelt?

REDUZIERTER STICKSTOFF: HABER-BOSCH-SYNTHESE

- Ammoniaksynthese bei hohem Druck, hohen Temperaturen und Eisenkatalysator
- industrieller Prozess entwickelt vor etwa 100 Jahren in Deutschland (Patent 1911, erster Reaktor 1913)
- 1- 2 % der globalen Energieproduktion bzw. 3 - 5 % der globalen Erdgasproduktion
- 160 Tg NH₃ im Jahr 2010
- Hauptproduzenten: China 32 %, Indien, 9 %, Russland 8 %, Deutschland < 2 %
- Grundlage für die Mineraldüngerproduktion (80 %) und die chemische Industrie (20%)
- Preis für Stickstoffdünger energiepreisabhängig: 0,5 - 0,6 € kg⁻¹ (2017)
- Mineraldüngerabsatz in Deutschland 2015/2016: 1.700 Gg



Hochdruck-Reaktor (Stahl) zur Ammoniak-Synthese nach dem Haber-Bosch-Verfahren. Erbaut 1921 von der Badischen Anilin- und Sodafabrik AG Ludwigshafen am Rhein. Aufgestellt auf dem Gelände der Universität Karlsruhe. © Drahrub https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ammoniak_Reaktor_BASF.jpg

Wie gelangt Stickstoff durch menschliches Handeln in die Umwelt

STICKSTOFFOXIDE

Endotherme Reaktion → hoher Energieaufwand erforderlich, um aus Stickstoff und Sauerstoff Verbindungspartner zu machen →

Verbrennung fossiler Energieträger

- Thermisches NO_x > 1000°, abhängig von Druck, Verweilzeit
 - Diesel, Benzin, Erdgas
- Brennstoff-NO_x
 - Braunkohle (80%), Steinkohle (ca.50%), Schweröl (ca. 50%)
- Biogenes NO_x
 - Landwirtschaftliche Mineral- und Wirtschaftsdüngeranwendung (10 % der gesamten NO_x Emissionen → übrigens nicht Berichterstattungspflichtig)

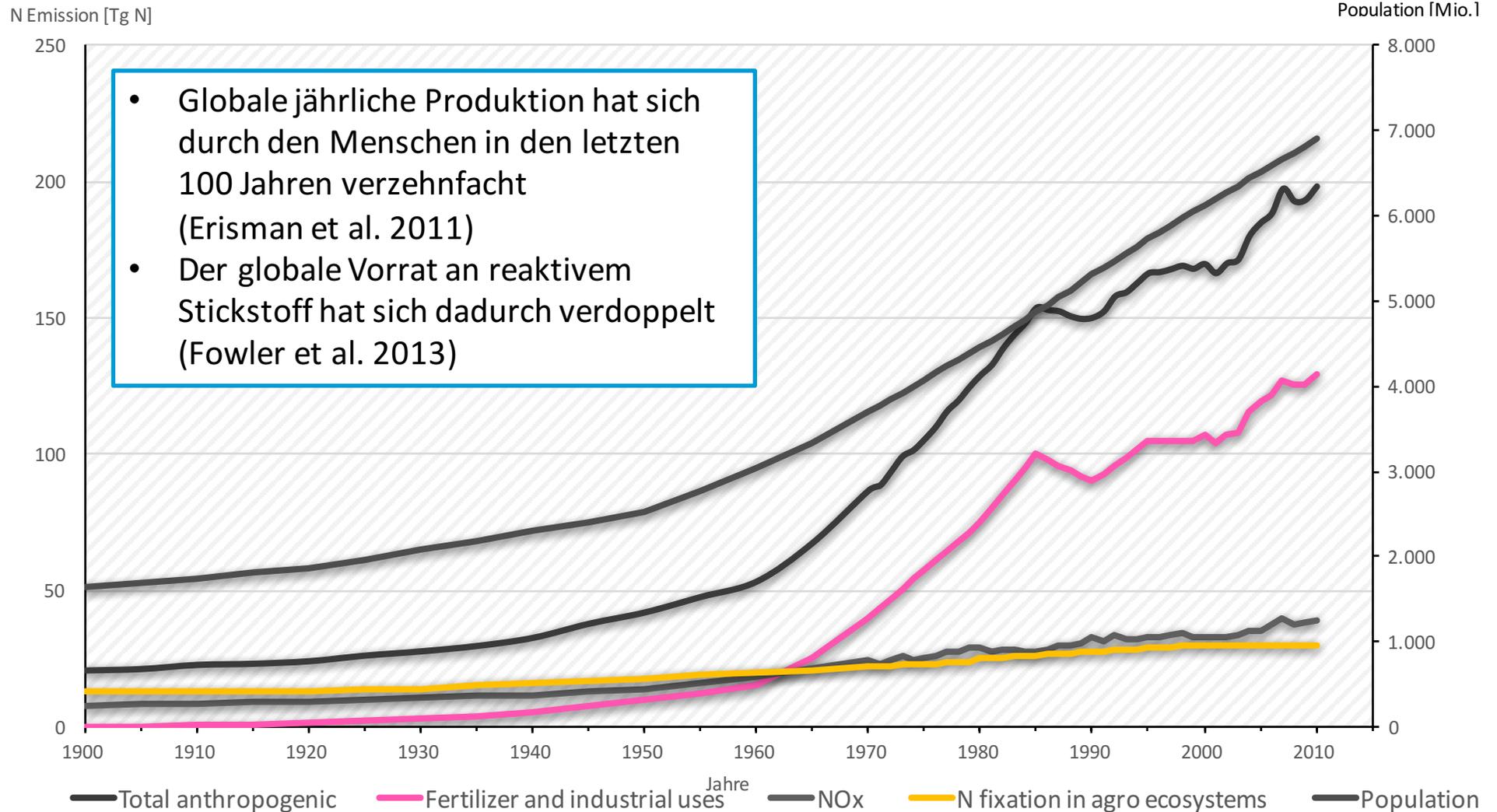
BIOLOGISCHE STICKSTOFFFIXIERUNG

- Anbau von Leguminosen
- Bakterien, die in Symbiose mit Pflanzenarten leben
- Nitrogenase zerlegt N₂ und formiert NH₄⁺
- Soja, Erbsen, Bohnen, Erdnüsse



