

# Reaktiver Stickstoff in Deutschland

Ursachen, Wirkungen, Maßnahmen



## Kurzfassung

- ▶ Stickstoff und seine Verbindungen verhalten sich in der Umwelt sehr unterschiedlich: Während Luftstickstoff praktisch inert ist, sind die oxidierten (z. B. Stickstoffoxide und Lachgas) und reduzierten Verbindungen (z. B. Ammoniak) reaktiv. Je nach Verbindung und Konzentration können sie entweder lebenswichtige Nährstoffe oder auch gefährliche Schadstoffe sein. Daher spricht man in der Umweltdiskussion auch vom reaktiven Stickstoff.
- ▶ Der Mensch hat den natürlichen Stickstoffkreislauf in den letzten gut 100 Jahren massiv verändert; die Menge reaktiven Stickstoffs in der Umwelt hat dadurch insgesamt dramatisch zugenommen. Die Verteilung ist allerdings global sehr uneinheitlich: in einigen Teilen der Welt, z. B. dem tropischen Afrika, stellt die Nährstoffverarmung der Böden ein massives Problem dar und führt dazu, dass die landwirtschaftlichen Erträge weit unter ihrem Potential bleiben.
- ▶ In Deutschland gelangen jährlich etwa 4,2 Millionen Tonnen reaktiven Stickstoffs in den Stickstoffkreislauf. Dies entspricht etwa 50 kg pro Person. Rund 6 kg werden pro Person und Jahr in Form von Lebensmitteln konsumiert. Der Rest ist in Produkten gebunden oder entweicht ungenutzt in die Umwelt.
- ▶ Die übermäßige Freisetzung reaktiver Stickstoffverbindungen in die Umwelt führt zu einer Reihe von Problemen, die dringend gelöst werden müssen. Dazu gehören der Verlust von aquatischer und terrestrischer Biodiversität, eine Beeinträchtigung der Luftqualität, die erhöhte Freisetzung von Klimagasen und eine erschwerte Nutzung des Grundwassers als Trinkwasser.
- ▶ In der Vergangenheit konnte eine deutliche Minderung der Stickstoffemissionen aus Industrie, Energiewirtschaft, Verkehr und der Abwasserbehandlung erreicht werden.
- ▶ Weit weniger erfolgreich sind die Minderungen bisher in der Landwirtschaft. Ihr Anteil an den deutschen Stickstoffemissionen beträgt mittlerweile gut 60 Prozent.
- ▶ Um eine wesentliche Verbesserung für die Umwelt einzuleiten, sollte daher das in der Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung vereinbarte Ziel für den im Überschuss eingesetzten Stickstoff in der Landwirtschaft fortgeschrieben werden. Das Umweltbundesamt empfiehlt, bis 2040 einen Stickstoffüberschuss von 50 kg pro Hektar und Jahr anzustreben.
- ▶ Die Düngeverordnung ist dabei ein wesentliches Instrument, um die Stickstoffverluste aus der Landwirtschaft in die Umwelt zu reduzieren. Sie wird aktuell überarbeitet, um den ökologischen Anforderungen zu genügen. Durch zusätzliche Maßnahmen im landwirtschaftlichen Sektor sind weitere Minderungen möglich.
- ▶ Ein wichtiger Beitrag, den Stickstoffkreislauf wieder ins Gleichgewicht zu bringen, ist auch die Veränderung des Konsumentenverhaltens, z. B. können durch einen reduzierten Konsum tierischer Eiweiße oder die Vermeidung von Lebensmittelabfällen Stickstoffverluste vermindert werden.

# Inhaltsverzeichnis

1. Reaktiver Stickstoff – des Guten zuviel?	4
2. Negative Auswirkungen des intensivierten Stickstoffkreislaufs	7
2.1 Gefährdung der biologischen Vielfalt	7
2.2 Gefährdung der Luftqualität	8
2.3 Gefährdung der Wasserqualität	9
2.4 Klimaänderung	10
2.5 Wirkungen auf Materialien	12
2.6 Ökonomische Auswirkungen	13
3. Handlungsbedarf und politische Strategien	14
4. Der deutsche Stickstoffkreislauf	19
4.1 Bilanzierung der Stickstoffflüsse in Deutschland (2005 – 2010)	19
4.2 Vergleich des nationalen Kreislaufs mit der europäischen und globalen Skala	22
4.3 Die Emissionen reaktiven Stickstoffs in die Umwelt	22
4.4 Zeitliche Änderung wichtiger Emissionen	23
5. Maßnahmen und Handlungsempfehlungen	26
5.1 Landwirtschaftspolitik	26
5.2 Luftreinhaltepolitik	33
5.3 Gewässerschutz	33
5.4 Energiewirtschaft und Kleinfeuerung	34
5.5 Industrie	35
5.6 Verkehr	35
5.7 Siedlungswasserwirtschaft	36
5.8 Der Einfluss der Verbraucher	36
6. Die globale Dimension	39
7. Schlussfolgerung und Ausblick	40
 Anhang 1:	
Stickstoffmenge, Bezugszeitraum und Referenz zu den einzelnen Stickstoffflüssen in Kapitel 4	42
 Anhang 2:	
Neuer Zielwert für den Stickstoffüberschuss	44
 Literatur	46

# 1. Reaktiver Stickstoff – des Guten zu viel?

Stickstoff (N) ist ein Verwandlungskünstler: Ein Großteil liegt gasförmig und in einer elementaren Form vor, die kaum reagiert und unsere Luft erfreulich reaktionsträge macht. Ganz anders verhält es sich mit seinen Verbindungen, sie zählen zum sogenannten reaktiven Stickstoff. Die reaktiven Stickstoffverbindungen können sowohl lebenswichtige Nährstoffe, als auch gefährliche Schadstoffe sein (Box 1).

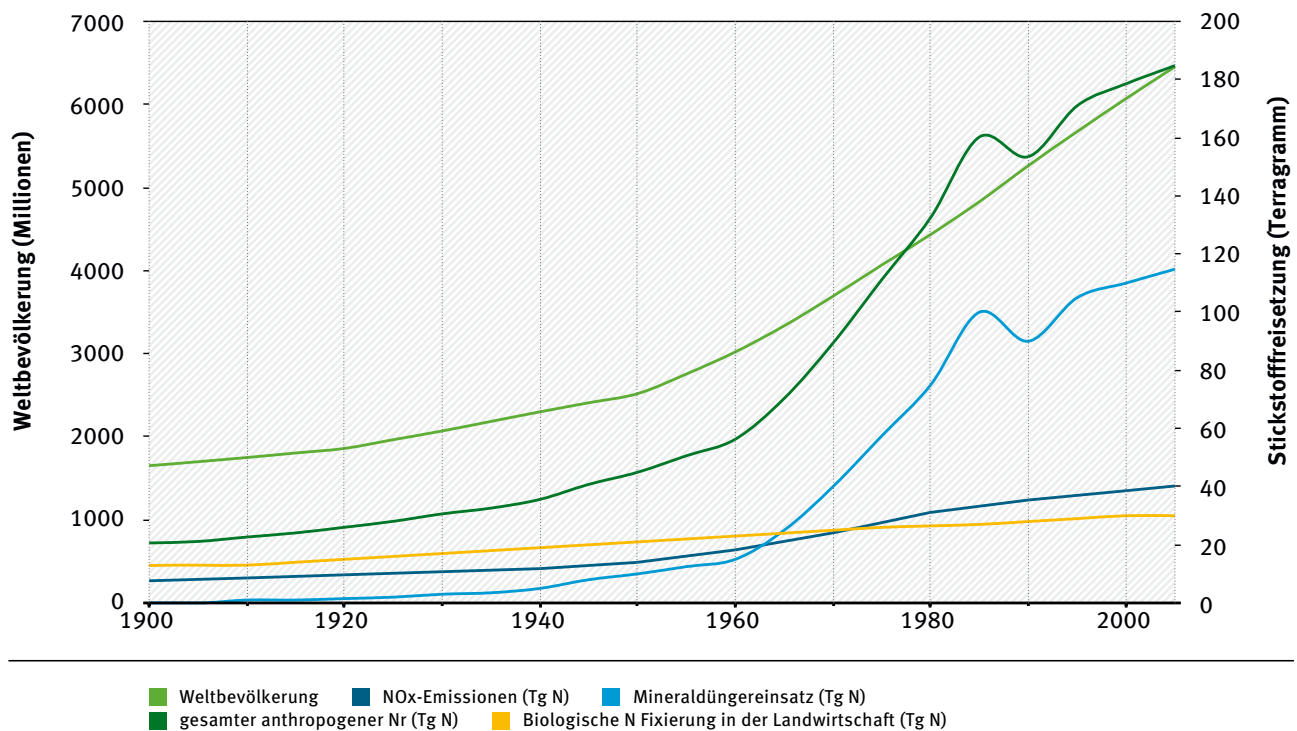
Der Mensch hat die Umwandlung des trägen Luftstickstoffs in den reaktiven Stickstoff im Laufe der vergangenen gut 100 Jahren mehr als verdoppelt (Abb. 1a), in Europa sogar vervierfacht. Dies geschah entweder gezielt, um z. B. Düngemittel herzustellen und damit die Ernährung einer wachsenden Weltbevölkerung zu gewähr-

leisten, oder als unbeabsichtigtes Nebenprodukt bei der Verbrennung von Treib- oder Brennstoffen.

Neben dem gewünschten Effekt der Steigerung der landwirtschaftlichen Produktion, führt der intensivierte Stickstoffkreislauf heute zu vielen negativen Umweltwirkungen (Galloway et al., 2003). Nach Rockström et al. (2009) sind die globalen Belastungsgrenzen der Ökosysteme durch die anthropogene Beeinflussung dieses Kreislaufes mittlerweile eindeutig überschritten (Abb. 1b). Internationale Wissenschaftler empfehlen daher, die Umwandlung von Luftstickstoff in reaktiven Stickstoff deutlich zu reduzieren (Rockström et al., 2009, Fowler et al., 2013). Die konkrete Ableitung eines Zielwerts, der sowohl die Ernährungssicherung als auch die Einhaltung ökologischer Leit-

Abbildung 1a

## Entwicklung des weltweit durch menschliche Aktivitäten produzierten reaktiven Stickstoffs (als Mineraldünger, biologisch fixiert oder in Form von Stickstoffoxiden aus Verbrennungsprozessen)



nach Galloway et al., 2003

planken gewährleistet ist noch in der Diskussion. Neuere Arbeiten gehen davon aus, dass die Umwandlung von Luftstickstoff in reaktiven Stickstoff global auf rund die Hälfte ihres derzeitigen Wertes begrenzt werden sollte (De Vries et al., 2013). Dementsprechend nennt auch die Enquete-Kommission „Wachstum, Wohlstand, Lebensqualität“ des deutschen Bundestages, in ihrem Abschlussbericht (Deutscher Bundestag, 2013) einen nachhaltigen, weniger intensiven Stickstoffkreislauf als ein wesentliches Ziel.

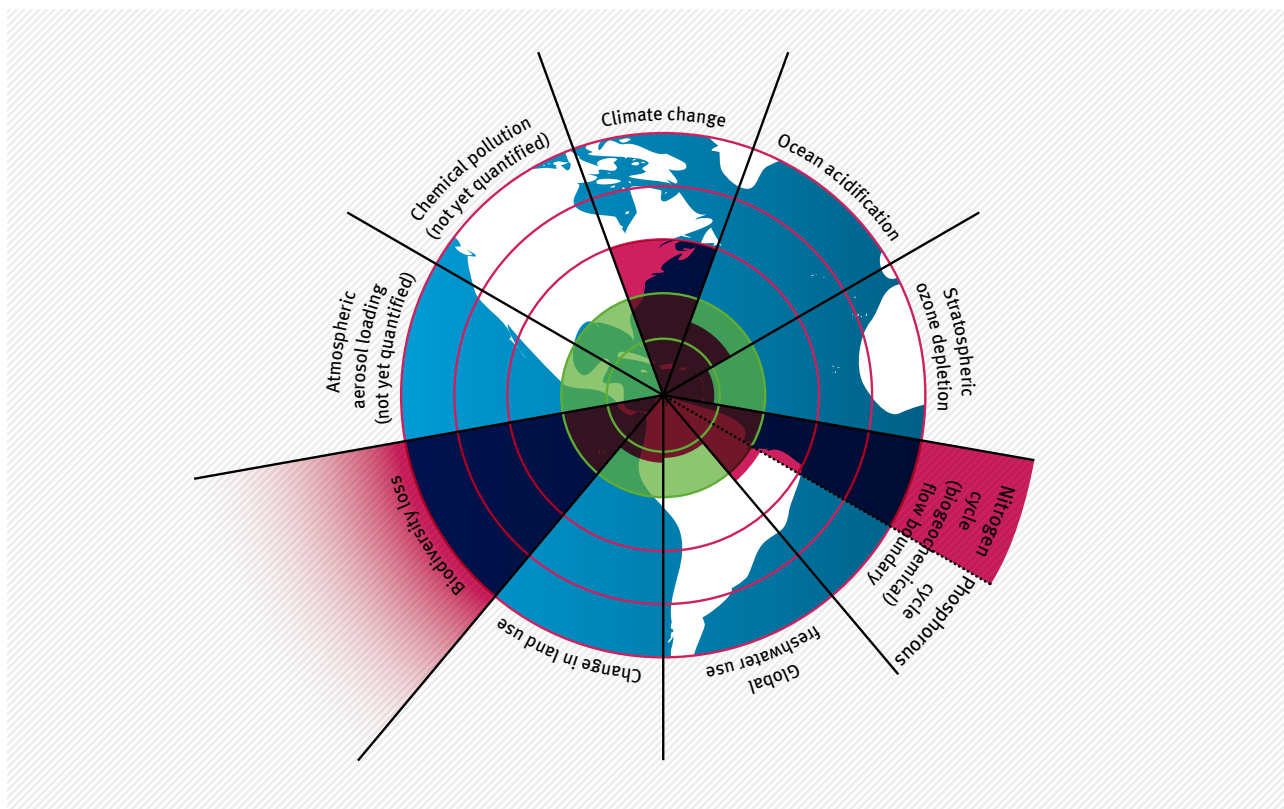
Im Folgenden werden daher der Stickstoffkreislauf in Deutschland und seine Auswirkungen analysiert. Auf Basis der Ergebnisse wird aufgezeigt, welche Möglichkeiten sich bieten, um die negativen Auswirkungen abzuschwächen.

Einen umfassenden Überblick über die Stickstoffflüsse in Deutschland, deren Auswirkungen und mögliche Minderungsmaßnahmen enthält der Bericht des Umweltbundesamtes (UBA) „Integrierte Strategie zur Minderung von Stickstoffemissionen“ (UBA, 2009a und b), auf den die vorliegende Veröffentlichung aufbaut. Eine weitere wichtige Grundlage sind die Abschlussberichte der internationalen Untersuchungen zum Stickstoffkreislauf auf europäischer und globaler Ebene (Sutton et al., 2011, Sutton et al., 2013).

Abbildung 1b

## Schematische Darstellung der Grenzen der Belastbarkeit der Erde (grüner Bereich) in neun Bereichen

Für den Bereich des Verlustes an biologischer Vielfalt, des Klimawandels und des Stickstoffkreislaufs (der auch auf die anderen Bereiche auswirkt) sehen die Autoren die Grenzen bereits als deutlich überschritten an (Azote Images/Stockholm Resilience Centre)



Rockström et al. (2009)

## Reaktiver Stickstoff und die Stickstoffkaskade

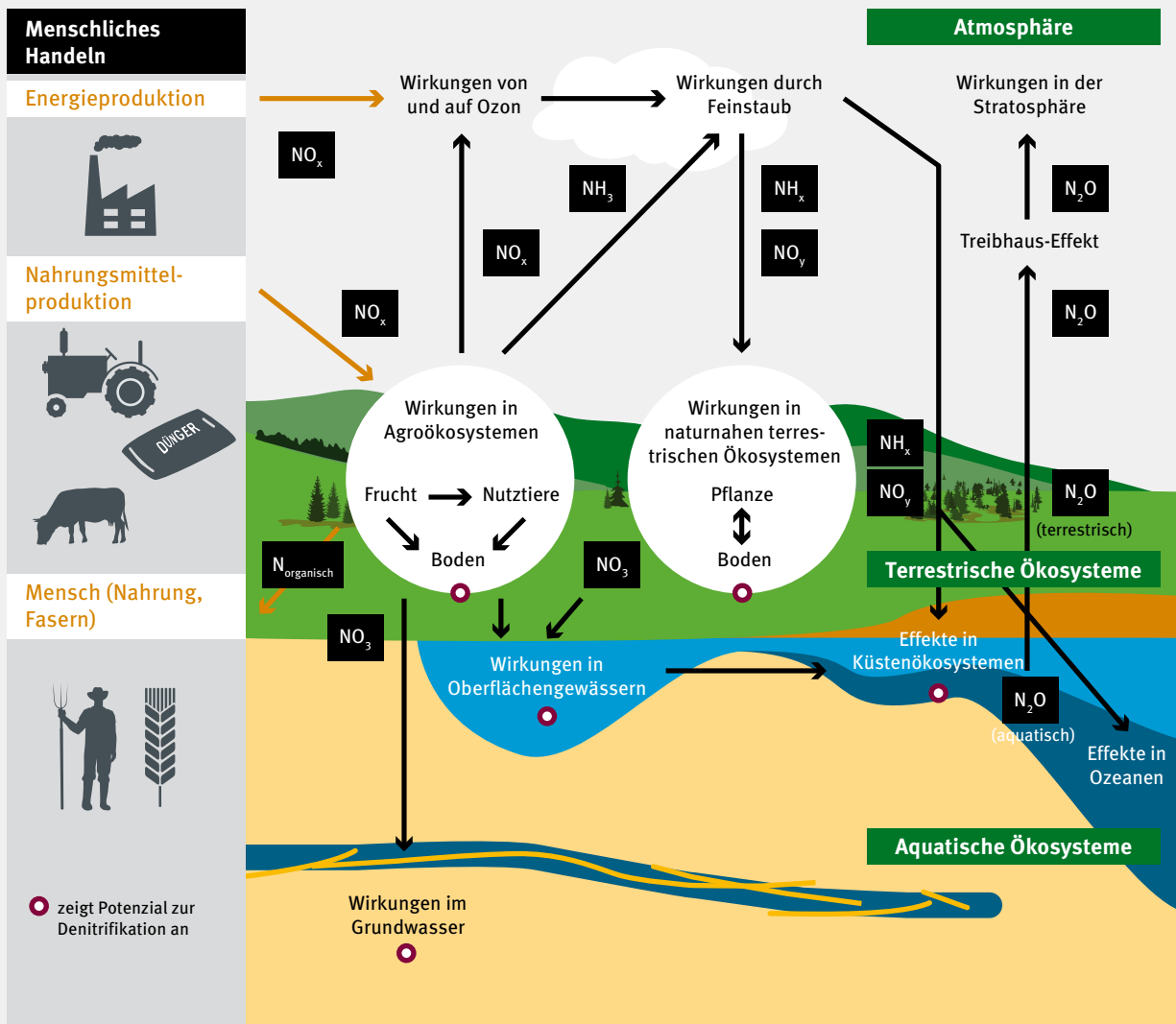
Zum reaktiven Stickstoff zählen u. a. folgende Verbindungen:

**Oxidisierte anorganische Stickstoffverbindungen:** Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ), Nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) und Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ )

**Reduzierte anorganische Stickstoffverbindungen:** Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) und Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ )

**Organisch gebundener Stickstoff ( $\text{N}_{\text{org}}$ ):** vor allem in Eiweißen (Aminosäuren) lebender und abgestorbener Organismen

Einmal aus der elementaren Form in reaktiven Stickstoff überführt, kann ein Stickstoffatom nacheinander in unterschiedlichen Bindungsformen ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_y$ ,  $\text{N}_{\text{org}}$ ) an unterschiedlichen Orten und in unterschiedlichen Umweltbestandteilen (Luft, Boden, Wasser, Vegetation, Fauna einschließlich Menschen) seine Wirkungen entfalten. Man spricht in diesem Zusammenhang von der Stickstoffkaskade (Galloway et al., 2003).



nach Galloway et al., 2003

## 2. Negative Auswirkungen des intensivierten Stickstoffkreislaufs

Der intensivierte Stickstoffkreislauf führt in verschiedenen Umweltbereichen zu negativen Auswirkungen (UBA, 2011). Im Folgenden soll ein kurzer Überblick gegeben werden. Vertiefte Informationen zu den einzelnen Aspekten finden sich in der angegebenen Literatur. Daneben wird dargestellt, wie sich die Situation voraussichtlich bis 2020 bzw. 2030 entwickeln wird, wenn keine weiteren Maßnahmen ergriffen werden.