Abgas-Emission bei
Fährschiffahrt durch
Schwerölverbrennung
© Markus Geupel

Wie gelangt Stickstoff durch menschliches Handeln in die Umwelt?

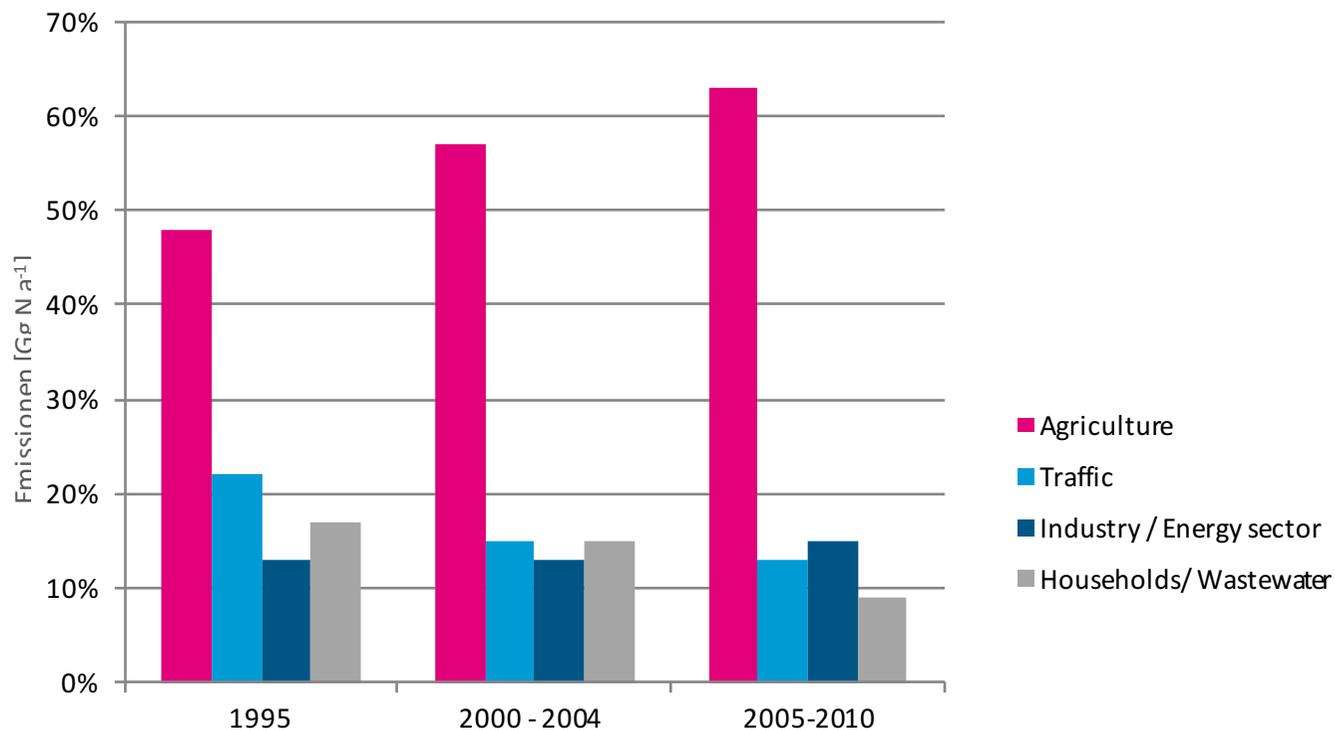


Fowler, D. et al. (2013) The global nitrogen cycle in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 368.

Erisman, J. W., et al. (2011). "Reactive nitrogen in the environment and its effect on climate change." *Current Opinion in Environmental Sustainability* 3: 281-290.