### 2.1 Gefährdung der biologischen Vielfalt

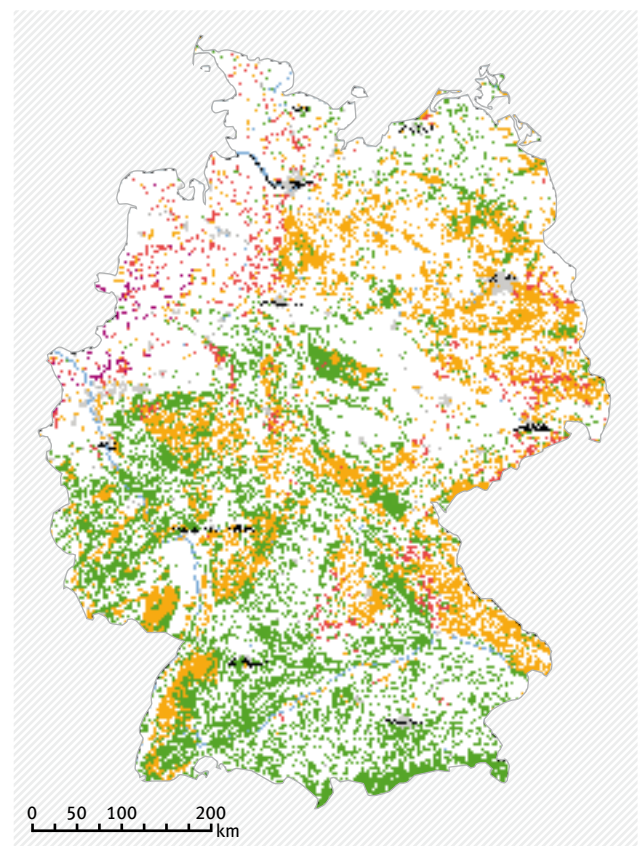
Der erhöhte Eintrag von reaktivem Stickstoff kann zur Destabilisierung von Ökosystemen und einer Verdrängung empfindlicher Arten führen. Nährstoffliebende, schnell wachsende Pflanzen nehmen anderen Licht und Platz für Wachstum und Verbreitung. Derartige Veränderungen sind aufgrund der zeitlichen Verzögerung oftmals nicht direkt und sofort wahrnehmbar. Fast die Hälfte der Pflanzenarten der „Roten Liste“ ist durch erhöhte Nährstoffeinträge gefährdet (Bundesamt für Naturschutz (BfN), 2004 und 2012). Zusätzlich wird die Anfälligkeit vieler Pflanzen gegenüber weiteren Stressfaktoren (z. B. Frost, Dürre oder Herbivorie) durch erhöhte Stickstoffverfügbarkeit gesteigert (Bobbink et al., 2010). Weltweit gilt der Stickstoffeintrag als einer der fünf Hauptgründe für die Gefährdung der biologischen Vielfalt (Sala et al., 2000). Eine negative Beeinträchtigung kann nur dann sicher ausgeschlossen werden, wenn die Einträge unter den ökologischen Belastungsgrenzen, den sogenannten Critical Loads für Eutrophierung (Überdüngung) liegen (Abb. 2). Auch die Versauerung von Ökosystemen wird in Europa mittlerweile v. a. durch den Eintrag reaktiver Stickstoffverbindungen verursacht. In der nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt der Bundesregierung (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), 2007) wurde deshalb als Ziel vereinbart, die Nährstoffeinträge bis 2020 soweit zu senken, dass die Critical Loads auf allen empfindlichen Flächen eingehalten werden. Dies ist derzeit nur auf rund der Hälfte der Flächen der Fall.

Reaktive Stickstoffverbindungen sind überdies für die Bildung von bodennahem Ozon verantwortlich. Boden-

Abbildung 2

### Überschreitung der ökologischen Belastungsgrenzen (Critical Loads) für Eutrophierung durch den aktuellen Stickstoffeintrag in Landökosystemen für das Jahr 2009

Bei einer Unterschreitung dieser Grenzen sind nach derzeitigem Wissen auch langfristig keine negativen Beeinträchtigungen der terrestrischen Biodiversität zu erwarten



**CL<sub>nut</sub> N Überschreitung [kg N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>]**

■ keine Überschreitung: 52,4%    ■ ≤ 10: 41,0%    ■ 10–20: 6,0%    ■ > 20: 0,6%

UBA-Projekt PINETI-2, FKZ 3712 63 240

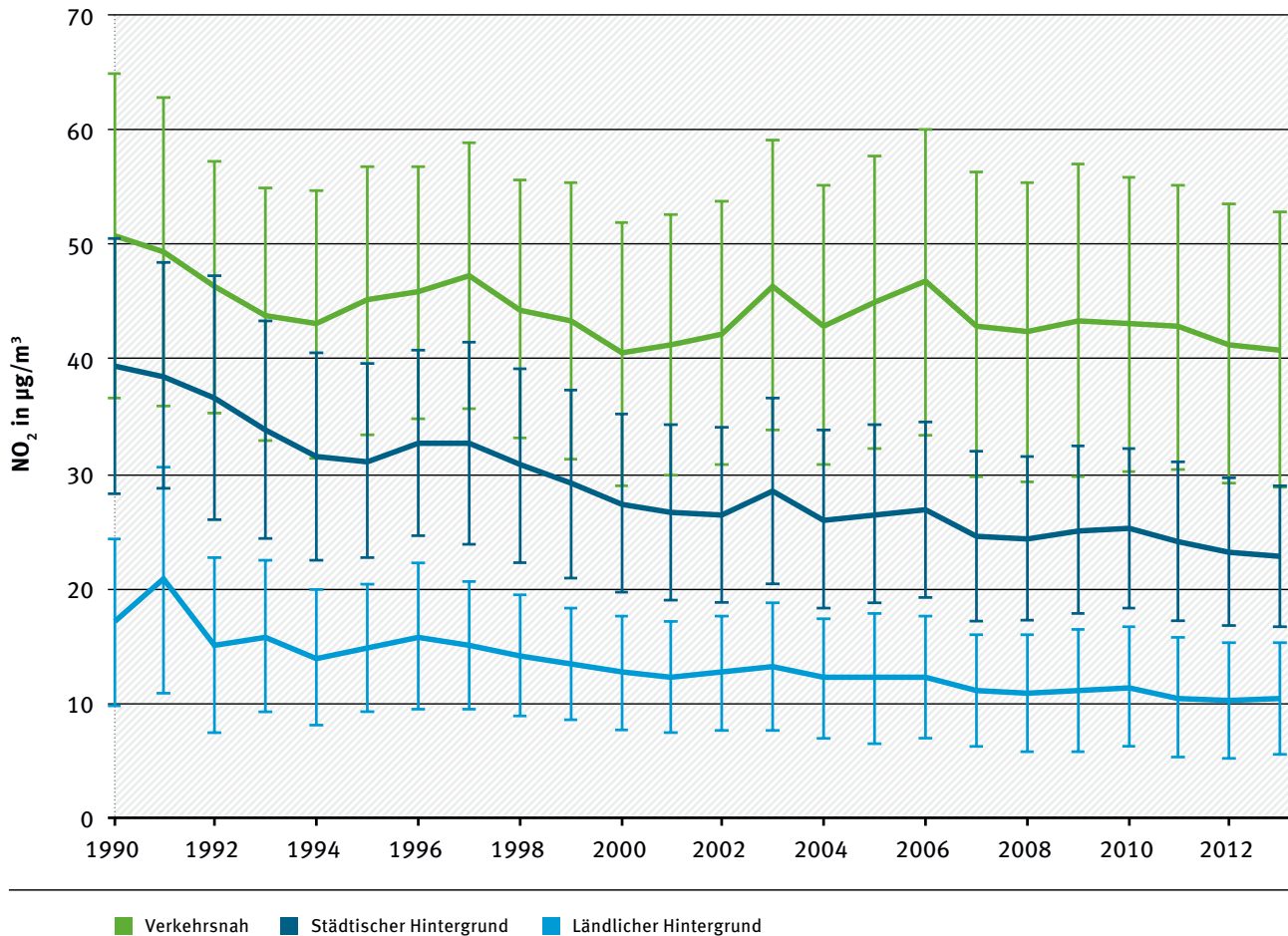
nahes Ozon ist in Deutschland und weiten Teilen Europas ein erheblicher Stressfaktor für Pflanzen, der zu Ernteinbußen führt (Mills and Harmens, 2011) und die biologische Vielfalt beeinträchtigen kann.

**Ausblick:** Ohne weitere Maßnahmen wird die Überschreitung der Critical Loads für eutrophierenden Stick-

Abbildung 3

## Entwicklung der NO<sub>2</sub>-Jahresmittelwerte im Mittel über die Stationsklassen „ländlicher Hintergrund“, „städtischer Hintergrund“ und „städtisch verkehrsnah“

Im Zeitraum 1990 bis 2013 (Stationen, die mindestens 9 Jahre gemessen haben)



stoff in Deutschland bis 2030 im Vergleich zu 2005 nur um etwa ein Viertel zurückgehen (International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), 2014).

### 2.2 Gefährdung der Luftqualität

Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>), das vor allem aufgrund von Verbrennungsprozessen in die Luft gelangt, hat negative Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit. Es führt u. a. zu Entzündungsreaktionen in den Atemwegen und kann die Reizwirkung anderer Luftschadstoffe verstärken. Europaweit gilt ein Grenzwert von 40 µg m<sup>-3</sup> (Jahresmittel), dessen Einhaltung in vielen Städten derzeit noch große Probleme bereitet (Abb. 3). Zudem tragen reaktive Stickstoffverbindungen zur Bildung sekundärer Feinstäube

bei, die ebenfalls negativ auf die menschliche Gesundheit wirken. Durch Modellierungen kann gezeigt werden, dass die landwirtschaftlichen Emissionen (v. a. von Ammoniak) mit etwa einem Viertel der Feinstaubbelastung (PM<sub>10</sub>) in Deutschland in Zusammenhang stehen (Stern, 2013a). Bodennahes Ozon, an dessen Bildung Stickstoffoxide beteiligt sind, ist nicht nur ein Schadstoff für Ökosysteme, sondern auch für den Menschen. Der Ozon-Zielwert zum Schutz der menschlichen Gesundheit wird derzeit immer noch an rund 10 Prozent der Messstationen in Deutschland überschritten (UBA, 2014c).

**Ausblick:** Die bis 2020 erwarteten Emissionsminderungen werden zu einer weiteren Abnahme der Luftbelastung führen. Dennoch werden ohne weitere Maßnahmen auch 2020 die aktuell gültigen Grenz- bzw. Zielwerte für NO<sub>2</sub>,



Ozon und Feinstaubbelastungen noch nicht an allen Stationen eingehalten werden (Jörß et al., 2014, Stern, 2013b).

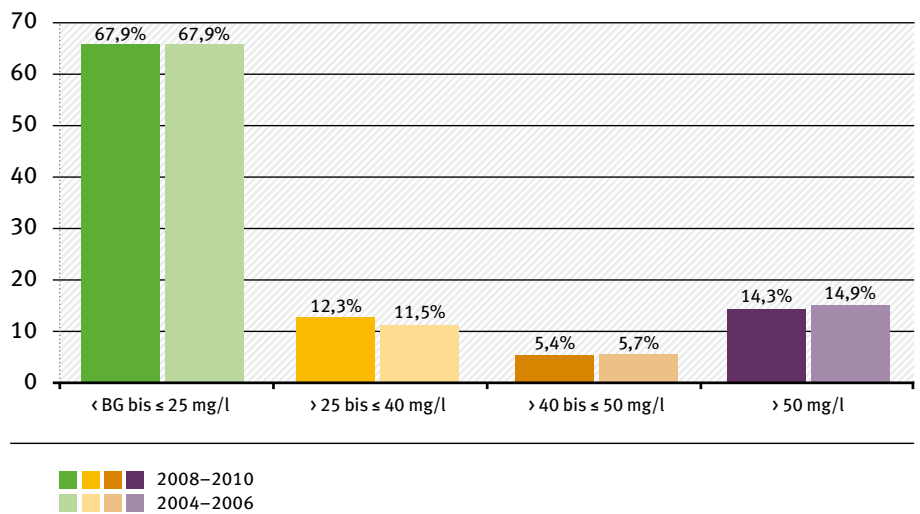
## 2.3 Gefährdung der Wasserqualität

Trinkwasser ist unser wichtigstes Lebensmittel. Die mit Abstand bedeutendste Trinkwasserquelle ist das Grundwasser. Stickstoffüberschüsse, die von Pflanzen nicht produktiv umgesetzt werden, können ins Grundwasser gelangen. Ein beachtlicher Anteil der Grundwasservorkommen in Deutschland weist zu hohe Nitratwerte auf. Dies ist Besorgnis erregend, da Grundwasser nur sehr langsam auf Veränderungen reagiert: Bis oberflächliche Einträge ins Grundwasser gelangen und dort nachgewiesen werden, vergehen mehrere Jahre bis Jahrzehnte.

Der Nitratbericht der Bundesregierung (BMU & Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV), 2012) zeigt, dass an etwa 14 Prozent der Messstellen des nationalen Messnetzes für die Berichterstattung an die Europäische Umweltagentur die zulässigen Nitratkonzentrationen in Höhe von 50 mg l<sup>-1</sup> nach wie vor überschritten sind (Abb. 4) und dass die Konzentrationen an 40 Prozent der Messstellen des sogenannten Belastungsmessnetzes zugenommen haben (Abb. 5).

Abbildung 4

**Häufigkeitsverteilung der mittleren Nitratgehalte an Messstellen für die Berichterstattung an die Europäische Umweltagentur**  
In den Jahren 2008–2010 und 2004–2006

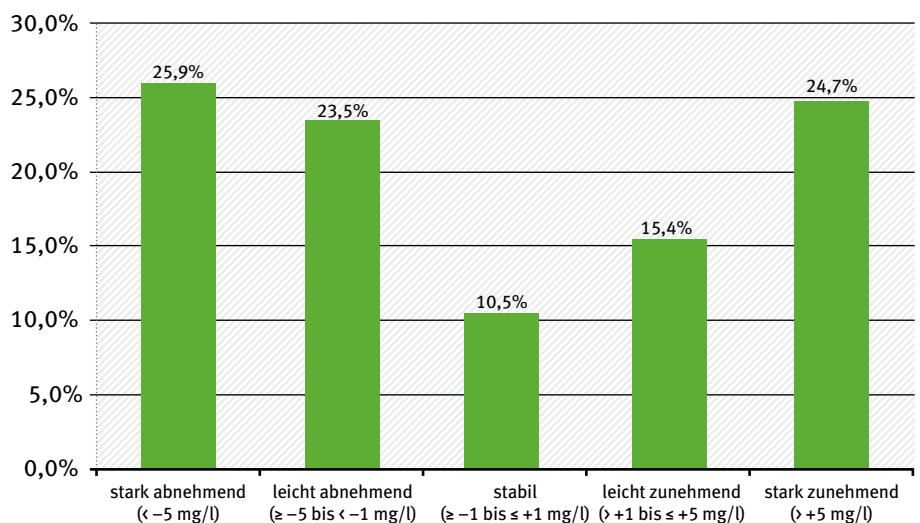


EUA-Messnetz: 739 gemeinsame Messstellen

BMU & BMELV, 2012

Abbildung 5

**Entwicklung der Nitratgehalte an Messstellen des Belastungsmessnetzes**  
In den Jahren 2008–2010 im Vergleich zum Zeitraum 2004–2006



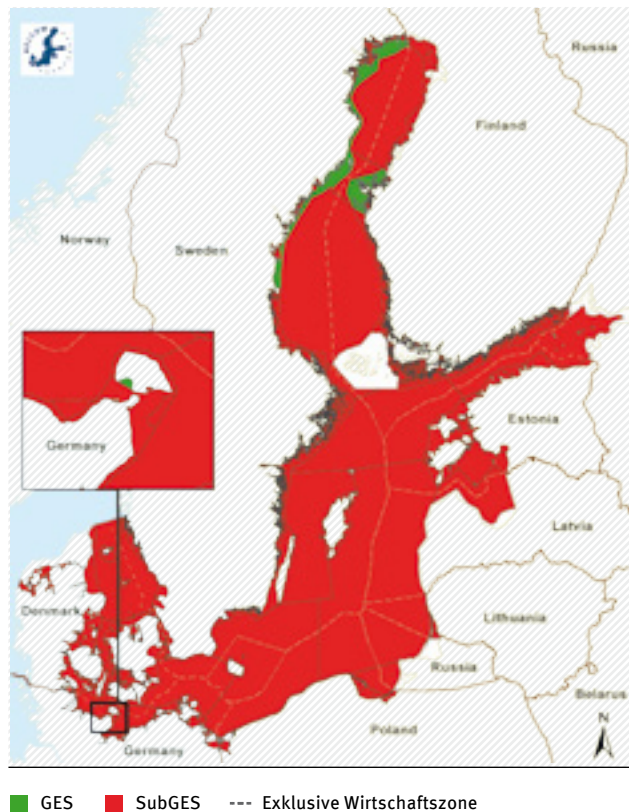
Gesamtanzahl der Messstellen: 162

BMU & BMELV, 2012

Abbildung 6

## Eutrophierungszustand der Ostsee

Rote Gebiete sind in einem schlechten Eutrophierungszustand (SubGES), für grüne Gebiete wurde der gute Zustand (GES) hinsichtlich Eutrophierung erreicht. Die Daten basieren auf dem HELCOM „Eutrophication Assessment Tool“ HEAT 3.0 und Daten von 2007–2011. Für die Küstengewässer wurde die WRRL-Bewertung verwendet



Eutrophication status of the Baltic Sea 2007–2011 – A concise thematic assessment. Baltic Sea Environment Proceedings No. 143

HELCOM (2014)

Aufgrund zu hoher Nitratwerte mussten Wasserversorger bereits Grundwasservorkommen aufgeben und neue, tiefer liegende Grundwasservorräte erschließen. Diese Ausweichstrategie führt zu zusätzlichen Kosten und ihr sind v. a. wegen begrenzter Grundwassermengen und der möglichen Sogwirkungen zwischen sauberen und verunreinigten Grundwasserleitern Grenzen gesetzt. Die Einträge weiter zu reduzieren ist deshalb auch aus Gründen der Vorsorge dringend geboten. Vorbeugender Grundwasserschutz ist deutlich kostengünstiger als eine aufwändige, nachträgliche Trinkwasseraufbereitung (UBA, 2014f und g). Die EU-Kommission ist bereits auf die unzureichende nationale Umsetzung der Nitratrichtlinie aufmerksam geworden und hat ein Vertragsverletzungsverfahren

eröffnet, an dessen Ende auch Strafzahlungen möglich sind.

Die übermäßige Belastung der Meeresgewässer mit den Nährstoffen Phosphat und Nitrat ist gegenwärtig – neben der Überfischung – das größte ökologische Problem sowohl der deutschen Nord- als auch Ostsee. Diese Eutrophierung führt zu einer Reihe negativer Auswirkungen auf die marinen Ökosysteme (UBA, 2013c). Sie ist wesentliche Ursache dafür, dass die Küstengewässer den sogenannten „guten ökologischen Zustand“ gemäß Wasser-Rahmenrichtlinie und die Meeresgewässer den „guten Umweltzustand“ gemäß Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie gegenwärtig verfehlen (Abb. 6). Der Nitratbericht der Bundesregierung (BMU & BMELV, 2012) zeigt, dass bei vielen küstennahen Messstationen im Vergleich zum letzten Berichtszeitraum (2003–2006) auch wieder zunehmende Nitratkonzentrationen zu beobachten waren.

Darüber hinaus sind die hohen Nährstoffbelastungen mit ursächlich dafür, dass viele Oberflächengewässer bisher den „guten ökologischen Zustand“ nicht erreichen. Hierbei ist Phosphor häufig entscheidend, wenngleich auch in Binnengewässern (v. a. Seen) Stickstofflimitierungen möglich sind (Dolman et al., 2012).

**Ausblick:** Die Vorgabe der Wasserrahmenrichtlinie, bis 2015 flächendeckend einen guten chemischen Zustand der Grundwasserleiter und einen guten ökologischen Zustand der Oberflächengewässer zu erreichen, wird verfehlt werden. Ebenso wird die Vorgabe der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie, bis 2020 einen guten Umweltzustand der Meeresgewässer zu erreichen, verfehlt werden. Die Nitratbelastung einiger Grundwasserkörper weist mittlerweile z. T. wieder einen stagnierenden oder gar zunehmenden Trend auf.

## 2.4 Klimaänderung

Auch Lachgas ist eine reaktive Stickstoffverbindung (Abb. 7). Es entsteht als Nebenprodukt bei der mikrobiellen Umsetzung von Stickstoff im Boden, v. a. bei der Nitrifikation und der Denitrifikation. Lachgas (Distickstoffmonoxid,  $N_2O$ ) ist als Treibhausgas (pro Kilogramm Emission) 265-mal wirksamer als Kohlenstoffdioxid ( $CO_2$ ; Stocker et al., 2013). Im Jahre 2011 betrug der Strahlungsantrieb von Lachgas, der ein Maß für die Klimawirksamkeit eines Treibhausgases ist, etwa ein Dreizehn-





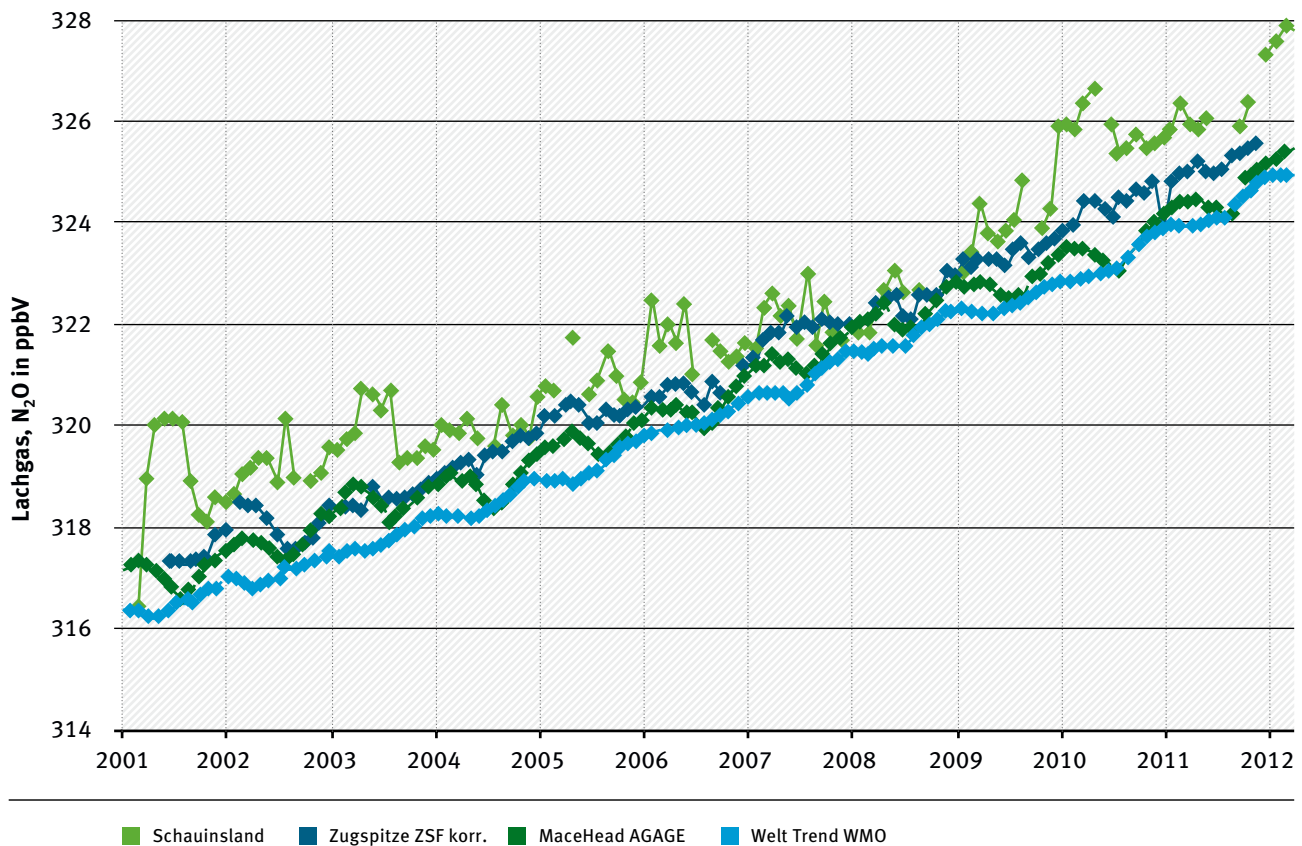
Lachgas entsteht als Nebenprodukt bei  
der mikrobiellen Umsetzung von Stickstoff  
im Boden



Abbildung 7

## Monatsmittelwerte der Lachgaskonzentration ( $\text{N}_2\text{O}$ ) in der Atmosphäre

Gezeigt sind die Messwerte des Umweltbundesamtes (Schauinsland, Zugspitze) sowie Messungen aus Irland (Mace Head) und der vom Weltzentrum für Treibhausgase (WDCGG, Tokyo) gemittelte globale Trend



tel des gesamten anthropogenen Strahlungsantriebes. Auch bodennahes Ozon, zu dessen Bildung der reaktive Stickstoff beiträgt, ist ein Treibhausgas. Andererseits wirkt der intensivierte Stickstoffkreislauf auch abkühlend auf das Klima. Wesentliche Prozesse dabei sind eine verstärkte Kohlenstoffbindung, die Bildung atmosphärischer Partikel, die die Rückstrahlung der Sonnenstrahlen in Richtung Weltraum erhöhen, sowie die Verkürzung der Lebenszeit von Methan. Derzeit wird davon ausgegangen, dass sich beide Effekte in etwa aufheben und die Gesamtwirkung des intensivierten Stickstoffkreislaufs aktuell leicht kühlend ist.

**Ausblick:** Die abkühlenden Effekte wirken sich, verglichen mit den erwärmenden, über deutlich kürzere typische Zeitskalen aus, weshalb der intensivierte Stickstoffkreislauf wahrscheinlich langfristig zur Klimaerwärmung beitragen wird (Sutton et al., 2013). Mögliche Auswir-

kungen auf das Klima sollten daher bei der Beurteilung von Maßnahmen zur Minderung der Stickstoffemission stets mit bedacht werden (Sutton et al., 2011).

## 2.5 Wirkungen auf Materialien

Verwitterung und Korrosion von Bausubstanz und Bau- denkmälern verursachen jedes Jahr beträchtliche Reparatur- oder Restaurierungsaufwendungen. Stickstoffverbindungen, insbesondere Salpetersäure ( $\text{HNO}_3$ ) sowie Partikel, die zu einem unterschiedlich großen Teil aus Stickstoffverbindungen bestehen, haben daran einen großen Anteil.

Auch die durch Stickstoffoxidemissionen erhöhten Ozonkonzentrationen in der Luft tragen zu Materialschäden bei. Ozon wirkt auf organische Materialien (polymere



Kunststoffe, Gummi, Beschichtungen) oxidierend und führt zur Brüchigkeit; bei Metallen kommt es zu beschleunigter Materialalterung und -verwitterung. Das erhöhte Risiko für Materialschäden durch Luftschadstoffe (z.B. reaktive Stickstoffverbindungen) lässt sich aus dem Vergleich der Korrosionsraten in gering und stark belasteten Regionen (urbane und industriellen Gebiete) ableiten. Vor allem aufgrund der Minderung der Schwefelemissionen in den vergangenen Jahrzehnten, sind entsprechende Materialschäden in Deutschland bereits deutlich zurückgegangen. Bei Stickstoffverbindungen wurden solch deutliche Erfolge bisher noch nicht erreicht. Im Jahr 2000 waren die aktuellen Korrosionsraten noch immer 1,5- bis 5-mal größer als die Hintergrundkorrosionsraten, wobei die betroffenen Flächen große Teile von Deutschland umfassten. Eine grundlegende Änderung der Situation ist seit dem Jahr 2000 noch nicht eingetreten.

**Ausblick:** Durch die verringerte Schadstoffbelastung der Luft bis 2020 (siehe 2.2) werden die Verwitterungs- und Korrosionsraten von Materialien weiter abnehmen aber dennoch weiträumig deutlich oberhalb von Hintergrundraten liegen. Damit wird die Gesellschaft auch zukünftig erhöhte Kosten zu tragen haben.

## 2.6 Ökonomische Auswirkungen

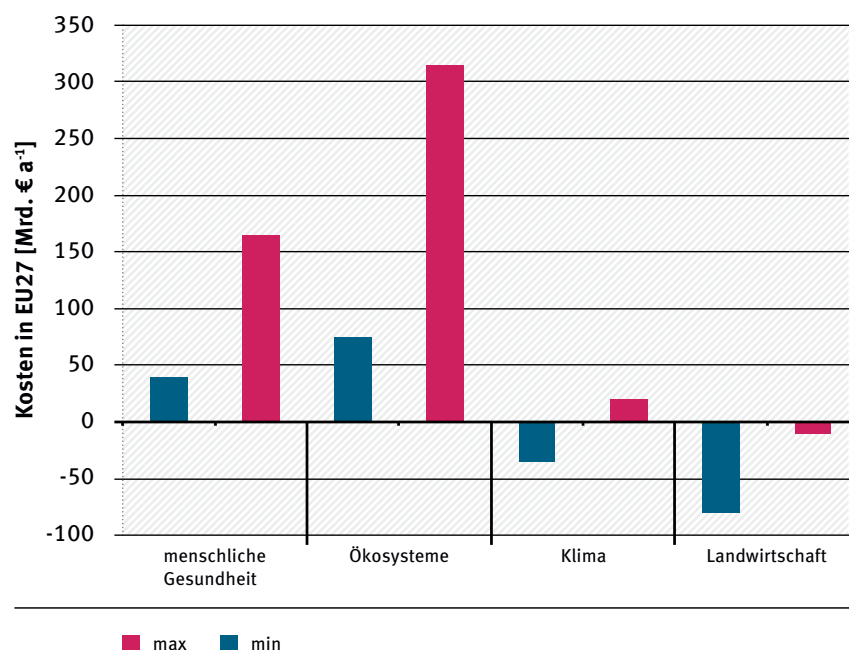
Der Einsatz reaktiver Stickstoffverbindungen trägt zu einer ertragreichen Nahrungsmittelproduktion bei. Der Nutzen in Form zusätzlicher Ernteerträge in der EU liegt schätzungsweise zwischen 20 und 80 Milliarden Euro

pro Jahr (siehe Abb. 8). Dem Nutzen stehen gesellschaftliche Kosten gegenüber, die durch Beeinträchtigung der menschlichen Gesundheit und durch Schäden an Ökosystemen hervorgerufen werden. Die Schäden sind nicht exakt bezifferbar, nach ersten Schätzungen von van Grinsven et al., 2013 ist jedoch davon auszugehen, dass aus dem intensivierten Stickstoffkreislauf gesellschaftliche Kosten in Höhe mehrstelliger Milliardenbeiträge resultieren (siehe Abb. 8; van Grinsven et al., 2013). Diese Größenordnung wird von aktuellen Studien (Stokstad, 2014) bestätigt. Die Forschungsergebnisse legen nahe, dass die volkswirtschaftlichen Kosten des erhöhten Stickstoffeinsatzes mittlerweile den Nutzen deutlich übersteigen (Sutton et al., 2011, van Grinsven et al., 2013).

**Ausblick:** Zukünftig ist es aus ökonomischer Sicht sinnvoll den Einsatz reaktiver Stickstoffverbindungen zu reduzieren und den Nutzen verbleibender Einsätze sorgfältiger abzuwägen. Denn eine nachhaltige Gestaltung des Stickstoffkreislaufs ist nicht nur ökologisch sondern auch gesamtwirtschaftlich vorteilhaft, zumal es insbesondere im Bereich der Vermeidung der Emissionen von reaktivem Stickstoff aus der Landwirtschaft (v. a. Ammoniak und Nitrat) noch große Potentiale für wirksame und relativ kostengünstige Maßnahmen gibt.

Abbildung 8

**Geschätzte Kosten und Nutzen (hier: negative Werte) die sich aus der Nutzung von reaktivem Stickstoff (Werte für 2008) in der EU-27 in unterschiedlichen Bereichen ergeben**  
Es ist jeweils der tiefste (min) und der höchste (max) Wert der aktuellen Schätzungen angegeben



van Grinsven et al., 2013; ES&T; 47, 3571–3579

### 3. Handlungsbedarf und politische Strategien

Seit den 1980er Jahren werden die negativen Umweltwirkungen des intensivierten Stickstoffkreislaufs vermehrt diskutiert. Die nachhaltige Reduzierung der Stickstoffbelastung entwickelte sich zu einem wichtigen umweltpolitischen Ziel. Eine entscheidende Rolle spielten die internationalen Meeresschutzkonferenzen und die Genfer Luftreinhaltekonvention (siehe Box 3). So beschloss die 2. Internationale Nordseeschutz-Konferenz 1987 als eines der ersten quantitativen Stickstoffminderungsziele, den anthropogenen Stickstoffeintrag bis 1995 gegenüber 1985 zu halbieren. Dieses Ziel wurde in Deutschland erst vor wenigen Jahren erreicht. Auch der Entwurf eines umweltpolitischen Schwerpunktprogramms des Bundesumweltministeriums von 1998 nennt die Stickstoffproblematik an prominenter Stelle und schlägt als strategisches Ziel eine Verringerung des Stickstoffüberschusses in der Landwirtschaft auf 50 Kilogramm Stickstoff je Hektar und Jahr ( $\text{kg N ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ ) vor.

Als zentraler Indikator für die Nachhaltigkeit der Landwirtschaft, wurde deshalb der Stickstoffüberschuss (Hoftorbilanz; vgl. Box 2) in das Indikatorenset der Nachhaltigkeitsstrategie (2002) und der nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt (2007) aufgenommen. Die Bundesregierung legte als Zwischenziel bis 2010 die Begrenzung des Überschusses für landwirtschaftliche Nutzflächen auf  $80 \text{ kg N ha}^{-1} \text{a}^{-1}$  fest. Danach sollte das quantitative Ziel weiter reduziert werden, was bisher nicht erfolgt ist. Dafür ist eine breite gesellschaftliche Diskussion erforderlich. Das Umweltbundesamt empfiehlt als ambitioniertes aber erreichbares Ziel, den Stickstoffüberschuss in der Gesamtbilanz auf  $50 \text{ kg N ha}^{-1} \text{a}^{-1}$  bis 2040 zu verringern (vgl. Anhang 2).

Regional sind die Stickstoffüberschüsse in Deutschland sehr unterschiedlich verteilt: sehr hohe Werte treten v. a. in Regionen mit einer hohen Viehbesatzdichte auf (Abb. 9).

Stickstoffemissionen sind jedoch nicht allein auf die Landwirtschaft beschränkt; auch aus Verkehr, Kläranlagen und Industrie gelangt reaktiver Stickstoff in die Umwelt. Bereits 1993 wurde daher von einer Bund-Länder-Arbeitsgruppe erstmals der deutsche Stickstoffkreislauf quantifiziert und mit der Ausarbeitung eines Stickstoffminderungsprogramms begonnen. Das 1997 veröffentlichte Stickstoffminderungsprogramm (Alfred Töpfer Akademie

für Naturschutz (NNA), 1997) enthielt eine Zusammenstellung von Maßnahmen für alle relevanten Sektoren. 2009 erstellte das Umweltbundesamt eine integrierte Strategie zur Minderung von Stickstoffemissionen, die auf eine aktualisierte Bilanzierung der Stickstoffflüsse aufbaute und weitergehende Maßnahmen vorschlug (UBA, 2009b).

In der Vergangenheit wurden insbesondere im Bereich der Abwasserreinigung und der Emissionen von Stickstoffoxiden aus Industrie und Verkehr wirksame Maßnahmen zur Verminderung der Verluste von reaktivem Stickstoff an die Umwelt umgesetzt. Eine ähnlich konsequente Umsetzung blieb im Bereich der Landwirtschaft bisher aus.

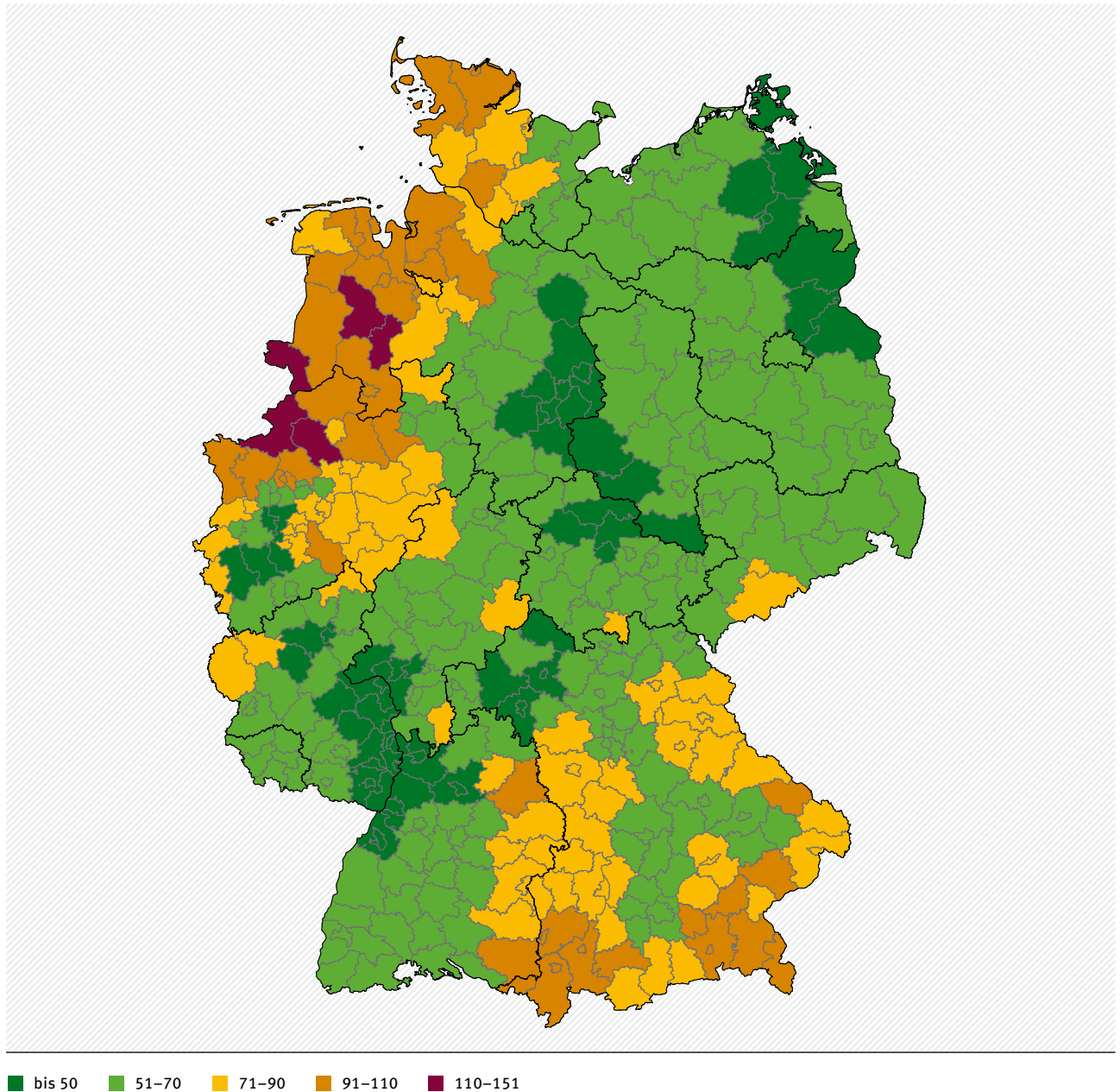
Trotz einiger Erfolge werden daher auch heute noch wichtige Minderungsziele verfehlt bzw. es ist absehbar, dass sie ohne weitere Maßnahmen bis zum vorgesehenen Zieljahr nicht erreicht werden können. So betrug der Mittelwert des landwirtschaftlichen Stickstoffüberschusses in den letzten Jahren etwa  $97 \text{ kg N ha}^{-1} \text{a}^{-1}$  (siehe Box 2) und ist damit noch weit von den  $80 \text{ kg N ha}^{-1} \text{a}^{-1}$  entfernt, die eigentlich schon 2010 erreicht werden sollten. Weitere Beispiele für wichtige politische Ziele, die voraussichtlich verfehlt werden, sind in Kapitel 2 zusammengefasst, dazu gehören die Einhaltung der Critical Loads und die flächendeckende Erreichung einer guten Grundwasserqualität bis 2015.

Die Verfehlung der Ziele liegt auch darin begründet, dass eine umfassende Lösung der Stickstoffproblematik durch technische Maßnahmen in einzelnen Bereichen allein kaum zu erreichen ist. Es bedarf vielmehr einer Berücksichtigung der Problematik in sämtlichen betroffenen Politikbereichen („Politikintegration“) sowie einer Veränderung in unser aller Verhalten (UBA, 2013a). Eine Lösung wäre äußerst lohnend, denn gelänge eine effektive Verminderung der Verluste von reaktivem Stickstoff in die Umwelt, so würde dies aufgrund der Stickstoffkaskade (vgl. Box 1) dazu führen, dass eine Vielzahl von Umweltproblemen gleichzeitig angegangen würden. Der Stickstoffproblematik sollte also mit einer abgestimmten und effizienten Kombination aus sich ergänzenden Instrumenten begegnet werden. Das im Januar 2014 in Kraft getretene 7. Umweltaktionsprogramm der EU, welches verbindlichen Charakter für die EU-Institutionen (Rat,

## Verteilung des Überschusses der Stickstoff-Flächenbilanz (in kg N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>) in den Kreisen und kreisfreien Städte in Deutschland im Durchschnitt der Jahre 2009 bis 2011

Der Mittelwert des Stickstoff-Flächenbilanzüberschusses für 2009–2011 und Deutschland

insgesamt beträgt 65 kg N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>; der entsprechende Mittelwert der Stickstoff-Gesamtbilanz ist 96 kg N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> (Box 2)



(Bach, 2010, Bach, 2014).

Kommission und Parlament) hat und die Schwerpunkte der europäischen Umweltpolitik bis 2020 festlegt, nennt deshalb eine nachhaltige und ressourceneffiziente Steuerung der Nährstoffkreisläufe (Stickstoff und Phosphor) als ein wesentliches Ziel. Die engere Abstimmung auf nationaler und europäischer Ebene könnte ggf. durch eine explizite Stickstoffstrategie der Bundesregierung,

die anspruchsvolle quantitative Ziele (Indikatoren) enthalten und alle Bereiche in die Pflicht nehmen sollte, unterstützt werden. Auch auf Ebene der Länder gibt es Initiativen, die sich grundlegend mit der Stickstoffproblematik befassen, wie das 2012 gestartete übergreifende Projekt „Analyse und Bewertung des Stickstoffhaushalts in Baden-Württemberg“<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Vgl.: <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/56176/>

## Stickstoffüberschuss in der Landwirtschaft

Der Stickstoffüberschuss, berechnet über die Gesamtbilanz (auch: Hoftorbilanz), ist ein Maß für die Stickstoffverluste aus der Landwirtschaft. Er ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Massenfluss von Stickstoff in die Landwirtschaft (u. a. Mineraldünger, Futtermittelimporte, biologische Stickstofffixierung, atmosphärische Deposition von oxidiertem Stickstoff) und dem Massenfluss von Stickstoff in Produkten aus der Landwirtschaft hinaus (tierische und pflanzliche Marktprodukte). Die Angabe erfolgt in der Regel in kg Stickstoff pro Hektar landwirtschaftliche Nutzfläche und Jahr ( $\text{kg N ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ ).

Der Überschuss ist eine Bilanzgröße, die sich nicht direkt messen lässt, denn er entweicht überwiegend in die Umwelt. Wichtigster Austragspfad ist die Denitrifikation (also die Umwandlung reaktiven Stickstoffs in Luftstickstoff; vgl. Box 4), danach folgen etwa gleichbedeutend die Emission reaktiven Stickstoffs in die Atmosphäre und der Eintrag als Nitrat in Grund- sowie Oberflächengewässer. Je kleiner der Überschuss, desto geringer sind also die Stickstoffverluste in die Umwelt und damit die schädlichen Auswirkungen. Auch eine nachhaltige und produktive Landwirtschaft wird aber – da sie in einem offenen System arbeitet – immer zu einem Stickstoffüberschuss führen, den es jedoch zu minimieren gilt. Folgende politische Ziele wurden für den Stickstoffüberschuss (Gesamtbilanz) festgelegt:

Nachhaltigkeitsstrategie: Verringerung bis auf  $80 \text{ kg N ha}^{-1}$  landwirtschaftlich genutzter Fläche bis 2010, weitere Absenkung bis 2020.