Die Stickstoffemissionen in Deutschland - Hauptverursacher

Entwicklung der Anteile der Hauptverursacher an den gesamten N-Emissionen



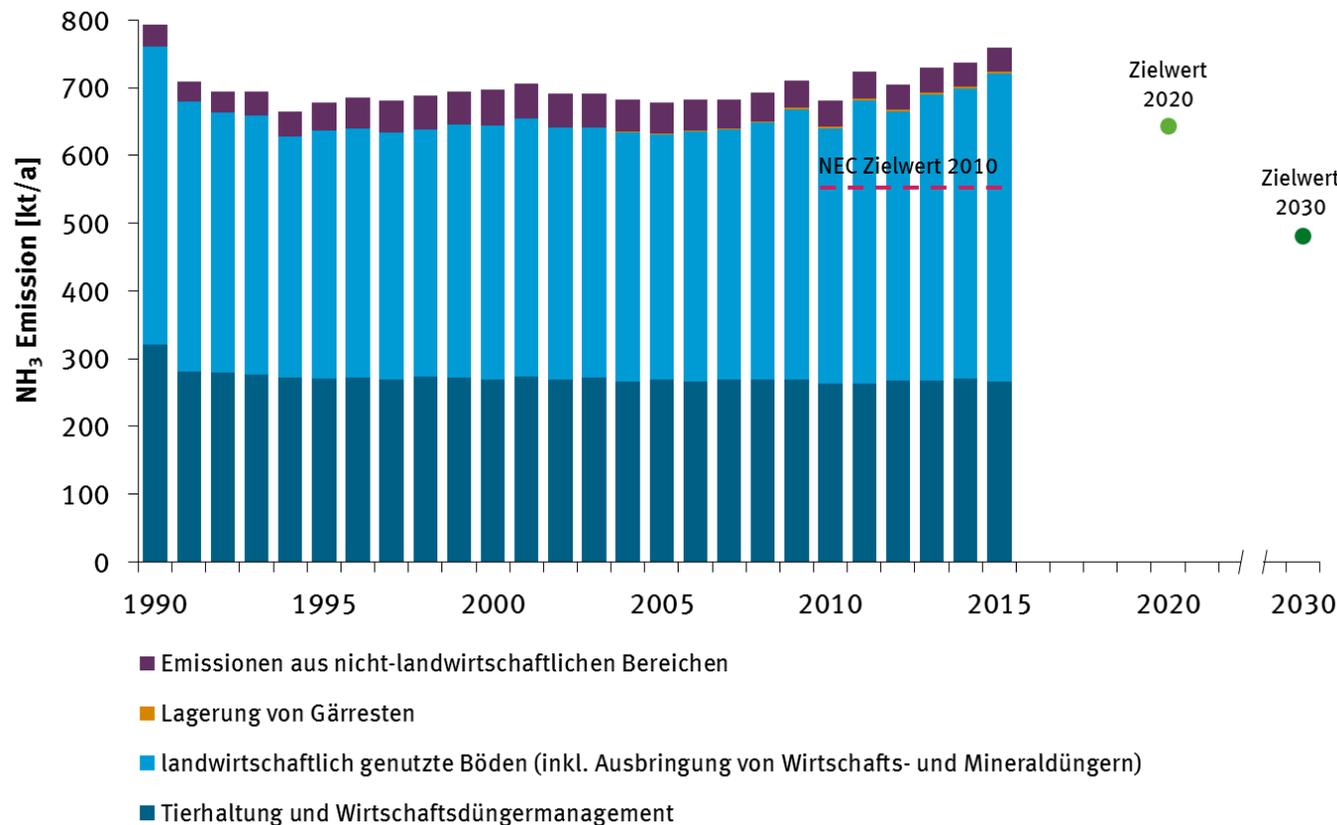
Die gesamten N-Emissionen in den vergangenen 20 Jahren sind rückläufig

Auch die Emissionen der Landwirtschaft sind rückläufig, wenn auch in geringerem Maße

Der Anteil der Landwirtschaft an den gesamten N-Emissionen in Deutschland hat in den vergangenen 20 Jahren deutlich zugenommen