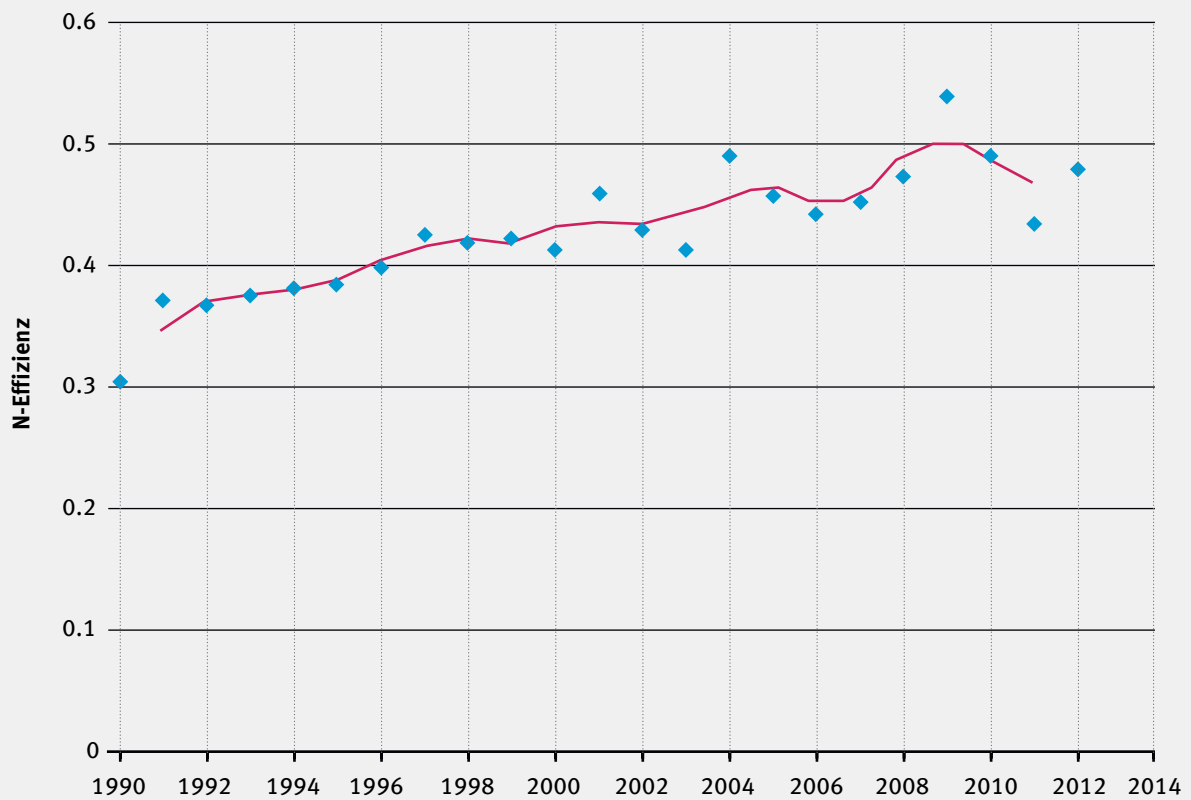
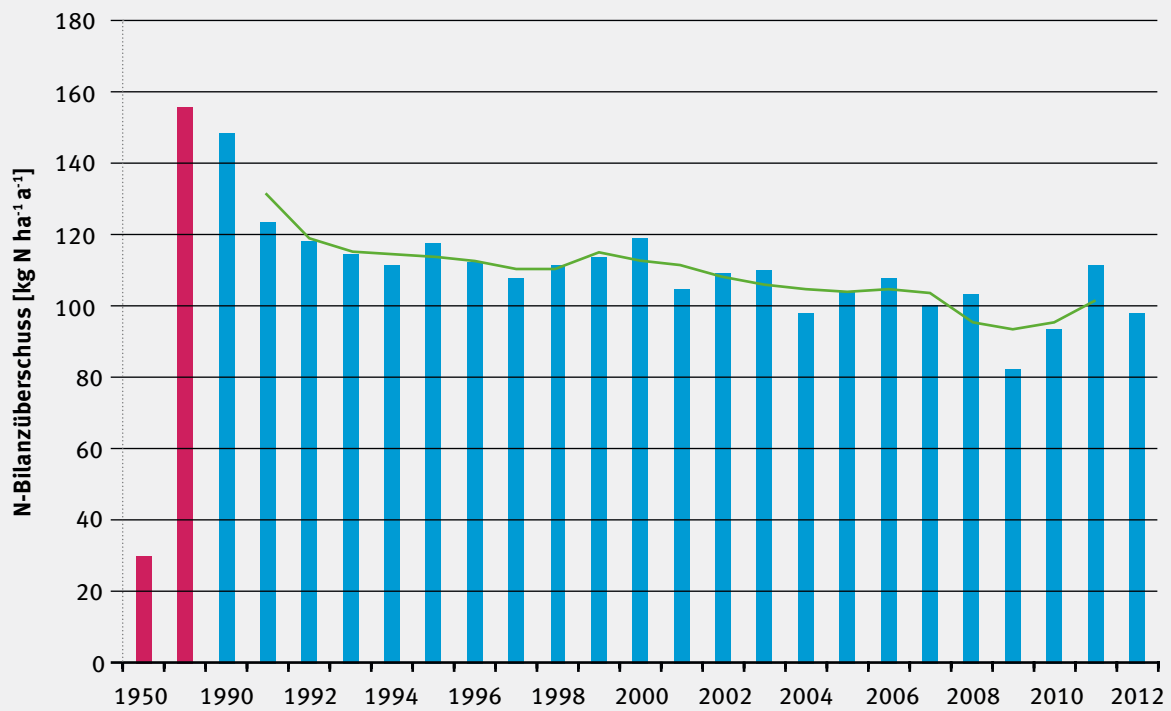
Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt: Bis zum Jahr 2010 sollen die Stickstoffüberschüsse in der Gesamtbilanz auf  $80 \text{ kg N ha}^{-1} \text{a}^{-1}$  verringert werden. Darüber hinaus wird eine weitere Verringerung bis zum Jahr 2015 angestrebt.

Abbildung B 2.1 oben zeigt den Verlauf des Indikators seit 1990; der Indikatorwert ist das gleitende Dreijahresmittel; der Wert (Dreijahresmittel) für 2010 beträgt  $96 \text{ kg N ha}^{-1} \text{a}^{-1}$  und liegt damit  $16 \text{ kg N ha}^{-1} \text{a}^{-1}$  über dem angestrebten Zielwert. Die starke Abnahme zu Beginn der Zeitreihe ist v. a. auf den Abbau von Tierbeständen in den frühen 1990er Jahren zurückzuführen; die relativ leichte Abnahme in den letzten 10 Jahren v. a. auf eine Steigerung der Erträge bei etwa gleichbleibendem Stickstoffeinsatz. Im europäischen Vergleich liegt der deutsche Wert im oberen Drittel der Überschüsse; der Durchschnitt der EU27 beträgt etwa  $50 \text{ kg N ha}^{-1} \text{a}^{-1}$  (Eurostat, 2011). Darunter ist auch die zeitliche Entwicklung der Stickstoffeffizienz (bzw. Stickstoffproduktivität) gezeigt, die, anders als der Überschuss, nicht die Differenz aus Stickstoff-Input und Stickstoff-Output angibt, sondern die beiden Größen ins Verhältnis setzt: die Stickstoffeffizienz gibt an, welcher Anteil der Stickstoffzufuhr in die Landwirtschaft letztlich in den landwirtschaftlichen Produkten enthalten ist. Die Stickstoffeffizienz der deutschen Landwirtschaft hat in den letzten 20 Jahren nahezu kontinuierlich von unter 40 Prozent auf rund 50 Prozent zugenommen.

Von der Gesamt- oder Hoftorbilanz muss die Flächenbilanz unterschieden werden, wie sie z. B. derzeit in der Düngeverordnung gefordert wird. Bei der Flächenbilanz werden atmosphärische Verluste (in Stall und Lager, z. T. auch auf der Fläche) nicht betrachtet. Sie ist daher nur ein Teil der Gesamtbilanz. Je nach Methode liegt der Wert der Flächenbilanz in Deutschland meist  $10\text{--}30 \text{ kg N ha}^{-1} \text{a}^{-1}$  unter dem entsprechenden Wert der Gesamtbilanz (UBA, 2009a, Bach, 2010, Osterburg and Techen, 2012).

**Abbildung B 2.1 (rechts): oben:** Stickstoffüberschuss (Hoftorbilanz); die grüne Linie zeigt das gleitende Dreijahresmittel; die roten Balken zeigen die Indikatorwerte für 1950 und 1980 (da die Berechnungsmethodik weiterentwickelt wurde, sind diese Werte mit der aktuellen Zeitreihe nur eingeschränkt vergleichbar); **unten:** Stickstoffeffizienz. Daten: <http://www.bmelv-statistik.de/index.php?id=139> (Stand: 04/2014), (UBA, 2011); eigene Darstellung.





---

## Umweltziele bezüglich reaktiver Stickstoffverbindungen aus internationalen Konventionen und Vereinbarungen

---

### Zwischenstaatliche Kommission zum Schutz der Meeresumwelt im Ostseeraum (HELCOM)

Um bis 2021 die Voraussetzungen für einen guten Umweltzustand der Ostsee zu erreichen verabschiedete HELCOM 2007 den Ostseeaktionsplan, der quantitative Minderungsziele für Nährstoffeinträge enthält. Diese Ziele wurden einer wissenschaftlichen Revision unterzogen und auf dem HELCOM-Ministertreffen im Oktober 2013 neu verabschiedet. Der Ostseeaktionsplan hat zum Ziel bis 2021 die Einträge von reaktivem Stickstoff in die Ostsee über den Wasser- und den Luftpfad auf rund 800.000 t N a<sup>-1</sup> zu begrenzen. Nach derzeitigem Stand der Wissenschaft wird es bei Einhaltung dieses Wertes zu keiner signifikanten Eutrophierung der Ostsee mehr kommen. Für Deutschland legt der Ostseeaktionsplan fest, dass die Stickstofffracht aus Wasser und Luft bis 2021 im Verhältnis zur Periode 1997 bis 2003 insgesamt um 7.670 t N a<sup>-1</sup> reduziert werden muss, das entspricht etwa 10 Prozent der derzeitigen Fracht.

**Weitere Informationen:** [www.helcom.fi](http://www.helcom.fi)

### Genfer Luftreinhaltekonvention (Convention on Long-range Transboundary Air Pollution)

Ein wichtiges Ziel der 1979 geschlossenen Genfer Luftreinhaltekonvention ist die kontinuierliche Verringerung der Überschreitung der kritischen Eintragsraten (Critical Loads) durch die Schad- und Nährstoffdeposition. Das 2012 revidierte Göteborg-Protokoll der Genfer Luftreinhaltekonvention setzt neue Zwischenziele, die bis 2020 erreicht werden sollen (UBA, 2014b). Deutschland hat sich darin verpflichtet die nationalen Emissionen der reaktiven Stickstoffverbindungen Stickstoffoxide (NO<sub>x</sub>) und Ammoniak (NH<sub>3</sub>) bis 2020 um 39 % bzw. 5 % zu reduzieren (bezogen auf das Jahr 2005). Für Ammoniak sind somit faktisch kaum Minderungen vereinbart.

**Weitere Informationen:** [www.unece.org/env/lrtap/lrtap\\_h1.html](http://www.unece.org/env/lrtap/lrtap_h1.html)

### Internationale Biodiversitäts-Konvention (Convention on Biological Diversity, CBD)

Diese 1992 in Rio de Janeiro verabschiedete Konvention hat den Schutz und die nachhaltige Nutzung der biologischen Vielfalt, sowie eine geregelte und gerechte Nutzung der genetischen Ressourcen zum Ziel. 2010 wurde ein Strategischer Plan mit den zwanzig sogenannten „Aichi-Zielen“ vereinbart, die bis 2020 erreicht werden sollen, um die übergeordneten Ziele zu verwirklichen. Ziel 8 fordert dabei, eine Absenkung der Schad- und Nährstoffbelastungen bis 2020 auf ein Niveau, das zu keinen schädlichen Auswirkungen auf die biologische Vielfalt und die Ökosystemfunktionen führt.

**Weitere Informationen:** [www.cbd.int](http://www.cbd.int)

---

## 4. Der deutsche Stickstoffkreislauf

Die Bilanzierung der Emissionsquellen und Flüsse reaktiver Stickstoffverbindungen in der Umwelt ist Grundlage der Entwicklung, Bewertung und Auswahl von Maßnahmen und Instrumente im Hinblick auf Emissionsminderungspotentiale und mögliche Nebeneffekte in anderen Umweltmedien. Um nationale Bilanzen international vergleichbar zu machen, wurde im Rahmen der Genfer Luftreinhaltekonvention ein Methodenleitfaden entwickelt (Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (CLRTAP), 2013), auf dessen Basis die Bilanz für Deutschland erstellt wurde. Damit wird die Bilanzierung aus dem Jahr 2009 (UBA, 2009a) fortgeführt und – wo möglich – auf den Bezugszeitraum 2005–2010 aktualisiert. Die wichtigsten Datengrundlagen finden sich in Anhang 1. Auch die EU-Kommission (Environment Directorate General of the European Commission [„DG Environment“], 2013) empfiehlt in den im Dezember 2013 vorgelegten Legislativvorschlägen zur Revision der EU-Luftreinhaltepolitik die Erstellung einer solchen Bilanz, um Maßnahmen zielgerichtet zu ergreifen. Einige andere europäische Länder erstellen gleichfalls regelmäßig nationale Stickstoffbilanzen (Heldstab et al., 2013; Heldstab et al., 2010).

### 4.1 Bilanzierung der Stickstoffflüsse in Deutschland (2005–2010)

Die wichtigsten (anthropogenen) Stickstoffflüsse in Deutschland sind in Abbildung 10 dargestellt. Jährlich gelangen in Deutschland etwa 4200 Gg N a<sup>-1</sup> reaktiven Stickstoffs<sup>2</sup> in den Stickstoffkreislauf, indem sie von der elementaren in die reaktive Form umgewandelt oder bereits als reaktiver Stickstoff importiert werden. Die wichtigsten Einträge in den nationalen Kreislauf sind:

- ▶ die industrielle Fixierung von Ammoniak aus Luftstickstoff als chemischer Grundbaustein mit etwa 2700 Gg N a<sup>-1</sup> (Verband der Chemischen Industrie e. V. (VCI), 2012),
- ▶ der Import von Futtermitteln mit ca. 370 Gg N a<sup>-1</sup> (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), 2013),

- ▶ die Emissionen reaktiven Stickstoffs aus Energiewirtschaft, Industrie, Haushalten und Verkehr mit ca. 440 Gg N a<sup>-1</sup> (UBA, 2012),
- ▶ die biologische N-Fixierung in der Landwirtschaft (BMEL, 2013) und in terrestrischen Ökosystemen (eigene Schätzung) mit zusammen etwa 275 Gg N a<sup>-1</sup> sowie
- ▶ der grenzüberschreitende Import von Stickstoff über die Flüsse in Höhe von etwa 320 Gg N a<sup>-1</sup> (Fuchs et al., 2010; UBA, 2014a) und die Atmosphäre mit ca. 250 Gg N a<sup>-1</sup> (Fagerli, 2012).

Wichtige bilanzinterne Flüsse sind die 890 Gg N, die pro Jahr als Wirtschaftsdünger auf die Felder ausgebracht werden und der nationale Absatz mineralischer Düngemittel von 1640 Gg N a<sup>-1</sup> (BMEL, 2013), was dem Großteil des industriell fixierten Stickstoffs entspricht. 665 Gg N stehen als landwirtschaftliche Produkte für den Lebensmittelkonsum bzw. die Lebensmittelproduktion zur Verfügung.

Die Entfernung reaktiven Stickstoffs aus dem Kreislauf ist bisher weniger gut erfasst. Über die Flüsse gelangen (ohne Berücksichtigung der gewässerinternen Retention) etwa 900 Gg gelöste Stickstoffverbindungen pro Jahr entweder direkt oder über angrenzende Nachbarländer in Meeres- und Küstenökosysteme (Fuchs et al., 2010) und die Atmosphäre transportiert jährlich etwa 560 Gg reaktiven Stickstoff ins Ausland (Fagerli, 2012). Eine wesentliche Entfernung von reaktivem Stickstoff stellt zudem die Denitrifikation (vgl. Box 4) dar. Aus der Abwasserbehandlung entweichen dabei 340 Gg N a<sup>-1</sup> (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA), 2011) als elementares N<sub>2</sub> in die Atmosphäre. Die Denitrifikation in Fließ- und Oberflächengewässern, in Agrarökosystemen, in natürlichen und naturnahen Ökosystemen, sowie im Grundwasser lässt sich mit den vorliegenden Werten derzeit noch nicht vollständig angeben<sup>3</sup>. Schließlich enthalten eine Vielzahl industrieller Produkte (z. B. Bau- und Werkstoffe, Farben) reaktiven Stickstoff. Erste Schätzungen gehen

<sup>2</sup> Im Folgenden wird als Einheit der Flüsse Gigagramm Reinstickstoff pro Jahr (Gg N a<sup>-1</sup>) verwendet. Ein Gigagramm entspricht 1000 Tonnen.

<sup>3</sup> Zwischen dem Stickstoffüberschuss in der Landwirtschaft und in naturnahen terrestrischen Ökosystemen und den ermittelten Emissionen in Luft und Oberflächengewässer ergibt sich eine Differenz von ca. 750 Gg N a<sup>-1</sup>. Ein Großteil dieser Menge wird denitrifiziert. Diese Schätzung stellt allerdings nur eine erste Näherung dar, da (I) unterschiedliche Datenquellen miteinander kombiniert werden und (II) die mögliche Anreicherung reaktiven Stickstoffs sowie der Zeitverzögerung bei der Grundwasserpassage vernachlässigt werden.

davon aus, dass in Europa pro Person und Jahr gut 10 kg reaktiven Stickstoffs für die Herstellung solcher Produkte benötigt wird (Sutton et al., 2011, Gu et al., 2013)<sup>4</sup>. Die Stoffflüsse (internationaler Handel, Zunahme des

Produktspeichers, Abfallentsorgung, Recycling) des in diesen Produkten gebundenen reaktiven Stickstoffs sind bisher allerdings kaum dokumentiert, weshalb die Bilanz an dieser Stelle noch deutliche Lücken aufweist.

#### Box 4

### Denitrifikation

Nitrat wird (als Teil der Stickstoffkaskade) in der Umwelt abgebaut, wobei elementarer Stickstoff und in Spuren Lachgas entstehen. Diese Denitrifikation findet in Oberflächengewässern, im Boden (sog. ungesättigte Zone) und im Grundwasserleiter (sog. gesättigte Zone) sowie in Kläranlagen statt. Der Nitratabbau erfolgt unter sauerstofffreien Bedingungen und meist durch Mikroorganismen. Als nötiger Reaktionspartner („Reduktionsmittel“) kommen in Betracht:

- organische Kohlenstoffverbindungen (heterotrophe Reduktion) und
- anorganische Verbindungen v. a. Eisensulfide (autolithotrophe Reduktion).

In Böden und Oberflächengewässern spielt ausschließlich die Reaktion mit organischem Kohlenstoff eine Rolle. Aufgrund der Reaktionsbedingungen (z. B. Sauerstoffgehalt, Überschuss von Nitrat) erfolgt dort selten ein vollständiger Abbau. Durch den Abbau von Biomasse werden organischen Kohlenstoffverbindungen regelmäßig nachgeliefert. Anders in Grundwasserleitern: hier sind die Gehalte an organischem Kohlenstoff meist gering, was das Abbauvermögen erheblich begrenzt. Noch entscheidender ist aber: Erfolgt der Nitratabbau über die Oxidation von Eisensulfiden (also Mineralien), so werden diese schrittweise aufgebraucht (da eine Bildung bzw. Nachlieferung dieser Mineralien nicht möglich ist). Das Abbaupotential erschöpft sich also zunehmend, so dass es letztlich relativ kurzfristig zu einem dauerhaften Anstieg der Nitratkonzentrationen kommen kann (Bergmann et al., 2014, Hansen et al., 2011).

Die Denitrifikation liefert einen entscheidenden Beitrag zur Minderung der Belastung durch reaktiven Stickstoff. Es muss allerdings berücksichtigt werden, dass der Nitratabbau immer auch mit unerwünschten Nebenwirkungen verknüpft ist (z. B. der Freisetzung von Lachgas oder dem Verbrauch nicht-regenerativer Abbaupotentiale) und dass dabei, für die Landwirtschaft wertvoller, Dünger ungenutzt verloren geht.

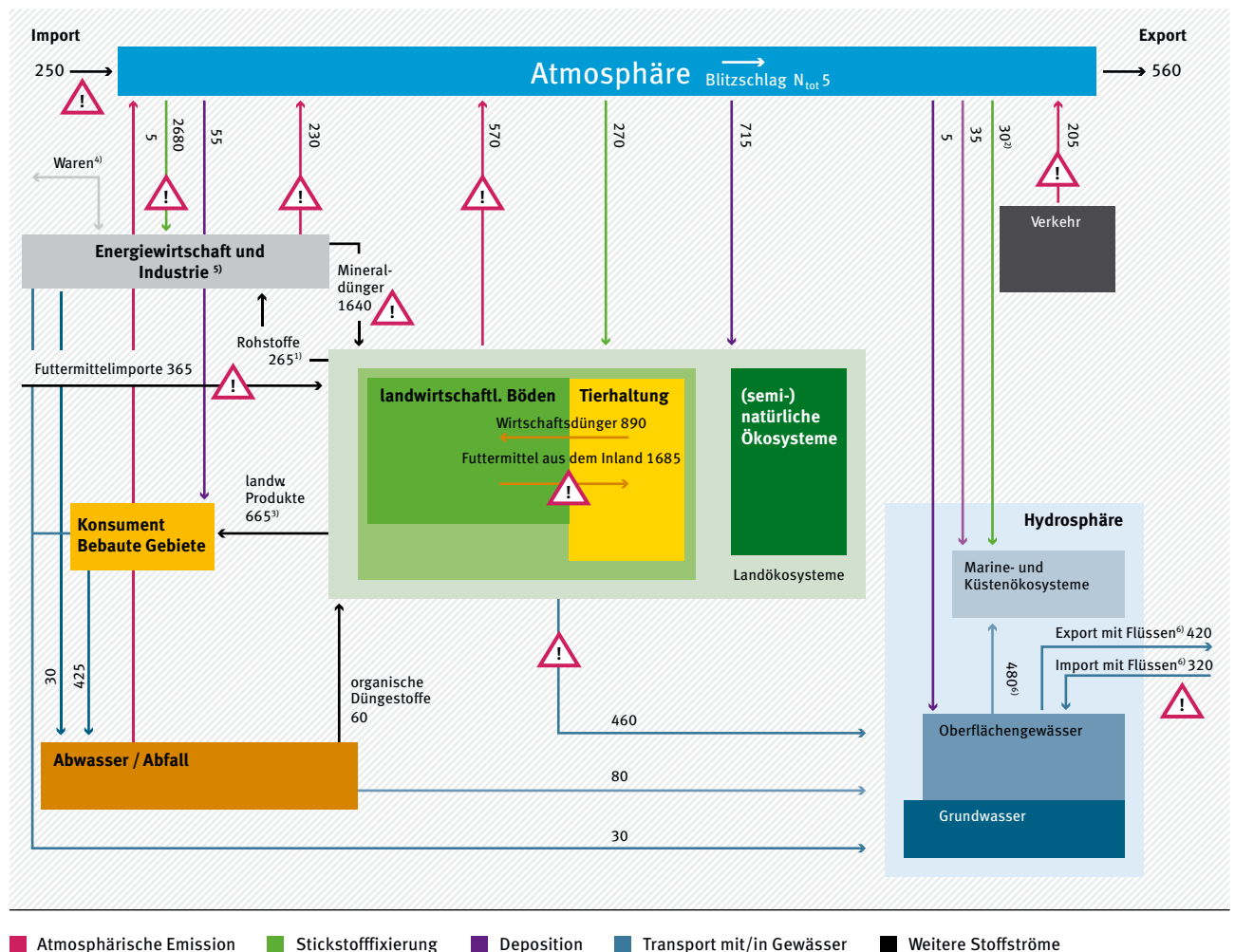
Eine regionale Quantifizierung der Denitrifikation ist nach wie vor sehr schwierig und stellt derzeit eine der wesentlichen Unsicherheiten bei der Erstellung von Stickstoffbilanzen dar (Groffman, 2012, Schlesinger, 2009, Bach, 2010).

<sup>4</sup> In Deutschland werden pro Jahr ca. 2700 Gg N industriell fixiert und 1640 Gg N davon als Mineraldünger abgesetzt. Die verbleibenden gut 1000 Gg N a<sup>-1</sup> (oder 12,5 kg N pro Person und Jahr) sind somit Ausgangsmaterial für weitere industrielle Prozesse.



Abbildung 10

## Die wichtigsten Flüsse reaktiven Stickstoffs in Deutschland (alle Werte in Gg N a<sup>-1</sup>)



Alle Werte wurden auf 5 Gg N a<sup>-1</sup> gerundet. Die Daten beziehen sich – soweit verfügbar – auf Mittelwerte der Jahre 2008-2010. Waren diese nicht verfügbar, so wurde der Wert des Jahres 2010 bzw. der letzte, aktuell verfügbare Wert verwendet. Die Daten für Gewässer beziehen sich auf den Zeitraum 2006-2011. Die Daten für die atmosphärische Deposition beziehen sich auf die Jahre 2005-2007. Für Details vgl. Anhang 1.

Der Import von Wirtschaftsdünger (v. a. Gülle und Geflügeltrockenkot) und der Import von Biomasse als Gärsubstrat (ebenso wie eventuelle Exporte) sind in der Bilanz nicht enthalten. Für den betrachteten Zeitraum dürfte dies eine Nichtberücksichtigung von mindestens 20 Gg N a<sup>-1</sup> bedeuten. Ebenso sind landwirtschaftsinterne Ströme pflanzlicher Gärreste derzeit noch nicht berücksichtigt (ca. 100-150 Gg N a<sup>-1</sup>).

Die Dreiecksymbole zeigen wichtige – aus nationaler Sicht – Ansatzstellen für Maßnahmen auf (vgl. Kapitel 5).

- 1) Enthält Industriepflanzen (Zuckerrüben, Tabak, Faserpflanzen, etc.) sowie eine erste Schätzung für den Stickstofffluss durch geerntetes Holz (70 Gg N a<sup>-1</sup>).
- 2) Nur Ostsee.
- 3) Enthält alle tierischen und pflanzlichen Produkte mit Ausnahme der Futtermittel und der Industriepflanzen. Verluste, die bei Weiterverarbeitung, Vertrieb und Konsum auftreten, sind darin noch enthalten.
- 4) Der Stickstofffluss in industriellen Produkten kann derzeit noch nicht quantifiziert werden.
- 5) Inkl. Kleinf Feuerung in Haushalten.
- 6) Die Im- und Exporte können derzeit nur ohne Berücksichtigung der gewässerinternen Retention angegeben werden, da die Werte für den Betrachtungszeitraum noch nicht vorliegen. Ältere Auswertungen zeigen, dass die Retention (insb. Denitrifikation) u. a. in Abhängigkeit der Fließstrecke bis zu 50 Prozent betragen kann (Fuchs et al., 2010).

## 4.2 Vergleich des nationalen Kreislaufs mit der europäischen und globalen Skala

Auch für die globale und die europäische Ebene stehen Quantifizierungen des Stickstoffkreislaufs zur Verfügung (Fowler et al., 2013, Sutton et al., 2011). Eine Gegenüberstellung der Schätzungen für den Eintrag reaktiven Stickstoffs in den Kreislauf auf nationaler, kontinentaler

und globaler Ebene (Tab. 1) zeigt, dass auf globaler Ebene natürliche Prozesse wegen der flächenmäßigen Bedeutung der Ozeane in weitaus größerem Maße zum Stickstoffkreislauf beitragen als in den anthropogen intensiv geprägten Regionen Europa und Deutschland.

Tabelle 1

### Eintragsraten (in 1000 Gg N a<sup>-1</sup>) reaktiven Stickstoffs in die Umwelt

	Global	Europa	Deutschland
Biologische N-Fixierung	58,0 (14,0 %)	0,3 (1,5 %)	0,1 (2,0 %)
Blitzschlag	5,0 (1,0 %)		
N-Fixierung in Ozeane	140,0 (34,0 %)	0,5 (2,5 %)	
Gesamt	203,0 (49,0 %)	0,8 (4,0 %)	0,1 (2,0 %)
Haber Bosch	120,0 (29 %)	16,6 (74 %)	2,7 (74 %)
Biologische N-Fixierung in der Landwirtschaft	60,0 (15 %)	1,0 (4 %)	0,2 (6 %)
Futtermittelimporte		0,5 (2 %)	0,4 (10%)
Verbrennungsprozesse	30,0 (7 %)	3,7 (16 %)	0,4 (10 %)
Gesamt	210,0 (51 %)	21,8 (96 %)	3,6 (98 %)
Gesamt	413,0 (100 %)	22,6 (100 %)	3,7 (100 %)
Flächenbezogen [ kg ha <sup>-1</sup> ]	8	53	103

Global: Fowler et al. (2013), Europa: Sutton et al. (2011), Deutschland: diese Studie

## 4.3 Die Emissionen reaktiven Stickstoffs in die Umwelt

Neben der Intensität des Stickstoffkreislaufs (also der gesamten Menge Stickstoff im Kreislauf) stellen die Emissionen reaktiven Stickstoffs in die Umwelt aufgrund des direkten Bezugs zu den Wirkungen eine wichtige Größe dar. Tabelle 2 fasst die mittleren jährlichen Emissionen in Deutschland in die Umwelt differenziert nach den wichtigsten Stickstoffverbindungen und den bedeutendsten Emittentengruppen zusammen.

Die Zahlen zeigen, dass die Landwirtschaft mittlerweile der bedeutendste Sektor für die Freisetzung reaktiven Stickstoffs in die Umwelt ist. Aufgrund der größeren

Minderungserfolge in anderen Sektoren stieg der Anteil der Landwirtschaft an den verbliebenen Emissionen über die vergangenen 20 Jahre an, obwohl auch die landwirtschaftlichen Emissionen infolge ergriffener Minderungsmaßnahmen langsam abnehmen. So stammte in den 1990er Jahren noch weniger als die Hälfte der Emissionen reaktiver Stickstoffverbindungen aus der Landwirtschaft (Eichler and Schulz, 1998). Dies verdeutlicht, wie wichtig es ist, gerade im Bereich der Landwirtschaft die bestehenden Minderungspotentiale zu nutzen und entsprechende Maßnahmen zu ergreifen.

Tabelle 2

### Anteil der wichtigsten N-Verbindungen und Emittentengruppen an den mittleren jährlichen Gesamtemissionen in Luft und Oberflächengewässer innerhalb des aktuellen Bilanzierungszeitraums

	Luft			Wasser	Summe [Gg N a <sup>-1</sup> ]	Anteil [%]
	NO <sub>x</sub>	NH <sub>3</sub>	N <sub>2</sub> O	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>		
Landwirtschaft	33	435	88	424	980	63
Verkehr	192	13	2		207	13
Industrie/ Energiewirtschaft	166	15	27	10	218	14
Haushalte/ Kläranlagen/ Oberflächenablauf*	21	1	6	135	163	10
Summe [Gg N a <sup>-1</sup> ]	412	464	123	569	1568	100
Anteil [%]	26	30	8	36	100	

\* Enthält auch urbane Systeme sowie den gesamten Oberflächenabfluss, da derzeit keine Aufteilung in landwirtschaftliche und sonstige Flächen möglich ist. Die Luftemissionen beinhalten Feuerungsanlagen in Haushalten.

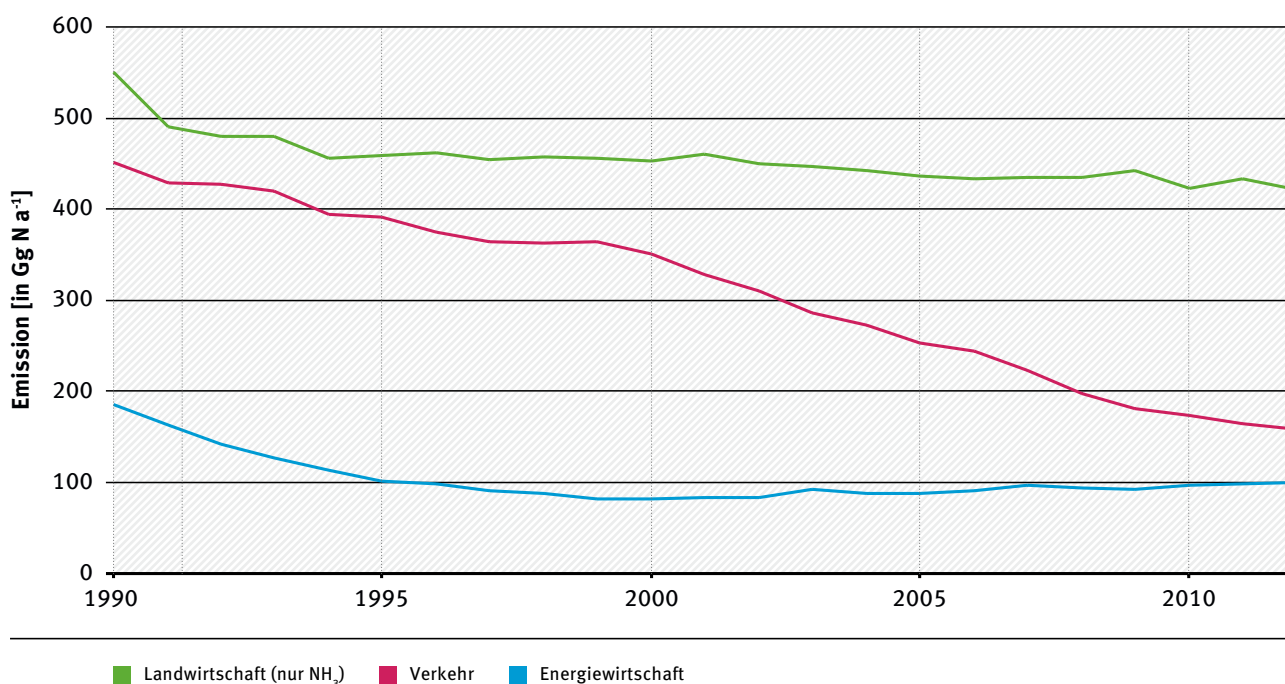
## 4.4 Zeitliche Änderung wichtiger Emissionen

Seit 1990 haben die Emissionen reaktiven Stickstoffs in die Luft deutlich abgenommen (Abb. 11). Die stärkste Minderung wies mit über 50 Prozent der Verkehrssektor

auf, bei dem insbesondere die sukzessive Einführung strengerer Abgasnormen (vgl. Box 4) zu einem deutlichen Rückgang der Emissionen führte – und dies trotz einer

Abbildung 11

### Zeitlicher Verlauf der NO<sub>x</sub>-Emissionen aus Verkehr und Energiewirtschaft, sowie der NH<sub>3</sub>-Emissionen aus der Landwirtschaft in die Luft



Zunahme der Verkehrsleistung zwischen 1991 und 2013 von 61 Prozent im Güterverkehr und 31 Prozent im Personenverkehr.

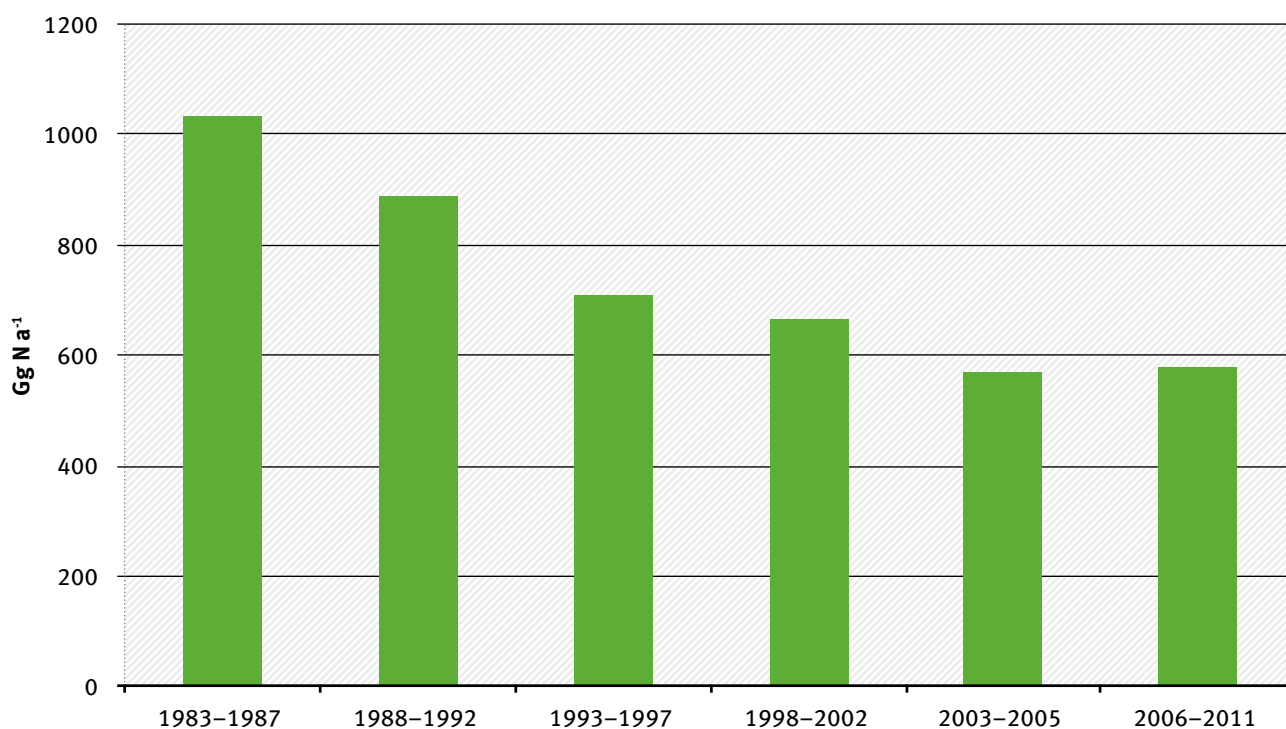
Die Emissionen des Energiesektors wiesen gleichfalls bis Anfang der 2000er Jahre eine deutliche Abnahme auf, zeigen aber in den letzten Jahren eine Stagnation bzw. wieder eine leichte Zunahme, die u. a. auf den vermehrten Einsatz von Biogas-Blockheizkraftwerken (BHKW) und von Biomasse-(Heiz)Kraftwerken zurückzuführen ist. Biogas erlebte v. a. zwischen 2007 und 2012 einen Boom. Pro produzierte Kilowattstunde erzeugt ein Verbrennungsmotor in einem Biogas-BHKW verglichen mit Großkraftwerken aber höhere  $\text{NO}_x$ -Emissionen, worin eine wesentliche Ursache für den Anstieg der Emissionen aus der industriellen Energieproduktion liegt.

Die Ammoniak-Emissionen aus der Landwirtschaft zeigen einen sehr deutlichen Rückgang zu Beginn der 1990er Jahre, der in erster Linie auf den Abbau von Tierbeständen zurückzuführen ist. Seither haben sie durchschnittlich nur noch um weniger als ein Prozent pro Jahr abgenommen.

Auch die Einträge von Stickstoff in Oberflächengewässern konnten seit Mitte der achtziger Jahre deutlich reduziert werden (UBA, 2009a). Allerdings kam es in den letzten betrachteten Perioden zu einer Stagnation (Abb. 12). Durch den deutlicheren Rückgang in den anderen Bereichen, stieg der Anteil der Verursacherguppe „Landwirtschaft“ an den Stickstoffeinträgen in Oberflächengewässern von 1983 bis 2011 kontinuierlich von 54 Prozent auf 79 Prozent an (Fuchs et al., 2010, UBA, 2014a und g).

Abbildung 12

### Zeitlicher Verlauf der Stickstoffeinträge in Oberflächengewässer



Fuchs et al., 2010, UBA, 2014a



## Entstehung reaktiven Stickstoffs bei Verbrennung

Bei der Verbrennung von Treib- bzw. Brennstoffen in kleinen und großen Feuerungsanlagen, in Gasturbinen und Verbrennungsmotoren sowie bei der Verbrennung von Abfällen entsteht reaktiver Stickstoff (als Stickstoffoxid,  $\text{NO}_x$ ), der in Abhängigkeit der Bildungsprozesse in drei Arten unterteilt wird:

- ▶ Treib- bzw. Brennstoff- $\text{NO}_x$ : Stickstoffoxide, die infolge des im Treib- bzw. Brennstoff enthaltenen Stickstoffs freigesetzt werden. Bei Einsatz von stickstoffarmen Treib- und Brennstoffen hängt die Höhe der beobachteten  $\text{NO}_x$ -Emission daher maßgeblich davon ab, inwieweit die beiden anderen Bildungsprozesse wirksam sind.
- ▶ Thermisches  $\text{NO}_x$ : Mit steigenden Verbrennungstemperaturen wird ein zunehmender Anteil des elementaren Stickstoffs ( $\text{N}_2$ ) aus der Verbrennungsluft in  $\text{NO}_x$  umgewandelt. Thermische  $\text{NO}_x$  dominieren die Emissionen bei hohen Verbrennungstemperaturen, wobei lokale Temperaturspitzen besonders emissionsrelevant sind. Da die energetische Effizienz der Anlagen (Nutzenergie/zugeführte Energie) mit der Erhöhung der mittleren Verbrennungstemperatur steigt, kann der vorliegende Zielkonflikt zum einen durch Maßnahmen zur Vermeidung von lokalen Temperaturspitzen und zum Anderen durch eine wirksame nachgeschaltete Einrichtung zur Reduktion der Stickstoffoxide entschärft werden.
- ▶ Promptes  $\text{NO}_x$ : Durch Treibstoffradikale, die bei der Verbrennung entstehen, wird elementarer Stickstoff ( $\text{N}_2$ ) aus der Verbrennungsluft in  $\text{NO}_x$  umgewandelt. Promptes  $\text{NO}_x$  ist in der Regel von untergeordneter Bedeutung.

Die Emission von  $\text{NO}_x$  lässt sich somit durch den Einsatz N-armer Brennstoffe, durch eine optimale Steuerung des Verbrennungsprozesses und durch Abgasnachbehandlungen (Reduktion von Stickstoffoxiden) reduzieren.

### Abgasnormen für Fahrzeuge:

Tabelle B 5.1: Vereinfachte Zusammenstellung der maximalen  $\text{NO}_x$ -Emissionswerte, die entsprechend der Abgasnormen eingehalten werden müssen. Für Details vgl.: <http://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/emissionsmindernde-anforderungen-im-verkehr>

	Einheit	Pkw / leichte Nutzfahrzeuge			Lkw		
		Euro 4	Euro 5	Euro 6	Euro IV	Euro V	Euro VI
Benzin	g/km	0,08	0,06	0,06			
Diesel	g/km	0,25	0,18	0,08			
Diesel	g/kWh				3,5	2,0	0,4

Bei den Emissionswerten stellt sich z. T. die Herausforderung, dass die im idealisierten Testverfahren für die Zulassung ermittelten Emissionen deutlich unter den Emissionen in der Praxis (real driving emissions) liegen können. Dieser Unterschied soll durch neue, angepasste Testzyklen reduziert werden. Zur besseren Absicherung sollten zudem mobile Emissionsmessungen (PEMS) eingesetzt werden.

## 5. Maßnahmen und Handlungsempfehlungen

Die negativen Umweltauswirkungen der hohen Stickstoffeinträge und das deutliche Verfehlen der umweltpolitischen Zielsetzungen machen den dringenden Bedarf für weitere Maßnahmen zur Verringerung der Verluste reaktiven Stickstoffs in die Umwelt deutlich.

Die Lösung der Stickstoffproblematik bedarf einer konsistenten Kombination unterschiedlicher Instrumente und muss die Änderungen der ordnungspolitischen Rahmenbedingungen, die Einführung ökonomischer Anreize und die Verbesserung der Information und Beratung auf allen gesellschaftlichen Ebenen beinhalten. Synergien ergeben sich u. a. mit einigen bereits ergriffenen bzw. eingeleiteten Maßnahmen zum Klimaschutz, da z. B. eine erhöhte Energieeffizienz oder veränderte Verkehrssysteme auch zu einer Entspannung der Stickstoffproblematik beitragen; bei der Nutzung von Biomasse als Energiequelle treten allerdings Zielkonflikte auf.

Die Betrachtung der nationalen Bilanz (Abb. 10) zeigt auf, an welchen Stellen im Kreislauf zusätzliche Maßnahmen in Deutschland ergriffen werden sollten, um die übermäßige Belastung der Umwelt durch reaktiven Stickstoff deutlich zu vermindern:

- ▶ Die größten absoluten Minderungspotentiale bestehen in der Landwirtschaft bzw. beim Konsum landwirtschaftlicher Produkte. Die vorgeschlagene Absenkung des Stickstoffüberschusses in der Gesamtbilanz von heute  $95 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  auf  $50 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  im Jahr 2040 entspricht einer Reduktion des Gesamtüberschusses von rund  $700 \text{ Gg N a}^{-1}$ . Wesentliche Ansatzpunkte dafür wären u. a. die Erhöhung der Stickstoffeffizienz über die Vermeidung unproduktiver Verluste und eine Reduktion des (Kraft-)Futtermittelbedarfs z. B. durch eine stärker pflanzenbasierte Ernährung bei insgesamt reduziertem Fleischkonsum (UBA, 2013a). Durch den effizienteren Einsatz des Wirtschaftsdüngers und eine Reduzierung des Futtermittelbedarfs ließe sich auch der Mineraldüngereinsatz verringern.
- ▶ Bei den Emissionen in Luft und Wasser aus Industrie, Energiewirtschaft, Verkehr und Haushalten besteht durch weitere Maßnahmen bis 2030 ebenfalls ein zusätzliches Minderungspotential.