Ammoniakemissionen in Deutschland seit 1990

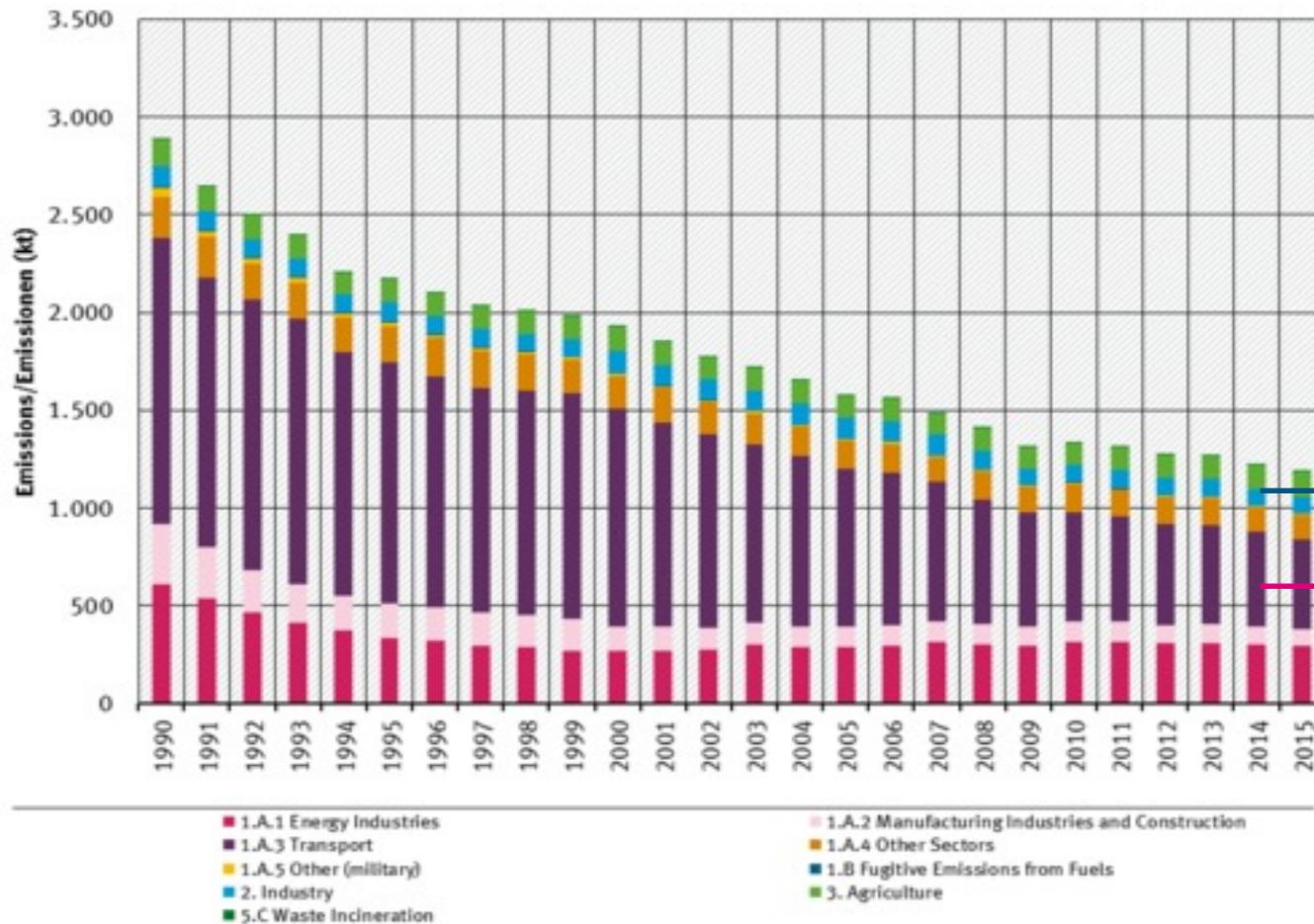


- 95 % entstehen in der Landwirtschaft
- NH₃ Emissionen sind tendenziell leicht gestiegen seit Anfang 1990er Jahre
- Verringerung der Emissionen aus der Tierhaltung wegen Rückgang der Rinderbestände.
- Steigerung der Emissionen aus Mineraldüngung wegen Zunahme an Harnstoffdünger
- Ziel der NEC-Richtlinie (550 kt) wurde deutlich verfehlt.
- Neue Zielwerte aus NERC-Richtlinie sind relative Reduzierungsverpflichtungen:
 - 2020: 5% gegenüber 2005
 - 2030: 29% gegenüber 2005

Stickstoffoxidemissionen in Deutschland seit 1990

Nitrogen Oxide / Stickstoffoxide

Emissions per Sector / Sektorale Emissionen



- 60 % Verminderung seit 1990
- 90 % Verbrennung von Brennstoffen
- Transportsektor (- 70 %) und Energieproduktion (-50%) sind die größten Emittenten

1051 kt seit 2010

- 65 % ab 2030 gegenüber 2005

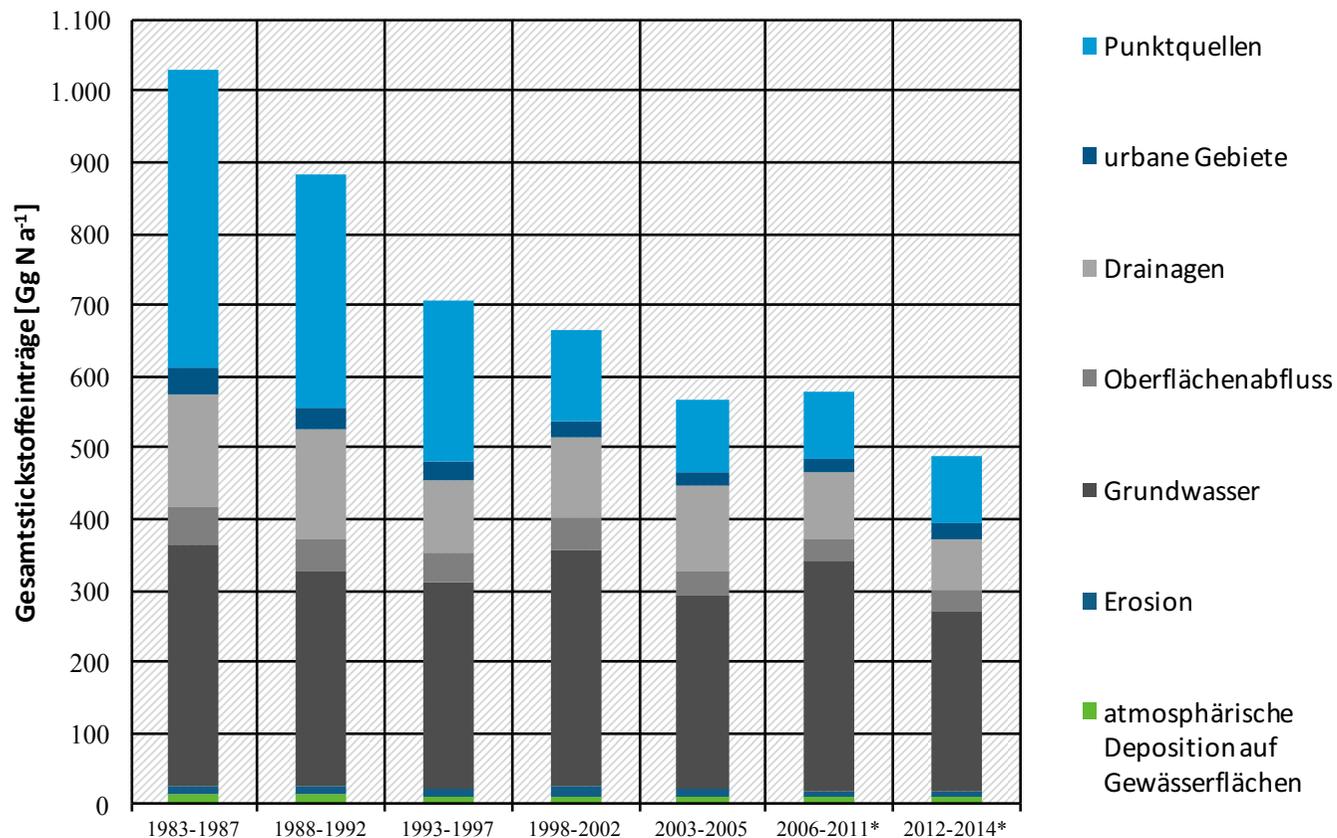
Quelle: German Emission Inventory (03.01.2017)