- ▶ Die Stoffflüsse von reaktivem Stickstoff in industriellen Produkten sind derzeit noch unzureichend dokumentiert (vgl. Kap. 4). Klar ist jedoch, dass sich durch eine effizientere Nutzung und vermehrte Wiederverwendung der Bedarf für die industrielle Stickstofffixierung insgesamt reduzieren ließe (Gu et al., 2013).
- ▶ Schließlich sollte durch internationale Zusammenarbeit der grenzüberschreitende Transport reaktiver Stickstoffverbindungen über Flüsse und die Atmosphäre weiter reduziert werden.

### 5.1 Landwirtschaftspolitik

Die Bilanzierung (Kap. 4) zeigt, dass etwa zwei Drittel der Verluste reaktiven Stickstoffs in die Umwelt aus der Landwirtschaft stammen; die Neuausrichtung der Landwirtschaftspolitik ist daher ein entscheidender Ansatzpunkt für eine Verringerung der Stickstoffbelastung. Die Maßnahmen mit der höchsten Kosteneffizienz finden sich in Deutschland und in vielen anderen europäischen Staaten mittlerweile in der Landwirtschaft (International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), 2014, UBA, 2009a).

Um diese Herausforderungen im Bezug auf den reaktiven Stickstoff anzugehen und eine nachhaltige, wettbewerbsfähige und produktive Landwirtschaft zu erreichen, müssen die ordnungsrechtlichen und förderpolitischen Rahmenbedingungen angepasst und aufeinander abgestimmt werden (Möckel et al., 2014). Die Kommission Landwirtschaft am Umweltbundesamt (KLU) hat hierzu wegweisende Vorschläge gemacht (KLU, 2013b). Sie betreffen u. a. die Begrenzung der Tierbesatzdichte, maximale Stickstoffsalden sowie einen Mindestanteil von Leguminosen in der Fruchtfolge als verpflichtende Vorgabe für den Anspruch auf Fördermittel oder die Einführung von Beweidungsprämien. Trotz einiger Verbesserung und des eingeleiteten Paradigmenwechsels wird die nun beschlossene Reform der gemeinsamen Agrarpolitik der EU für sich genommen kaum zu einer Entspannung der Stickstoffproblematik beitragen. In einigen Regionen wird die Stickstoffproblematik durch den Anbau von Energiemais zusätzlich verschärft, v. a. durch den Anfall reakti-

ven Stickstoffs aus dem pflanzlichen Anteil der Gärreste und ein häufig erhöhtes Nitrat-Auswaschungspotenzial nach Maisanbau im Herbst. Schließlich führt ein Umbruch von Grünland dazu, dass große Teile des darin festgelegten Stickstoffs an das Grundwasser und an die Atmosphäre verloren gehen. Es ist daher entscheidend Grünlandumbrüche so weit wie möglich zu vermeiden. Auch in diesen Bereichen ist somit ein Umsteuern nötig. Die entsprechenden Vorschläge der Kommission Landwirtschaft am Umweltbundesamt sollten daher durch Bundesregierung und Länder bei der nationalen Umsetzung und der Ausgestaltung weiterer Reformen Berücksichtigung finden (KLU, 2013a und b).

Das Beispiel Dänemark zeigt, dass durch die Umsetzung verbindlicher Maßnahmen gekoppelt mit einer detaillierten Erhebung und einem effektiven Vollzug eine deutliche Entspannung der Stickstoffproblematik erzielt werden kann. Ohne die Wettbewerbsfähigkeit der Landwirtschaft wesentlich zu beeinflussen, konnten in Dänemark die Ammoniak-Emissionen seit 1990 um gut 40 Prozent reduziert werden; der Stickstoffüberschuss ging in der gleichen Zeit ebenfalls um etwa 40 Prozent zurück. Die Verbesserung der Situation zeigt sich mittlerweile auch an rückläufigen Nitratauswaschungen und Stickstoffdepositionen.

Im Folgenden sind einige wichtige Handlungsfelder benannt, auf denen die erwähnten Herausforderungen kurzfristig angegangen werden können. Wichtiger Ansatzpunkt ist dabei eine Steigerung der Stickstoffeffizienz.

### Düngeverordnung novellieren

Ein zentrales Steuerungsinstrument für den Umgang mit Stickstoff in der Landwirtschaft und damit für den Abbau von Stickstoffüberschüssen ist die Düngeverordnung. Derzeit läuft eine Revision dieser Verordnung, zu der eine vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft eingesetzte Evaluierungsgruppe der Agrarministerien der Länder (mit Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) und UBA; Federführung: Thünen-Institut) Vorschläge unterbreitet hat (Osterburg and Techen, 2012). Wesentliche Aspekte dabei sind:

- ▶ eine verbesserte Düngeplanung und Nährstoffbilanzierung, die eine Optimierung des betrieblichen Nährstoffkreislaufs ermöglicht (inkl. einer Plausibilitätsprüfung der N-Abfuhr über das Grundfutter);
- ▶ die Beratungspflicht bei wiederholter Überschreitung maximaler Nährstoffsalden;
- ▶ Einschränkungen bei den Zeiten, zu denen Wirtschaftsdünger ausgebracht werden darf;
- ▶ Vorgaben für die unverzügliche Einarbeitung auf unbestellten Flächen und für die Ausbringungstechnik, d. h. Verpflichtung zur bodennahen, emissionsarmen Ausbringung von Gülle;
- ▶ die Einbeziehung aller organischen Düngemittel (also auch von Gärresten) in die Ausbringungsobergrenze von  $170 \text{ kg N ha}^{-1}$ ;
- ▶ Festlegung einheitlich vorzuhaltender Lagerkapazität für flüssigen Wirtschaftsdünger für eine Mindestlagerdauer von neun Monaten.

In Anbetracht der anhaltenden Überschreitung der Nitrat-Grenzwerte im Grundwasser und des anhängigen Vertragsverletzungsverfahrens sollte alle Vorschläge in die Diskussion einbezogen werden.

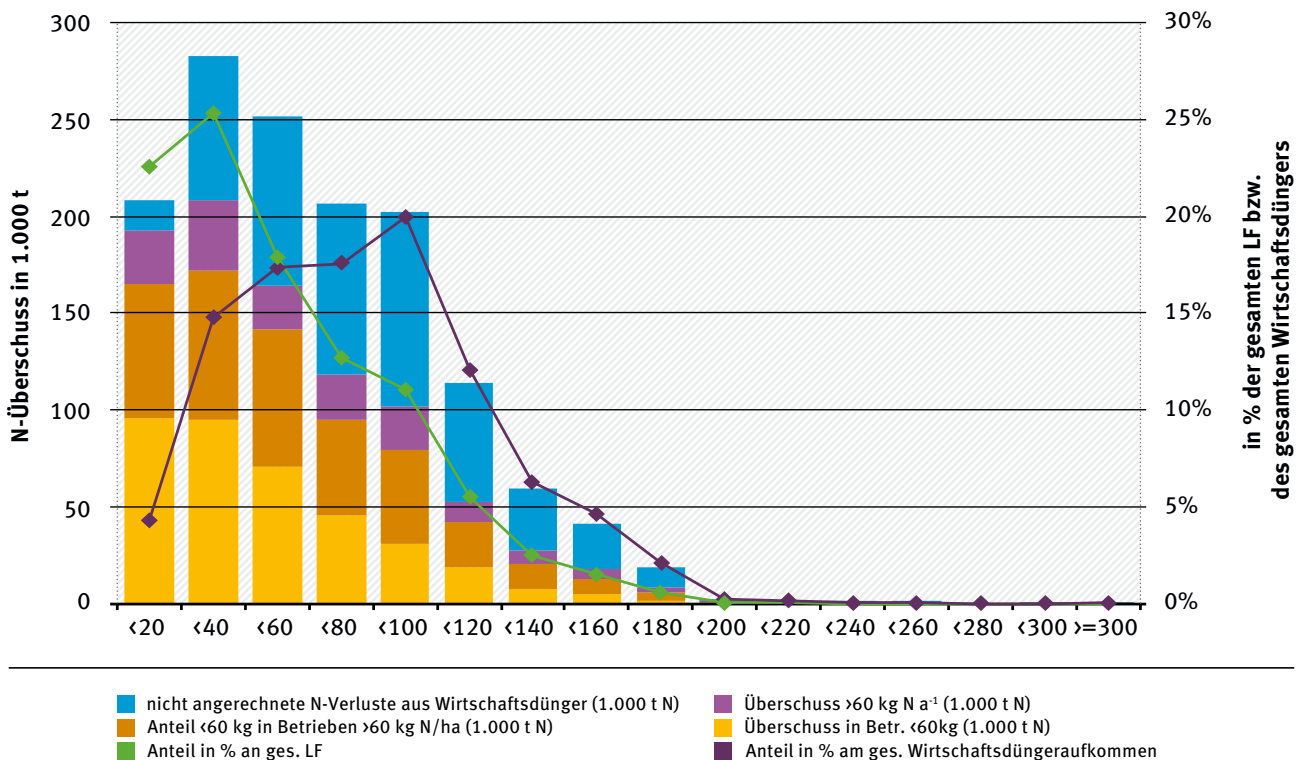
In einer gemeinsamen Erklärung haben auch die Wissenschaftliche Beiräte für Agrarpolitik (WBA) und für Düngungsfragen (WBD) sowie der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) eine Novellierung der Düngeverordnung entlang der erarbeiteten Grundlinien empfohlen und weitergehende Vorschläge gemacht (WBA, WBD & SRU, 2013). So sollte u. a. in die Zielsetzungen der Düngung nach guter fachlicher Praxis im Düngegesetz (§ 3 Abs. 2), die weitgehende Vermeidung von Gefahren für den Naturhaushalt explizit mit aufgenommen werden (WBA, WBD & SRU, 2013).

Abbildung 13

## Geschätzte N-Überschüsse in Abhängigkeit der N-Zufuhr aus organischen Düngemitteln pro ha landwirtschaftlicher Nutzfläche (pro Gemeinde; diese Größe korreliert in etwa mit der Tierbesatzdichte)

Die hellgelben Balken sind Betriebe, deren N-Salden nach der (entsprechend der Vorschläge) novellierten DüV, unter den Vorgaben liegen; die dunkelgelben und roten Blaken sind Betriebe, deren N-Salden über den gesetzlichen Vorgaben liegen, wobei der rote Anteil reduziert werden muss; die blauen Balken geben die atmosphärischen Verluste an, die in der DüV nicht berücksichtigt werden. Die Abbildung zeigt, dass Stickstoffüberschüsse in allen Arten von Betrieben reduziert werden müssen (Osterburg and Tehen, 2012)

N-Zufuhr in organischen Düngemitteln in kg pro Hektar LF (Gemeinden, nach 170er Grenze berechnet)



Durch die Umsetzung dieser Empfehlungen ließe sich der Gesamtüberschuss in der Landwirtschaft um 20 Prozent oder rund 300 Gg N a<sup>-1</sup> reduzieren (Abb. 13). Dadurch wäre das derzeitige Ziel einer Begrenzung des nationalen Stickstoffüberschusses auf 80 kg N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> (vgl. Box 2) erreichbar. Für einen weitergehenden Schutz der Ökosysteme sollten zukünftig folgende Anforderungen in der Düngeverordnung geregelt werden:

### ► Zulässige Höchstmengen absenken

Eine stärkere Orientierung der zulässigen Düngermengen am tatsächlich notwendigen Nährstoffbedarf der angebauten Kulturen und eine Absenkung der Obergrenzen für die Ausbringung von Stickstoff aus Wirt-

schaftsdünger um dessen effiziente Ausnutzung zu gewährleisten (Gutser et al., 2010).

### ► Atmosphärische Verluste minimieren

Zur Vermeidung atmosphärischer Verluste sollte die Einarbeitung von ausgebrachtem Wirtschaftsdünger auf unbestellten Flächen innerhalb einer Stunde nach Ausbringung vorgeschrieben und die emissionsarme Anwendung<sup>5</sup> von Harnstoffdünger reguliert werden. Ferner sollte die Anwendung weiterer, sich entwickelnder, emissionsarmer Ausbringungstechniken (u. a. Schlitztechnik, Strip-Till-Verfahren) in Abhängigkeit gemachter Praxiserfahrungen und nach angemessenen Übergangsfristen für spezifische Anwendungen verpflichtend sein.

<sup>5</sup> Technisch kommen hierfür z. B. der Ausschluss bestimmter, besonders emissionskräftiger Anwendungen (z. B. auf Grünland), die Pflicht zur Ausbringung mit bestimmten Techniken (z. B. Injektion) oder eine (europäisch) vorgegebene Formulierung (z. B. in Kombination mit temporär wirksamen Urease-Inhibitoren) in Frage.



► **Ausbringen von Düngemitteln auf stark geneigten Flächen**

Nach den Vorgaben der Düngeverordnung hat der Landwirt bei der Ausbringung von Düngemitteln mit wesentlichen Gehalten an Stickstoff dafür Sorge zu tragen, dass kein Abschwemmen in oberirdische Gewässer erfolgt. Zur Verbesserung des Biotopschutzes sollte in diese Vorschrift künftig auch das Abschwemmen auf Nachbarmflächen einbezogen werden. Um Abschwemmungen von stark geneigten Flächen künftig noch effektiver zu verhindern, sollen die Abstandswerte zu Böschungskanten vergrößert und Werte der Hangneigung, für die die Abstandswerte einzuhalten sind, verkleinert werden.

► **Ausbringen von Düngemitteln in der Nähe von Wasserläufen**

Die dazu bestehende Regelung in der Düngeverordnung sollte so weiter entwickelt werden, dass das Aufbringen von stickstoff- oder phosphathaltigen Düngemitteln und Kultursubstraten innerhalb eines Abstands von fünf Meter zur Böschungsoberkante von oberirdischen Gewässern (zumindest der 1. und 2. Ordnung) künftig vollständig verboten ist.

► **Absenkung der zulässigen Überschüsse des Nährstoffvergleiches und Hoftorbilanzierung**

Die zulässigen Flächenbilanzüberschüsse des Nährstoffvergleiches nach Düngeverordnung müssen zukünftig gesenkt werden, um die Verluste an die Umwelt weiter zu minimieren und das vorgeschlagene nationale Ziel eines Stickstoffüberschusses in der Gesamtbilanz (Box 2) von  $50 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  zu erreichen. Die Bilanzierungsvorgaben der Düngeverordnung sollten zudem zukünftig um eine Hoftorbilanzierung ergänzt werden, wodurch auch atmosphärische Verluste und Futtermittelströme Berücksichtigung fänden und die hier möglichen Verbesserungspotentiale deutlich sichtbar würden. Ferner ist es erforderlich die verwendeten Berechnungsfaktoren, die für die Stickstoffausscheidung pro Tier oder für atmosphärische Verluste vorgeben werden, regelmäßig zu evaluieren und an den aktuellen Stand anzupassen (UBA, 2009a).

► **Bessere Einhaltung der Vorgaben der Düngeverordnung**

Verstöße gegen die Begrenzungen des Ausbringens von Düngemitteln, Überschreitungen der zulässigen Überschüsse im Nährstoffvergleich und Vorgaben zu Abschwemmungsereignissen sollten zukünftig zu einer

Beratungspflicht führen und – bei wiederholten, deutlichen Verstößen – als bußgeldbewehrte Ordnungswidrigkeiten verfolgt werden.


Um eine bedarfsgerechte Düngung mit Wirtschaftsdüngern zu gewährleisten und die gesetzlichen Vorgaben effizient zu vollziehen, sollte ein Abgleich der Daten aus unterschiedlichen Quellen regelmäßig erfolgen. Wesentlich sind hierbei u. a. die erstellten Nährstoffsalden nach Düngeverordnung, Angaben zu den zwischen Betrieben verbrachten Wirtschaftsdüngermengen, die Tierbestände und die bei Anlagengenehmigungen vorzulegenden Nachweise zur Verwendung des Wirtschaftsdüngers. Die Aufzeichnungen über die Verbringung von Wirtschaftsdüngern und Gärresten nach der Verordnung über das Inverkehrbringen und Befördern von Wirtschaftsdünger (WDüngV) können von den Ländern über Meldeverordnungen bereits heute regelmäßig abgefragt werden. Für die nach Düngeverordnung ermittelten Nährstoffsalden sollte die Möglichkeit für eine solche Abfrage in Zukunft geschaffen oder eine regelmäßige Übermittlung verpflichtend vorgegeben werden. Auch für weitere wichtige Daten, wie der Einsatz von Bioabfällen oder Informationen aus Bodenuntersuchungen über die Versorgung der Böden (Landwirtschaftskammer Niedersachsen (LWKNI), 2013), sollten entsprechende Meldepflichten eingeführt werden.

Zur Novellierung der Düngeverordnung (DüV) hat auch die Kommission Landwirtschaft beim UBA (KLU) Stellung bezogen (KLU, 2014). Sie empfiehlt unter anderem eine weitere Senkung der zulässigen N-Überschüsse, die Einführung der (weniger manipulationsanfälligen) Hoftorbilanz auf Betriebsebene, eine Verlängerung von Sperrfristen für die Wirtschaftsdünger-Ausbringung sowie eine entsprechende Ausweitung der Lagerkapazitäten. Zur weiteren Minderung der Umweltbelastung mit Stickstoff (und anderen) aus der Landwirtschaft empfiehlt sie ferner bundeseinheitliche Standards für Anlagen, in denen mit Jauche, Gülle und Silage-Sickersäften umgegangen wird (JGS-Anlagen). Entsprechende Regelungen seien in die neue Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV) aufzunehmen.

**Zusätzliche Agrarförderung nutzen**

Die Agrarförderung ist ein wesentliches Instrument um stickstoffeffiziente Produktionssysteme, wie den ökologischen Landbau<sup>6</sup> (Schulz et al., 2009, Flessa et al., 2012, Bach, 2013), zu fördern und über das gesetzlich vorgegebene Maß hinausgehende Umweltleistungen zu hono-

<sup>6</sup> Ökologisch wirtschaftende Betriebe weisen z. B. im Vergleich zu konventionellen Betrieben in der Regel eine deutlich höhere Stickstoffeffizienz und niedrigere Stickstoffüberschüsse auf. Für Details: <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/foerderung-des-oekolandbaus-als-strategischer>

A close-up, slightly out-of-focus photograph of a person working in a field. The person is wearing a wide-brimmed straw hat with a black and white striped band and a red, white, and blue plaid shirt. They are surrounded by lush green foliage, likely tomato plants, with some leaves in the foreground being very close and blurred. The background is a soft-focus green field.

Eine verlässliche und ausreichende Förderung der Umstellung auf ökologische Landwirtschaft muss auch in Zukunft gewährleistet sein.





rieren, so z. B. die Förderung der bisher nicht verpflichtenden emissionsarmen Ausbringung. Eine verlässliche und ausreichende Förderung der Umstellung auf ökologische Landwirtschaft muss deshalb auch in Zukunft angeboten werden. Programme zur flächenbezogenen und ggf. investiven Förderungen emissionsarmer Ausbringungstechniken sollten von den Ländern über die zweite Säule der Agrarförderung weiterhin angeboten und soweit möglich ausgeweitet werden. Das Agrarinvestitionsförderungsprogramm (AFP; vgl. Rahmenplan der Gemeinschaftsaufgabe „Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes“) könnte als Instrument zur Reduktion von Stickstoffverlusten in die Umwelt, z. B. über die Förderung umweltgerechter Stallgebäude, viel stärker genutzt werden.

### Überregionalen Nährstoffausgleich anstreben

Derzeit fallen in einigen Regionen mit hohen Tierkonzentrationen Güllemengen an, die lokal nicht mehr sinnvoll verwertet werden können (LWKNI, 2013). Durch den Export der Nährstoffe in Gebiete mit Wirtschaftsdüngermangel ließen sich lokale Umweltbelastungen reduzieren und gleichzeitig die Stickstoffeffizienz durch Einsparung von Mineraldünger erhöhen. Eine wesentliche Voraussetzung dafür ist die Erhöhung der Transportwürdigkeit von Wirtschaftsdünger (z. B. durch fest-flüssig-Separation) und die Schaffung bzw. Wiederherstellung der Akzeptanz von Wirtschaftsdünger in aufnehmenden Regionen. Dieser Nährstoffausgleich kann durch eine angepasste Düngeverordnung und die Förderung entsprechender Techniken unterstützt werden. Wesentlich für die Überwachung und zur Politikberatung ist dabei eine quantitative Erfassung der resultierenden Wirtschaftsdüngerverbringungen (LWKNI, 2013, Möckel et al., 2014).

### Futtermittelbedarf reduzieren

Durch die hohen deutschen Tierbestände und die zunehmende Verwendung von Kraftfutter statt Grünlandaufwuchs auch für Wiederkäuer, wird derzeit fast die Hälfte der Ackerfläche für den Futtermittelanbau benötigt. Zudem ist die deutsche Landwirtschaft auf Futtermittelimporte von jährlich rund 400 Gg Stickstoff (vgl. Kap 4) angewiesen<sup>7</sup>. Diese Futtermittelimporte führen zu Flächenkonkurrenz sowie negativen ökologischen Auswirkungen im Ausland (Häusling, 2011, KLU, 2013a, UBA, 2013a) und sie tragen zur Entstehung des Stickstoffüberschusses mit seinen negativen Auswirkungen in Deutschland bei.

Eine Reduktion des Futtermittelbedarfs insgesamt, z. B. als Resultat einer stärker pflanzenbasierten Ernährung der Bevölkerung bei reduziertem Fleischkonsum, wäre eine wichtige Grundlage für die Senkung der Stickstoffüberschüsse und hätte eine Reihe weiterer positiver Auswirkungen z. B. auf den Klimaschutz zur Folge (UBA, 2013a). Daneben ist eine spezifische Reduktion der Futtermittelimporte anzustreben; wozu eine flächengebundene Tierhaltung und die Fütterung von Wiederkäuern mit Grünlandaufwuchs sowie der verstärkte Anbau von Eiweißpflanzen in Deutschland (Flessa et al., 2012) beitragen können.