Stickstoffeinträge in Oberflächengewässer in Deutschland seit 1990

Stickstoffeinträge aus Punktquellen und diffusen Quellen in die Oberflächengewässer in Deutschland

- Deutlicher Rückgang bei den Punktquellen
- Kaum ein Trend bei den diffusen Einträgen
- Stickstoff verbleibt im Boden und Grundwasser auch wenn Landwirte sparsamer düngen

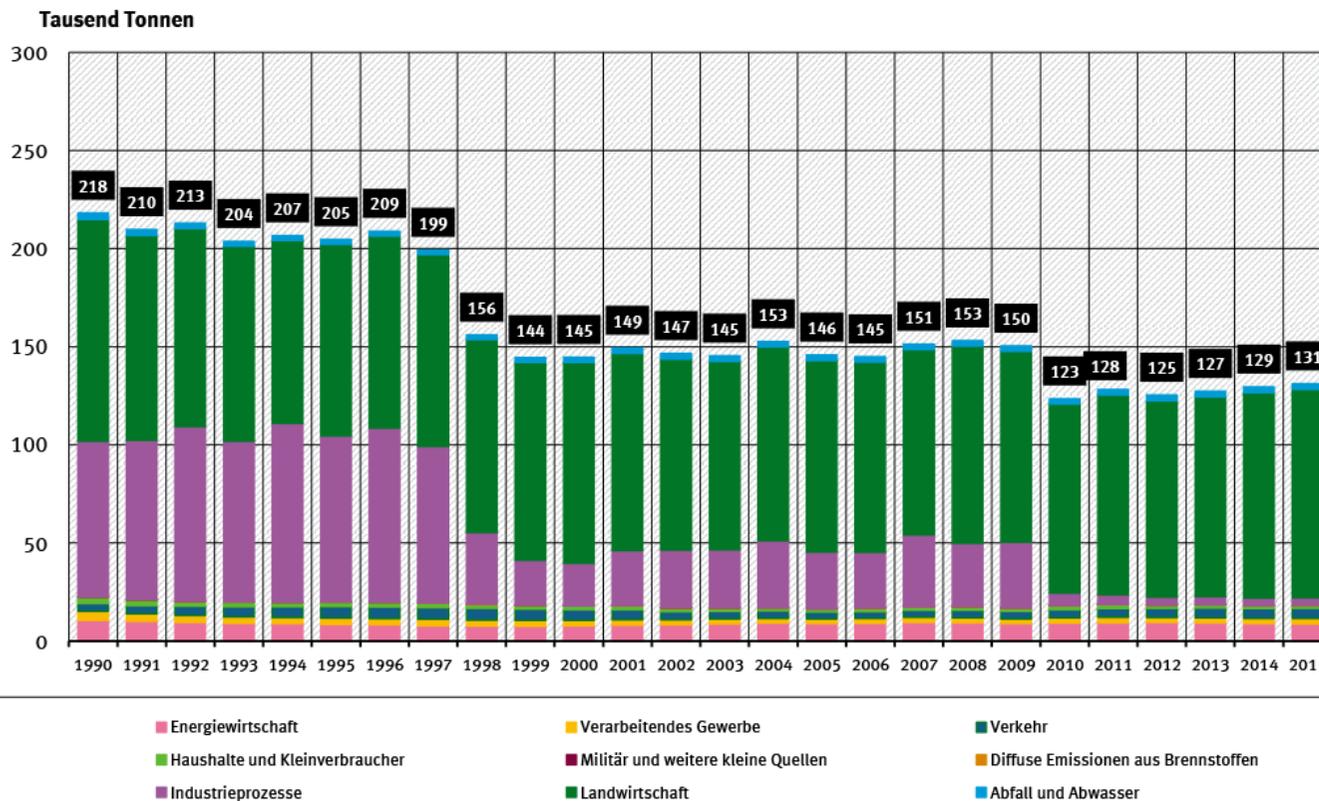
* zum Teil geändertes methodisches Vorgehen



Lachgasemissionen in Deutschland seit 1990

- -30 % seit 1990
- Rückgang wurde zu zwei Dritteln durch emissionsmindernde Maßnahmen im Bereich der Adipinsäureproduktion erreicht
- Hauptquellen für Distickstoffoxid-Emissionen sind stickstoffhaltiger Dünger in der Landwirtschaft und die landwirtschaftliche Tierhaltung.