### Ökonomische Steuerungsinstrumente einführen

Grundsätzlich können über ökonomische Instrumente effiziente Anreize für einen Abbau von Stickstoffüberschüssen oder einen verantwortungsvollen Konsum geschaffen werden. Dies muss aber im Rahmen eines kohärenten Gesamtkonzepts erfolgen, da ein erheblicher Vollzugsaufwand zu erwarten ist. Mögliche Elemente sind eine Abgabe auf Stickstoffüberschüsse (Möckel, 2006), die Anpassung des Mehrwertsteuersatzes für Fleischprodukte oder die Zuweisung maximal erlaubter Stickstofffrachten in einem Gebiet über handelbare Zertifikate (UBA, 2009a und 2013a, Lünenbürger et al., 2013).

Für den langfristigen Umbau des Stallgebäudebestands sollten möglichst frühzeitig Anforderungen festgelegt werden, die einen großen Teil der Tierbestände betreffen. Ein effektiver Ansatzpunkt liegt v. a. in der Schweine- und Geflügelhaltung im Bereich des Stalls. Einer Genehmigungspflicht nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz und damit den umfassenden immissionsschutzrechtlichen Anforderungen unterliegen derzeit rund 80 Prozent der Mastgeflügelbestände (oder 15 Prozent der Betriebe), aber nur gut 20 Prozent der Mastschweinebestände (oder drei Prozent der Betriebe). Eine wichtige Neuerung ist die Pflicht zum Einbau eines Filters bei großen, zwangsbelüfteten Schweinemastanlagen, die Anfang 2013 zwischen Bund und Ländern beschlossen wurde und nun möglichst zügig in die bundesrechtlichen Bestimmungen (TA Luft) Eingang finden sollte. Für die Geflügelmast sollte kontinuierlich evaluiert werden, ob bzw. wann die Weiterentwicklung der Technik eine vergleichbare Anforderung erlaubt. Die Regelungen sind dabei so auszugestalten, dass Verfahren, die für das Tierwohl einen deutlichen Vorteil bieten, in denen aber eine Abluftreinigung nur eingeschränkt möglich ist, nicht ausgeschlossen werden. Die

<sup>7</sup> Ein Grund für die starke Exportabhängigkeit bei der Eiweißpflanzenversorgung dürfte auch in den frühen Regelungen internationaler Handelsabkommen (im Rahmen der Kennedy Runde zur Verhandlung des GATT in den 1960er Jahren) liegen, in denen für Eiweißpflanzen – im Gegensatz zu anderen Agrarprodukten und als Gegenleistung für erleichterte Getreideexporte – die zollfreie Einfuhr nach Europa vereinbart wurde. Die Kombination führte dazu, dass die Eiweißpflanzenproduktion in Deutschland weniger attraktiv wurde und z. B. kaum Züchtungsanstrengungen mehr erfolgten (Häusling, 2011).



Abluftreinigung stellt einen wichtigen, aber bei Weitem nicht den einzigen Ansatzpunkt bei der Haltung dar. Daneben sind z. B. optimierte Fütterungssysteme, die Lagerung der Gülle in abgedeckten Lagern statt unterflur, vermehrter Weidegang, eine Verringerung der Stalltemperatur, die Nutzung von Wärmetauschern im Gülle(zwischen)lager, funktionelle Bodenbeläge oder die Kotbandtrocknung in der Geflügelhaltung zu nennen.

Die Investitionsförderung und ordnungsrechtliche Anforderungen können wesentlich zu einem emissionsarmen Stallgebäudebestand beitragen. Mögliche internationale Vergleichsmodelle bieten z. B. die „green label“-Ställe in den Niederlanden und Stallbauauflagen in Dänemark. Für kleinere Anlagen wären Genehmigungsaufgaben denkbar, die Emissionsminderungen gegenüber einer Referenz fordern, die Wahl der Mittel aber dem Betreiber überlassen (Jacobsen, 2012).

## 5.2 Luftreinhaltepolitik Novellierung der Europäischen Luftreinhaltepolitik

Die europäische Luftreinhaltepolitik reguliert den Schutz von Gesundheit und Ökosystemen über die Festlegung von Immissionswerten und Emissionsminderungsverpflichtungen. Auf diese Weise soll erreicht werden, dass sowohl schädliche Spitzenkonzentrationen vermieden werden, als auch, dass weiträumige Hintergrundbelastungen zurückgehen.

Die Festlegung nationaler Emissionsminderungsverpflichtungen fungiert in diesem Zusammenhang als wichtiger Treiber für Maßnahmen, die nicht durch anlagenbezogene EU-Vorschriften geregelt sind, insbesondere für diffuse Quellen. Im Rahmen der Genfer Luftreinhaltekonvention bestehen unter dem Göteborg-Protokoll seit 2012 weitergehende Emissionsminderungsverpflichtungen, die bis zum Jahr 2020 zu erreichen sind (vgl. Box 3). Zur Unterstützung der Umsetzung wurde ein Leitfaden erarbeitet, der effektive Maßnahmen zur Minderung von Ammoniak-Emissionen im Bereich der Landwirtschaft zusammenfasst (Bittman et al., 2014).

Ergänzend dazu hat die EU-Kommission Ende 2013 Vorschläge für eine Fortschreibung der EU-Richtlinie über nationale Emissionshöchstmenge (NEC-Richtlinie

2001/81/EG) mit Emissionsminderungsverpflichtungen, die bis zum Jahr 2030 einzuhalten sind, vorgelegt. Ziel ist es u. a., die Flächen auf denen die Critical Loads überschritten werden, bis 2030 in ganz Europa um 35 Prozent (im Vergleich zu 2005) zu reduzieren. Der Ableitung der vorgeschlagenen Minderungsverpflichtung liegt dabei eine Betrachtung der Kosteneffizienz der Maßnahmen zugrunde. Diesen Vorschlägen sollte daher weitgehend gefolgt werden.

Mittelfristig könnte die flankierende Einführung eines Konzentrationsgrenzwerts für Ammoniak zum Schutz von Ökosystemen, vergleichbar denen für NO<sub>2</sub> oder Feinstaub im Hinblick auf die menschliche Gesundheit, dazu beitragen, die Auswirkungen von reaktivem Stickstoff in den betroffenen Gebieten weiter zu reduzieren (Grennfelt et al., 2013).

## Stickstoffproblematik verstärkt bei der Luftqualitätsplanung berücksichtigen

In Genehmigungs- und Planfeststellungsverfahren muss mittlerweile auch die Wirkung von reaktiven Stickstoff auf Ökosysteme – vor allem wenn es sich dabei um europäische Naturschutzgebiete („FFH-Gebiete“) handelt – berücksichtigt werden (Kohls et al., 2014). Die Vorbelastung der Gebiete stammt aber häufig vornehmlich aus diffusen Quellen, die keiner Genehmigungspflicht unterliegen. Die Einführung einer nationalen und regionalen Luftqualitätsplanung zum Schutz der Ökosysteme (in Anlehnung an den Bewirtschaftungsansatz der Wasserrahmenrichtlinie) würde es ermöglichen, die Ökosysteme weiter zu entlasten und dem Verursacherprinzip stärker gerecht zu werden<sup>8</sup>.

## 5.3 Gewässerschutz

Die gewässerschutzrechtlichen Regelungen legen Umweltqualitätsstandards als Ziel verbindlich fest; bei der Wahl der Instrumente zur Erreichung der Ziele sind die zuständigen Behörden hingegen weitgehend frei. Im Hinblick auf die Landwirtschaft hat sich dabei die Nutzung von Agrarumweltprogrammen zur Umsetzung erforderlicher Maßnahmen bewährt. Die Erfahrung zeigt jedoch auch, dass solche freiwillige Maßnahmen für die Zielerreichung nicht immer ausreichend sind. Ergänzend sollte daher auch die Möglichkeit geschaffen werden, in bestimmten Gebieten verbindliche Vorgaben ordnungsrechtlich um-

<sup>8</sup> In den Niederlanden wird seit 2012 ein integrierter Ansatz zum Umgang mit Stickstoffdepositionen in Natura2000-Gebieten entwickelt (Programmatische Aanpak Stikstof): Genehmigungen (z. B. für neue landwirtschaftliche Anlagen oder Straßen) werden nur erteilt, wenn gesamthaft eine Absenkung der Deposition gewährleistet ist. Begleitend wurde dazu das AERIUS-Modellsystem als Planungsgrundlage aufgebaut und eine Fachkonvention für die anzuwendenden Critical Loads (Beurteilungswerte) erarbeitet.

zusetzen. Eine mögliche rechtliche Umsetzung bestünde darin, in der Düngeverordnung explizit zu fordern, dass die landwirtschaftliche Nutzung nicht zu einer Überschreitung der Ziele der Nitratrichtlinie (Nitratgehalt  $< 50 \text{ mg l}^{-1}$ ) führen darf und im Einzelfall zur Einhaltung auch Maßnahmen über die derzeit gesetzlich festgeschriebenen Vorgaben hinaus ergriffen werden müssen. Dies gilt vor allem für besonders austragsgefährdete Gebiete, denen in Zukunft mehr Beachtung geschenkt werden muss.

Durch die Festschreibung der Höchstkonzentrationen von 2,8 (Nordsee) bzw. 2,6 (Ostsee) mg Stickstoff pro Liter im Übergangsbereich limnisch – marin in der Oberflächengewässerverordnung könnte die Berücksichtigung des Meeresschutzes bei der Bewirtschaftungsplanung der Binnengewässer zusätzlich gewährleistet werden.

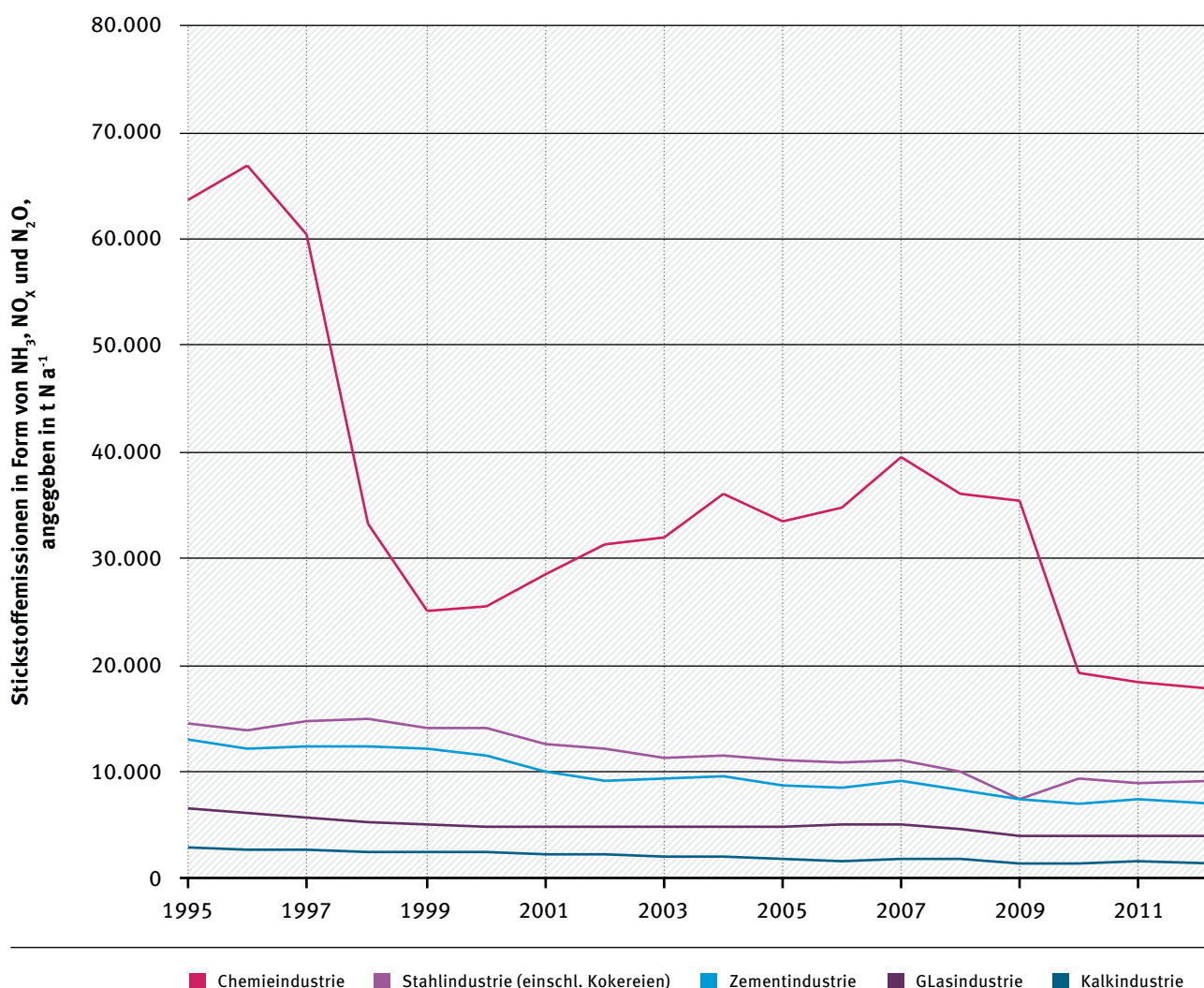
## 5.4 Energiewirtschaft und Kleinfuerung

Die Emissionen der Quellgruppe Energiewirtschaft zeigen in den letzten Jahren eine Stagnation und in Teilbereichen – insbesondere bei Einsatz von Biogas in Verbrennungsmotoranlagen – sogar Zunahmen der  $\text{NO}_x$ -Emissionen (vgl. Kapitel 4). Maßnahmen bei Biomassefeuerungen, Biogasmotoren und, wegen ihres nach wie vor dominierenden Anteils, auch bei Großfeuerungsanlagen, die fossile Brennstoffe wie Stein- und Braunkohlen oder Erdgas einsetzen, sind daher vielversprechend.

Zahlreiche bereits bestehende Regelungen werden in den kommenden Jahren voraussichtlich zu einem weiteren Rückgang der Emissionen aus der Energiewirtschaft führen.

Abbildung 14

### Entwicklung der Emissionen an reaktivem Stickstoff aus den emissionsrelevantesten Industriebranchen im Zeitraum 1995–2012



ren. So werden die Regelungen der Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen (1. BImSchV) Minderungen bei den Kleinfeuerungsanlagen (UBA, 2013b) und, in einem eher bescheidenen Maße, die Umsetzung der Emissionsgrenzwerte der EU-Industrieemissionsrichtlinie (IED) für Großfeuerungs- und Abfallverbrennungsanlagen Minderungen der  $\text{NO}_x$ -Emissionen aus der Energiewirtschaft bewirken. Technisch machbar wäre allerdings mehr, dazu könnten die Anforderungen an mittlere und große Feuerungsanlagen über die derzeitigen TA Luft- und IED-Grenzwerte hinaus verschärft werden (Jörß et al., 2014).

## 5.5 Industrie

Abbildung 14 zeigt die Entwicklung der Emissionen an reaktivem Stickstoff (in Form von  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  und  $\text{NO}_x$ ) aus den emissionsrelevantesten Industriebranchen, namentlich der Chemie-, der Stahl-, der Zement-, der Glas- und der Kalkindustrie. Im betrachteten Zeitraum von 1995 bis 2012 sind die Stickstoffemissionen in allen genannten Branchen deutlich zurückgegangen.

Dominiert wird der Verlauf der Stickstoffemissionen aus der Industrie durch die Entwicklung der Emissionen aus der Chemieindustrie, die Mitte der 1990er Jahre noch etwa zwei Drittel der gesamten Emissionen aus der Industrie ausmachten. Im betrachteten Zeitraum bis 2012 wurden diese Emissionen vor allem durch zusätzliche Maßnahmen zur Minderung der  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen aus der Adipinsäure- sowie der Salpetersäureproduktion um mehr als 70 Prozent gemindert. Im Zeitraum von 1999 bis 2007 haben allerdings Produktionsanstiege in diesen beiden Untersektoren wieder zu einem zwischenzeitlichen Anstieg der Stickstoffemissionen geführt.

Die Zementindustrie hat ihre Stickstoffemissionen im betrachteten Zeitraum vor allem durch den flächendeckenden Ausbau der SNCR-Technik zur  $\text{NO}_x$ -Minderung um etwa die Hälfte gemindert. Eine weitere deutliche Minderung wird die Zementindustrie in den nächsten Jahren (bis 2020) mit Hilfe der SCR-Technik erreichen, die mittlerweile durch zwei im Rahmen des Umweltinnovationsprogramms des BMUB geförderte Demonstrationsanlagen zur Anwendungsreife geführt wurde.

Die Stickstoffemissionen aus der Stahlindustrie sind im betrachteten Zeitraum vor allem durch einen höheren Anteil der Sekundärstahlerzeugung an der gesamten Stahl-

produktion, aber auch durch den vermehrten Einsatz von Primärmaßnahmen zur  $\text{NO}_x$ -Minderung um knapp 40 Prozent zurückgegangen. Die verbleibenden Stickstofffrachten stammen vor allem aus den Sinteranlagen sowie den Wärmeöfen der Walzwerke. Um die Stickstoffemissionen zukünftig weiter zu senken, muss auch hier die Anwendung sekundärer Minderungstechniken in Betracht gezogen werden.

In der Glasindustrie wurden die Stickstoffemissionen im betrachteten Zeitraum durch primäre und bei Neuanlagen sekundäre Maßnahmen um etwa 40 Prozent gemindert. Bei Primärmaßnahmen zur  $\text{NO}_x$ -Minderung (z. B. Oxy-Fuel-Brenner, optimierte nahstöchiometrische Verbrennung) steht das Ziel einer weitergehenden Minderung der  $\text{NO}_x$ -Emissionen allerdings in Konkurrenz zu Forderungen nach Begrenzung der CO-Emissionen.

## 5.6 Verkehr

Im Straßenverkehr werden die Stickstoffemissionen durch den zunehmend größeren Anteil von Fahrzeugen mit den Euro 6 bzw. VI Standards für Pkw und Nutzfahrzeuge an der Gesamtflotte in Zukunft noch erheblich abnehmen. Ein wesentliches zusätzliche Potential liegt in einer konsequenten integrierten verkehrsträgerübergreifenden Verkehrsplanung, mit dem Ziel eine nachhaltige Mobilität zu erreichen. Darüber hinaus sind auch in den anderen Verkehrsbereichen (Diesellokomotiven, Binnenschiffe und Flugverkehr) zusätzliche Maßnahmen mit deutlichen Minderungspotentialen denkbar.

### Straßenverkehr

Eine entscheidende Maßnahme ist die Einführung der Abgasstandards Euro 6, der für die Erstzulassung von Pkw ab September 2015 verpflichtend wird, und Euro VI, der für die Typprüfung von schweren Nutzfahrzeugen seit 2013 verbindlich ist. Zukünftig muss allerdings verstärkt darauf geachtet werden, dass die Einhaltung der Grenzwerte, die auf Testständen überprüft wird, auch zu entsprechenden Minderungen der Realemissionen (Real Driving Emissions) führt. Bei den neuesten Fahrzeugen, die den Abgasstandard Euro 6 erfüllen, liegen diese Realemissionen derzeit im Mittel mehr als siebenfach über dem entsprechenden Grenzwert (International Council on Clean Transportation (ICCT), 2014). Eine Minderung dieser Realemissionen könnte zum Beispiel die Integration mobiler Messungen (PEMS) in das Typengenehmigungsverfahren sicherstellen.

Daneben kommen eine Reihe nicht-technischer, schnell umsetzbarer Maßnahmen in Frage, mit denen sich in der Summe vielversprechende Minderungserfolge von reaktivem Stickstoff erreichen ließen. Dazu gehört u. a. die Einführung von Geschwindigkeitsbeschränkungen oder die Angleichung des Mineralölsteuersatzes für Dieselmotoren auf das Niveau des Mineralölsteuersatzes für Ottomotoren.

Einen grundsätzlich positiven Effekt auf die Verminderung von N-Emissionen hätte die verstärkte Verlagerung von Pkw-Fahrten auf den Umweltverbund (also nicht-motorisierte Verkehrsträger und öffentlicher Personenverkehr). Dies könnte durch eine Verbesserung der Bedingungen für den Umweltverbund und entsprechende Förder- und Informationskampagnen erreicht werden. Nicht zuletzt würde die Förderung des kraftstoffsparenden Fahrens, der Nutzung von Leichtlaufölen und -reifen und der Nachrüstung von schweren Nutzfahrzeugen (< Euro V) mit Verfahren der selektiven katalytischen Reduktion (SCR) zu einer weiteren Minderung von Stickstoffemissionen führen.

### Schienenverkehr und Binnenschifffahrt

Die derzeitige Grenzwertgesetzgebung für Emissionen von Diesellokomotiven endet mit der Einführung der Stufe IIIB im Jahr 2012 (Richtlinie, 2004/26/EG) die für die Binnenschifffahrt mit der Einführung der Stufe IIIA sogar schon im Jahr 2009 (Richtlinie, 2004/26/EG). Eine Fortschreibung der Grenzwerte für  $\text{NO}_x$  und Partikel auch für Diesellokomotiven und die Binnenschifffahrt wäre ebenfalls im Hinblick auf die Reduktion der Stickstoffemissionen sinnvoll. Motorinterne Maßnahmen würden zur Erreichung dieser fortgeschriebenen Grenzwerte in beiden Fällen nicht mehr ausreichen; es müssten nachgeschaltete Abgasreinigungssysteme wie Partikelfilter oder SCR zum Einsatz kommen. Durch die lange Nutzungsdauer der Lokomotiven und Schiffe dürften die Emissionsminderungen durch diese Maßnahmen nur langsam zur Geltung kommen, weshalb ihre Umsetzung möglichst frühzeitig erfolgen sollte. Hierzu hat die Europäische Kommission im Oktober 2014 einen Regelungsvorschlag unterbreitet.

### Flugverkehr

Beim Flugverkehr ließen sich durch eine Abgabensteuer weitere Minderungen bei den Stickstoffemissionen erreichen. Die Einführung einer Kerosinsteuer im inländischen Flugverkehr ist seit einigen Jahren EU-rechtlich möglich: die EG-Energiesteuerrichtlinie 2003/96/EG gibt den EU-Mitgliedstaaten die Möglichkeit, eine Steuer auf

kommerzielle Inlandsflüge zu erheben. Für die Einführung einer Kerosinsteuer wäre die Änderung des Mineralölsteuergesetzes notwendig.