Distickstoffoxid-Emissionen nach Kategorien

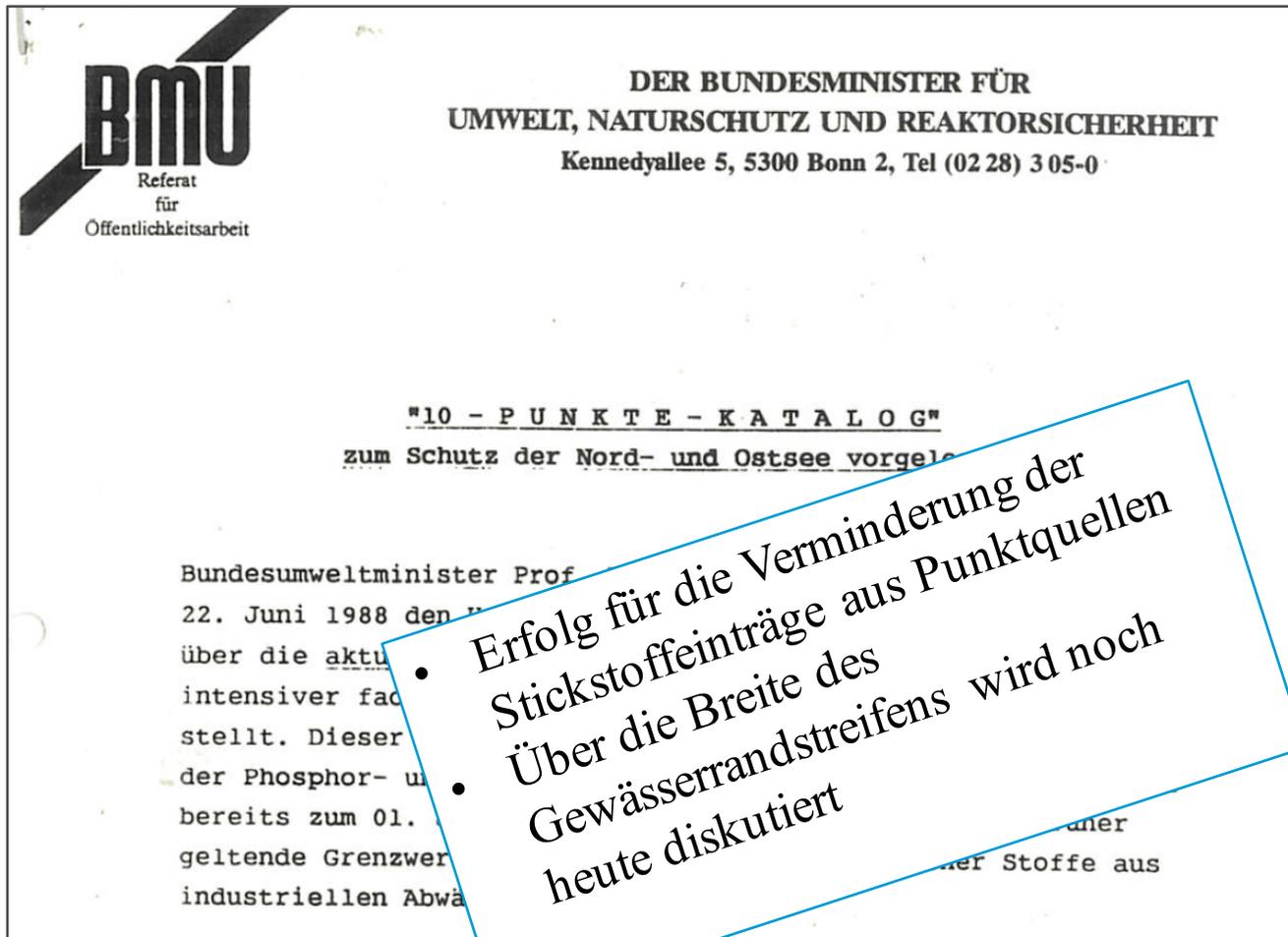


Emissionen ohne Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft
 Verkehr: ohne land- und forstwirtschaftlichen Verkehr
 Haushalte und Kleinverbraucher: mit Militär und weiteren kleinen Quellen (u.a. land- und forstwirtschaftlichem Verkehr)

Quelle: Umweltbundesamt, Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen seit 1990, Emissionsentwicklung 1990 bis 2015 (Stand 02/2017)

Welche Maßnahmen wurden bereits ergriffen

1988: TÖPFERS 10-PUNKTE PLAN



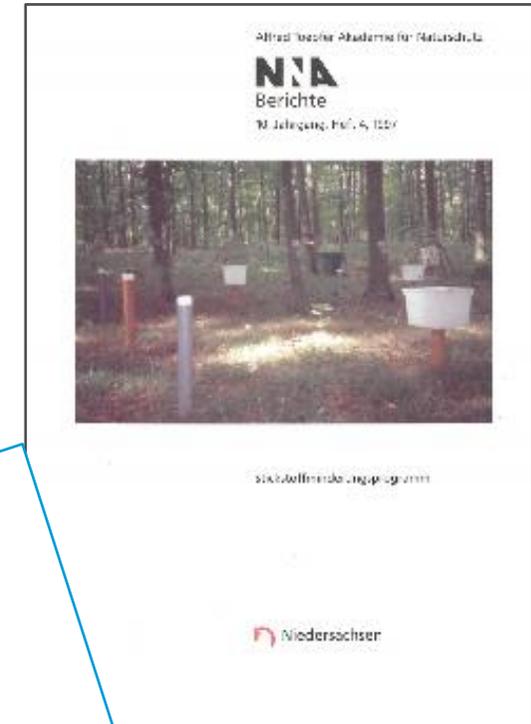
- 10-Punkte Katalog zum Schutz von Nord- und Ostsee; 22. Juni 1988
- Begrenzung der Stickstoffeinträge aus kommunalen Kläranlagen und industriellen Anlagen
- Herausnahme von Gewässerrandstreifen aus Düngung und Pflanzenbehandlung
- Novelle Abwasserabgabengesetz; Stickstoff 1994
- Beendigung der Dünnsäureverklappung
- Beendigung der Sonderabfallverbrennung auf der Hohe See
- Stärkung der ökologischen Meeresforschung
- Stärkung der Zusammenarbeit mit der DDR, der CSSR zur Bildung einer Elbe-Schutzkommission

Welche Maßnahmen wurden bereits ergriffen

1996: Stickstoffminderungsprogramm der UMK / AMK

- *"Die Umweltministerkonferenz sieht mit Sorge die zunehmende Eutrophierung der Umweltmedien Boden und Wasser sowie der Wälder."* 1993 beauftragte die UMK eine Arbeitsgruppe der Länder, *„Maßnahmen zur Minderung von Stickstoffeinträgen in die Umweltmedien unter Berücksichtigung der wichtigsten Quellen und Belastungen vorzuschlagen...“*.
- Beteiligung der AMK
- Veröffentlichung in der Reihe der „Alfred Töpfer Akademie Naturschutz“

- Der Bericht erlangte nie eine politische Verbindlichkeit
- Maßnahmenliste und Forschungsbedarf im Wesentlichen identisch mit aktuellen Forderungen (zumindest für den Bereich Landwirtschaft)



Welche Maßnahmen wurden bereits ergriffen

AKTUELLE EUROPÄISCHE VERPFLICHTUNGEN UND NATIONALE UMSETZUNG

- Nitratrichtlinie (91/676/EWG) → Düngepaket
- NEC-Richtlinie 2001/81/EG → 39. BImSchV
- NERC-Richtlinie 2016/2284 → Neue Verordnung geplant
- Luftqualitätsrichtlinie 2008/50/EG → 39. BImSchV
- Meeresstrategierahmenrichtlinie 2008/56/EG → Wasserhaushaltsgesetz
- Wasserrahmenrichtlinie 2000/60/EG → Wasserhaushaltsgesetz
- Kommunalabwasserrichtlinie → Abwasserverordnung
- Gewässerschutzrichtlinie 2006/11/EG → Wasserhaushaltsgesetz
- IED-Richtlinie → TA Luft
- FFH-Richtlinie → BNatSchG

- Europäische Rahmengesetzgebung mit meist ambitionierten stickstoffbezogenen Zielen
- Nationale Umsetzung erfolgt in vielen unterschiedlichen Rechtsbereichen
- Unzureichende Umsetzung in Deutschland
- Vertragsverletzungsverfahren: Nitratrichtlinie & Luftqualitätsrichtlinie (NO₂)
- Pilotverfahren: Wasserrahmenrichtlinie & NEC-Richtlinie (NH₃)

INTERNATIONALE VERPFLICHTUNGEN



- Multikomponentenprotokoll der Genfer Luftreinhaltekonvention
- Klimarahmenkonvention → Klimaschutzplan
- 9 Sustainable Development Goal mit Bezug zu Stickstoff → Nationale Nachhaltigkeitsstrategie

Warum greifen die ergriffenen Regelungen nicht (gut genug)?

- Kontrolldefizit, keine Sanktionen → z.B. Düngeverordnung
- Gegenläufige Interessen Umwelt- und Wirtschaftspolitik → z.B. Ausbau der Tierhaltung, z.B. TA Luft, z. B. Diesel-Skandal
- Pollution Swapping → z.B. Biomasseverordnung, z. B. Düngegesetzgebung (schnellere Einarbeitung), z.B. TA Luft (Abdeckung Güllelager)
- Fehlende Kohärenz auf nationaler Ebene → z.B. BNatSchG und BImSchG, z.B. Düngegesetzgebung und Wasserhaushaltsgesetz (Zielwerte zum Schutz der Meeres- und Küstenökosystem), z.B. Düngegesetzgebung oder TA Luft und übergeordnete Ziele der (Einhaltung Critical Loads & Critical Levels)
- Unterschiedliche Zeitliche Ebenen → nationale bzw. Länder-Umsetzung kann nicht mit den europäischen Anforderungen Schritt halten; zu langsam

Integrierte Stickstoffminderung

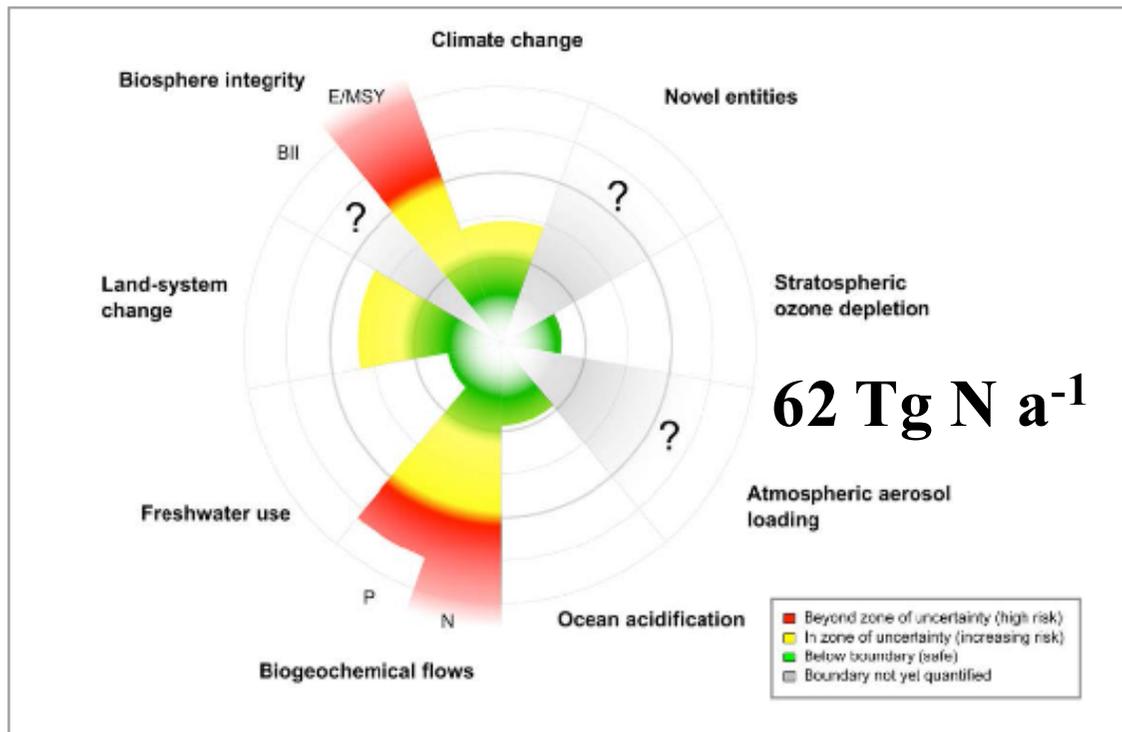
VORTEILE

- Wird dem Stickstoffkreislauf gerecht
- Abbau von Pollution Swapping
- Abbau von Kohärenzdefiziten
- Stärkung von Synergien
- Verminderung von gegenläufigen Entwicklungen die sich gegenseitig aufheben
- volkswirtschaftliche Optimierung
- Maßnahmenoptimierung
- Kommunikative Optimierung
- Gemeinsame Ziele (horizontale Integration & vertikale Integration)

Integrierte Stickstoffminderung im internationalen Rahmen

PLANETARE GRENZE FÜR GLOBALE STICKSTOFFFIXIERUNG

- Integriert über verschiedene Wirkungen und Verursacherbereiche
- Erleichtert die Kommunikation eines komplexen Problems
- Nicht einfach auf den nationalen Maßstab übertragbar



Steffen, W., et al. (2015). "Planetary Boundaries: Guiding human development on a changing planet." [ScienceExpress DOI: 10.1126/science.1259855](https://doi.org/10.1126/science.1259855).

De Vries, W., et al. (2013). "Assessing planetary and regional nitrogen boundaries related to food security and adverse environmental impacts." [Current Opinion in Environmental Sustainability 5\(3-4\): 392-402](https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.05.002).

Integrierte Stickstoffminderung im internationalen Rahmen

Task Force on Reactive Nitrogen (TFRN) der Genfer Luftreinhaltekonvention (CLRTAP) im Rahmen der UNECE

- Erarbeitet integrierte Lösungsansätze zur Politikberatung für die CLRTAP, z.B. European Nitrogen Assessment
- Handlungsempfehlungen werden teilweise auch von der EU in Richtlinien aufgenommen (z.B. Leitfaden zur Erstellung integrierter nationaler Stickstoffbilanzen im Rahmen der NERC-Richtlinie)

7. EU Umweltaktionsprogramm für die Zeit bis 2020 „Gut leben innerhalb der Belastbarkeitsgrenzen unseres Planeten“

- „den gesamten Stickstoffkreislauf nachhaltig und ressourceneffizient regeln“

International Nitrogen Initiative (INI)

- Globales Wissenschafts-Netzwerk
- Optimierung des positiven Stickstoffnutzen in Nahrungsmittelproduktion und Energieumwandlung bei gleichzeitiger Minimierung der negativen Auswirkungen auf die Gesundheit und die Umwelt
- Reihe Globale Konferenzen im Drei-Jahres Rhythmus → 2020 auf Einladung von BMUB und UBA in Berlin: „Nitrogen and the Sustainable Development Goals“

International Nitrogen Management System (INMS)

- Globale, UN Environment gefördertes Projekt zur Vorbereitung eines „Global Nitrogen Assessment“

Integrierte Stickstoffminderung auf nationaler Ebene

- **1996: Stickstoffminderungsprogramm**
- **2009: Integrierte Stickstoffminderungsstrategie des Umweltbundesamtes**
- **2015: Lösungsstrategien für ein drängendes Umweltproblem (SRU)**
- **2015: Reaktiver Stickstoff in Deutschland (UBA)**
- **2017: Stickstoffeintrag in die Biosphäre (Erster Stickstoffbericht der Bundesregierung)**



Integrierte Stickstoffminderung auf nationaler Ebene

FAZIT und AUSBLICK

- Stickstoffkreislauf komplexes System, viele Verursacher, viele Wirkungen
- Einzelne Aspekte konnten hier in diesem Vortrag nicht angesprochen werden (Belastungssituation, Konsumer-Perspektive)
- Gegenwärtige Regelungen Vielseitig aber nicht ausreichend aufeinander abgestimmt
- Integration bringt Vorteile gegenüber sektoraler Behandlung
- UBA wird im Rahmen von Forschungsprojekten weiterhin an Grundlagen für einen integrierten Ansatz arbeiten
- Zweiter Stickstoff-Bericht der Bundesregierung?

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Markus Geupel

markus.geupel@uba.de

www.umweltbundesamt.de/themen/luft/wirkungen-von-luftschadstoffen/wirkungen-auf-oekosysteme/reaktiver-stickstoff-in-der-umwelt