## 5.7 Siedlungswasserwirtschaft

Der technische Stand der Aufbereitung des Abwassers ist in Deutschland sehr hoch: Über 95 Prozent des Abwassers werden einer Nitrifikation/Denitrifikation zugeführt, was den Eintrag von reaktivem Stickstoff in die Gewässer erheblich mindert. Insbesondere bei der Denitrifikation (vgl. auch Box 4) können als Nebenprodukt allerdings auch geringe Emissionen reaktiver Stickstoffverbindungen (vor allem Lachgas) entstehen. Die kontinuierliche Optimierung der Aufbereitungsmethoden wird den Austrag reaktiver Stickstoffverbindungen bei der Abwasserbehandlung zukünftig weiter reduzieren. Eine Reduzierung des Austrags reaktiver Stickstoffverbindungen aus Abwasserbehandlungsanlagen ließe sich auch durch eine Reduzierung des Eiweißkonsums der Bevölkerung erreichen (vgl. Kapitel 5.8).

Perspektivisch besteht auch die Möglichkeit einen Teil des im Abwasser enthaltenen reaktiven Stickstoffs nicht zu denitrifizieren (also in die molekulare Form des Luftstickstoffs zu überführen), sondern ihn abzutrennen, wieder als Dünger zu nutzen und damit den Bedarf an Mineraldünger zu reduzieren (Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2014, Sutton et al., 2011). In Deutschland sind bereits einige wenige Kläranlagen mit entsprechender Technik (Strippanlagen) ausgestattet<sup>9</sup>. Zur Verbesserung der Energiebilanz müssen diese Verfahren zwar noch weiter optimiert werden, sie könnten aber zukünftig eine sinnvolle und praxistaugliche Art der Stickstoffrückgewinnung darstellen.

## 5.8 Der Einfluss der Verbraucher

Der Eintrag reaktiven Stickstoffs in die Umwelt wird auch vom Konsumverhalten beeinflusst. So setzt die Produktion von Obst, Gemüse oder Fleisch ganz unterschiedliche Mengen (Leip et al., 2013) reaktiven Stickstoffs frei („Stickstoff-Fußabdruck“; Abb. 15). Somit reduziert z. B. ein verminderter Konsum von tierischem Eiweiß (Westhoek et al., 2014), die Emissionen reaktiven Stickstoffs und die damit verbundenen Umweltwirkungen. Auch die Bevorzugung von Produkten aus ökologischer Produk-

<sup>9</sup> Ein Beispiel ist die geplante Stickstoffrückgewinnung in der Kläranlage des Abwasserverbandes Braunschweig; die Etablierung des Verfahrens wird im Rahmen des Umwelt Innovationsprogrammes gefördert. Weitere Informationen: <http://www.bmub.bund.de/presse/pressemitteilungen/pm/artikel/naehrstoffrueckgewinnung-aus-klarschlamm/>



tion kann zur Entspannung des Stickstoffkreislaufs beitragen, da der Stickstoffüberschuss pro Produkteinheit verglichen mit konventioneller Produktion häufig geringer ist.

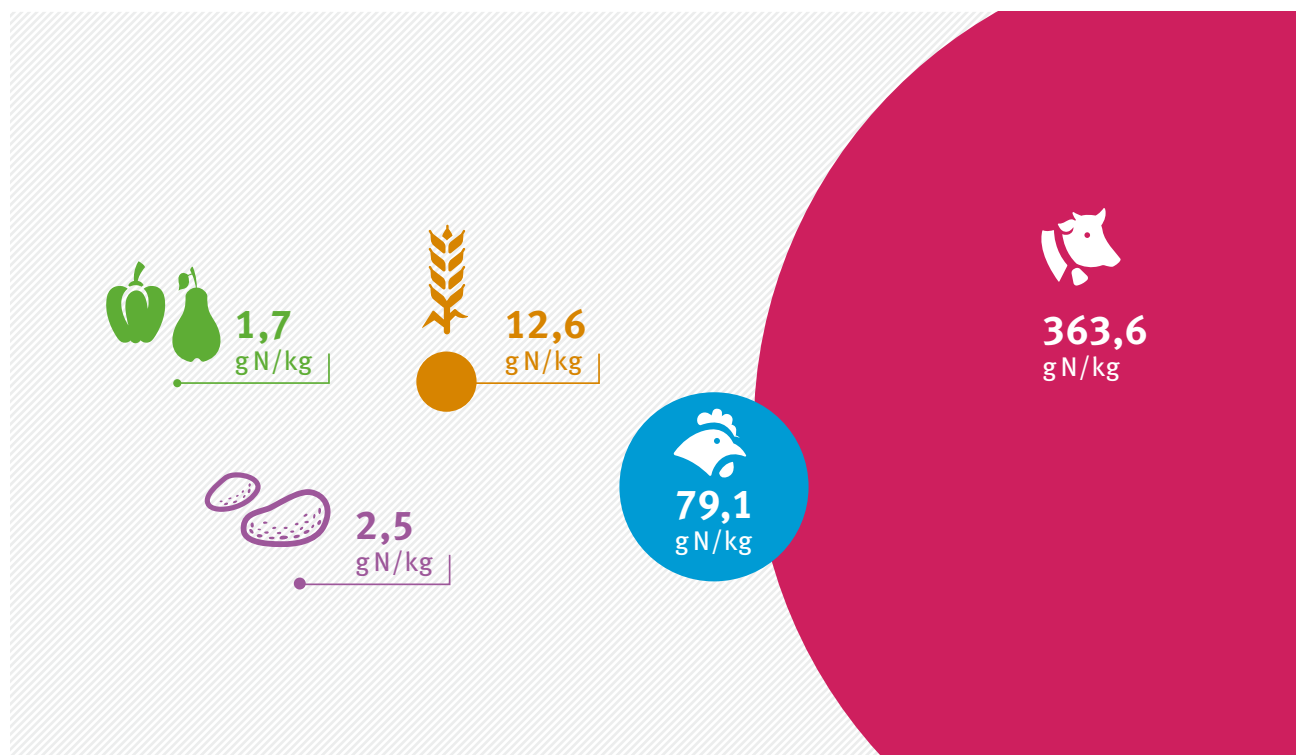
Verantwortliches Handeln im Sinne eines nachhaltigen Konsums kann daher beachtliche Wirkungen haben und sendet darüber hinaus wichtige umweltpolitische Signale (SRU, 2012, Bilharz et al., 2011, UBA, 2013a). Laut einer repräsentativen Umfrage, die im Auftrag des Verbraucherzentrale Bundesverbands durchgeführt wurde, sieht die Mehrheit der Verbraucherinnen und Verbraucher bei der Verringerung von Umweltschäden durch den Stickstoffeintrag aus der Landwirtschaft einen großen bis sehr großen Handlungsbedarf. Zugleich legt die Umfrage aber nahe, dass die Problematik in der breiten Bevölkerung wenig bekannt ist bzw. sie als zu komplex empfunden wird.

Als leichter verständliche Kommunikationsmittel eignet sich der sogenannte Stickstoff-Fußabdruck, der angibt, welche Mengen an reaktivem Stickstoff pro Jahr durch

den persönlichen Lebensstil freigesetzt werden. Eine Methode zu dessen Berechnung wurde 2012 von einer internationalen Forschergruppe entwickelt (Leach et al., 2012). Mittlerweile steht der web-basierte Stickstoff-Fußabdruck-Rechner auch in deutscher Sprache und einer für Deutschland angepassten Datengrundlage zur Verfügung (<http://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/wirkungen-von-lufts Schadstoffen/wirkungen-auf-oekosysteme/stickstoff-fussabdruck>). Demnach werden pro Kopf und Jahr etwa 24 kg Stickstoff freigesetzt, wobei davon gut 80 Prozent auf den Bereich Ernährung entfallen. Der Stickstoff-Fußabdruck berücksichtigt alle Emissionen, die mit einem konsumierten Produkt verknüpft sind, unabhängig davon, wo sie stattfinden. Die in Deutschland entstehenden Emissionen durch die Produktion exportierter Güter werden nicht berücksichtigt. Daher, und durch die Unsicherheiten in den Datengrundlagen, weichen die so ermittelten durchschnittlichen Emissionen von 24 kg Stickstoff pro Person und Jahr vom Durchschnittswert der Emissionen in der nationalen Bilanz (ca. 19 kg Stickstoff pro Person und Jahr) ab.

Abbildung 15

## Stickstoff-Fußabdrücke von Lebensmitteln\* in der EU



\* nur landwirtschaftliche Produktion

nach Leip et al., 2013

## Den persönlichen Stickstoff-Fußabdruck reduzieren



Mit dem Stickstoff-Fußabdruck-Rechner lässt sich einfach und schnell aufzeigen, wie sich ein verändertes Verhalten auf die Freisetzung reaktiven Stickstoffs auswirkt. Vergleiche mit dem Kohlenstoff-Fußabdruck (Xue and Landis, 2010) zeigen, dass – bei durchaus beachtlichen Abweichungen im Detail<sup>10</sup> – die generellen Botschaften (Box 6) bezüglich möglicher Verhaltensänderungen ähnlich sind. Verglichen mit dem Kohlenstoff-Fußabdruck ist es jedoch schwieriger, eine Zielgröße abzuleiten, da ein Mindestkonsum von Stickstoff für eine gesunde Ernährung unerlässlich ist.

Um die quantitativen Aussagen besser abzusichern, müssen die Berechnungsmethoden und Datengrundlagen weiter verbessert und möglichst vereinheitlicht sowie die Diskussion um Zielwerte fortgeführt werden. Über den Zusammenhang zwischen Konsum und Stickstoffproblematik sollte die Bundesregierung mit geeigneten Maßnahmen (Kindergärten, Schulen, Kampagnen, etc.) stärker aufklären (UBA, 2013a).

### Box 6

#### Wesentliche Maßnahmen zur Verringerung des persönlichen Stickstoff-Fußabdrucks

Reduktion des Konsums von tierischem Eiweiß (Westhoek et al., 2014, Meier and Christen, 2013). Der durchschnittliche Fleischkonsum liegt in Deutschland derzeit deutlich über, der Verzehr von Obst und Gemüse deutlich unter den, auf die Gesundheit ausgerichteten, Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Ernährung. Daher bietet eine Anpassung der Ernährung deutliche Vorteile für Umwelt und Gesundheit.

- Vermeidung von Lebensmittelabfällen
- Nutzung umweltfreundlicher Verkehrsmittel wie Fahrrad, öffentlicher Nahverkehr oder Bahn
- Geringer Energieverbrauch für Wohnung und Haushalt

<sup>10</sup> Verglichen mit dem durchschnittlichen Kohlenstoffabdruck (C-Print), ist die relative Bedeutung der Ernährung für den durchschnittlichen Stickstoffabdruck (N-Print) deutlich größer. Von den Lebensmitteln weisen (rote) Fleischprodukte sehr hohe C- wie N-Prints auf. Unterschiede gibt es v. a. bei Milchprodukten und Nahrungsmitteln, die energieaufwendig produziert oder weit transportiert werden müssen. Vgl. dazu auch (Xue & Landis, 2010).

## 6. Die globale Dimension

Die Stickstoffproblematik ist eine globale Herausforderung (Galloway et al., 2008, Sutton et al., 2011, Rockström et al., 2009), wobei sich die Probleme in den einzelnen Weltregionen sehr unterschiedlich darstellen (Mueller et al., 2012) und global auf vielen landwirtschaftlich genutzten Flächen ein Stickstoffmangel vorliegt, der die Ernte z. T. erheblich mindert (International Assessment of Agricultural Knowledge, 2009, UBA, 2014e). Ohne weitere Maßnahmen werden die Emissionen einiger reaktiver Stickstoffverbindungen in die Umwelt bis 2050 noch weiter massiv zunehmen (Abb. 16; United Nations Environment Programme (UNEP), 2012, Sutton and Bleeker, 2013), mit vermutlich fatalen Folgen für Mensch und Natur. Bodirsky et al. (2014) zeigen, dass sich die globalen Stickstoffverluste an die Umwelt bis 2050 ohne weitere Maßnahmen voraussichtlich mehr als verdoppeln werden. Bei globaler Umsetzung ambitionierter Maßnahmen (u. a. erhöhte N-Effizienz, Vermeidung von Lebensmittelabfällen, etc.) ließen sich die Verluste – trotz Bevölkerungs-

wachstum und bei Sicherung der Welternährung – auf 36 bis 76 Prozent des Wertes aus 2010 reduzieren.

Wesentliche stickstoffbedingte Umweltprobleme lassen sich daher nur durch internationale Kooperation lösen; Maßnahmen auf nationaler Ebene allein reichen nicht aus. Eine Auswahl europäischer und globaler Aktivitäten ist:

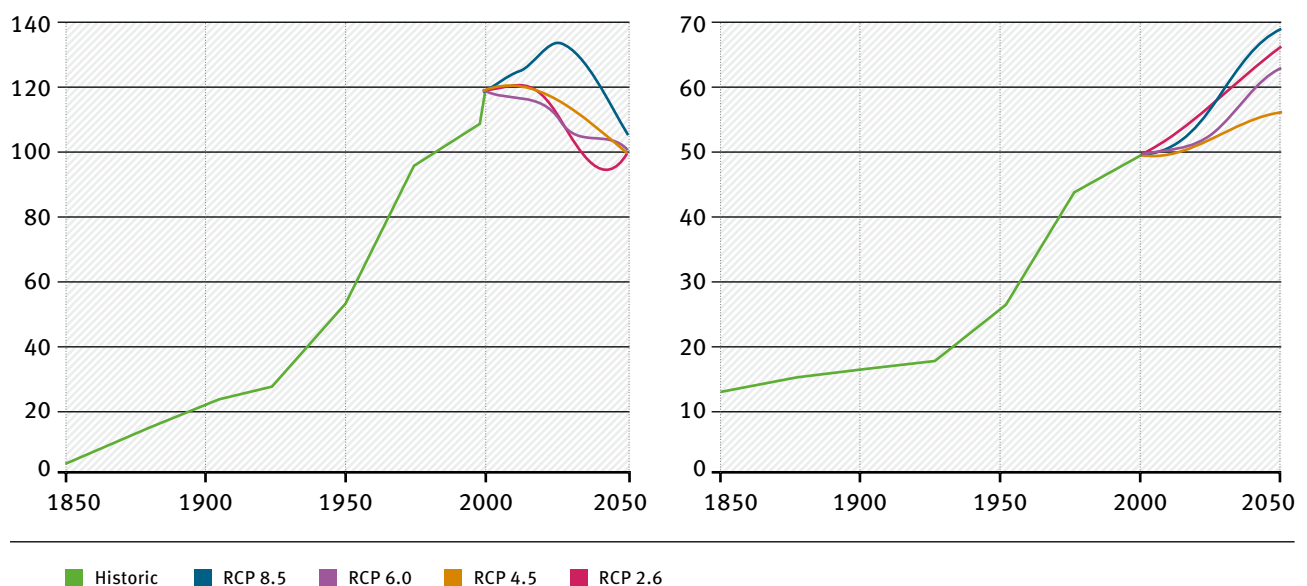
die „**International Nitrogen Initiative**“ (INI), die zum Ziel hat,

- das Wissen zu Quellen und Wirkungen auf Umwelt und menschliche Gesundheit zu dokumentieren, kombinieren, erweitern und bewerten,
- die Kommunikation zwischen Verursachern, Wissenschaftlern und Politikern zu fördern und

Abbildung 16

### Globale Emissionen von Stickstoffoxiden (links) und Ammoniak (rechts) jeweils in Millionen Tonne ( $\text{NH}_3$ bzw. $\text{NO}_x$ als $\text{NO}_2$ ) pro Jahr

Die grüne Linie bis zum Jahr 2000 zeigt den historischen Verlauf; die anschließenden Linien geben den Verlauf für verschiedene IPCC-Szenarien wieder



UNEP, 2012

- ausgewogene Strategien zur Erhöhung der Stickstoffeffizienz und zur Vermeidung von negativer Auswirkungen zu entwickeln.

das **Global Partnership on Nutrient Management (GPNM)**, ein Zusammenschluss verschiedener Akteure aus Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft, dessen Geschäftsstelle beim Umweltprogramm der vereinten Nationen (UNEP) liegt. Das GPNM schlägt als globales Ziel eine relative Steigerung der Stickstoffeffizienz (in der Nahrungsmittelproduktion) um 20 Prozent bis 2020 im Vergleich zum Jahr 2008 vor; gleichzeitig soll in Ländern (v. a. Afrikas und Teilen Südamerikas), in denen heute eine Übernutzung der Bodennährstoffe stattfindet eine nachhaltige Nährstoffversorgung etabliert werden (Sutton et al., 2013).

sowie die „**Task Force on Reactive Nitrogen**“ (TFRN) unter der Genfer Luftreinhaltekonvention (vgl. Box 3), deren Auftrag es ist, die Politik hinsichtlich der Optimierung des Nutzens von Stickstoff und der Minderung von Stickstoffemissionen in die Umwelt sowie der damit verbundenen Schadwirkungen zu beraten.

Für die Begleitung politischer Entscheidungen bedarf es auch auf globaler Ebene einer wissenschaftlichen Politikberatung, die Risiken und Gegenmaßnahmen im Hinblick auf die Überlastung und Unterversorgung mit reaktivem Stickstoff evaluiert und darstellt. Diese Aufgabe soll zukünftig vom International Nitrogen Management System (INMS) übernommen werden, dessen Einrichtung aus Mitteln der globalen Umweltfazilität (GEF) derzeit initiiert wird.

## 7. Schlussfolgerung und Ausblick

Der intensivierte Stickstoffkreislauf steht mit vielen umweltpolitischen Themen in engem Zusammenhang (vgl. Kapitel 2). Maßnahmen und Instrumenten zur Erreichung bestehender Umweltqualitätsziele sollten daher anhand folgender Aspekte ausgerichtet werden:

- Begrenzung der Produktion und des Imports reaktiven Stickstoffs,
- verbesserte Effizienz beim Einsatz und
- reduzierte Freisetzung durch verändertes Konsumverhalten.

Das größte technische Minderungspotential besteht derzeit im Landwirtschaftssektor. Betrachtungen der Kostenwirksamkeit weisen zudem darauf hin, dass diese Maßnahmen auch mit geringeren Kosten pro kg verminderter Emission reaktiven Stickstoffs verbunden sind. Neben der Kostenwirksamkeit sind jedoch bei der Bewertung von Maßnahmen unbedingt auch Synergieeffekte und die Vermeidung der Verlagerung von Stickstoffemissionen in andere Umweltbereiche („pollution swapping“) zu beachten. Erfolgreiche Maßnahmen zur Verminderung der Stickstoffverluste in die Umwelt tragen zum Schutz der Biodiversität, der Gewässer, der Gesundheit sowie des Klimas bei.





## Anhang 1: Stickstoffmenge, Bezugszeitraum und Referenz zu den einzelnen Stickstoffflüssen in Kapitel 4

Bezeichnung des Flusses im N-Kreislauf	N-Menge (Gg a <sup>-1</sup> )	Bezugszeit- raum	Datengrundlage, Quelle
<b>Industrie, Energie</b>			
Industrielle N-Fixierung	2677	2010	(VCI, 2012)
Emissionen N <sub>2</sub> O	28	2008 – 2010	(UBA, 2012) Quellgruppen 1, 2 und 3 ohne Verkehr
Emissionen NH <sub>3</sub>	16	2008 – 2010	(UBA, 2012) Quellgruppen 1, 2 und 3 ohne Verkehr
Emissionen NO <sub>x</sub>	187	2008 – 2010	(UBA, 2012) Quellgruppen 1, 2 und 3 ohne Verkehr
Industrielle Direkteinleitung (Oberflächengewässer)	10	2006 – 2011	(Fuchs et al., 2010, UBA, 2014a)
<b>Verkehr</b>			
Emissions of N <sub>2</sub> O	2	2008 – 2010	(UBA, 2012)
Emissions of NH <sub>3</sub>	13	2008 – 2010	(UBA, 2012)
Emissions of NO <sub>x</sub>	192	2008 – 2010	(UBA, 2012)
<b>Bebaute Gebiete</b>			
Urbane Systeme (in Oberflächengewässer)	19	2006 – 2011	(Fuchs et al., 2010, UBA, 2014a)
<b>Landwirtschaft</b>			
Absatz Mineraldünger	1642	2008 – 2010	(Bach, 2010), Daten: <a href="http://www.bmelv-statistik.de/index.php?id=139">www.bmelv-statistik.de/index.php?id=139</a> (Stand 2013)
Wirtschaftsdüngereinsatz	891	2008 – 2010	(Bach, 2010), Daten: <a href="http://www.bmelv-statistik.de/index.php?id=139">www.bmelv-statistik.de/index.php?id=139</a> (Stand 2013)
Biologische N-Fixierung	214	2008 – 2010	(Bach, 2010), Daten: <a href="http://www.bmelv-statistik.de/index.php?id=139">www.bmelv-statistik.de/index.php?id=139</a> (Stand 2013)
Landwirtschaftliche Produktion (Summe Abfuhr – Futtermittel aus Inland – Industriefrüchte)	664	2008 – 2010	(Bach, 2010), Daten: <a href="http://www.bmelv-statistik.de/index.php?id=139">www.bmelv-statistik.de/index.php?id=139</a> (Stand 2013)
Futtermittel aus dem Inland	1683	2008 – 2010	(Bach, 2010), Daten: <a href="http://www.bmelv-statistik.de/index.php?id=139">www.bmelv-statistik.de/index.php?id=139</a> (Stand 2013)
Industriefrüchte	194	2008 – 2010	(Bach, 2010), Daten: <a href="http://www.bmelv-statistik.de/index.php?id=139">www.bmelv-statistik.de/index.php?id=139</a> (Stand 2013)
Organische Düngestoffe	58	2008 – 2010	(Bach, 2010), Daten: <a href="http://www.bmelv-statistik.de/index.php?id=139">www.bmelv-statistik.de/index.php?id=139</a> (Stand 2013)
Emissionen N <sub>2</sub> O	88	2008 – 2010	(UBA, 2012)
Emissionen NH <sub>3</sub>	435	2008 – 2010	(UBA, 2012)
Emissionen NO <sub>x</sub>	33	2008 – 2010	(UBA, 2012)
Eintrag in Oberflächengewässer (Erosion, Drainage, Grundwasser)	424	2006 – 2011	(Fuchs et al., 2010, UBA, 2014a)

Bezeichnung des Flusses im N-Kreislauf	N-Menge (Gg a <sup>-1</sup> )	Bezugszeit- raum	Datengrundlage, Quelle
Natürl./naturnahe Landökosysteme			
Biologische N-Fixierung	57		(Cleveland et al., 1999)
Eintrag in Oberflächengewässer (natürliche Erosion, gesamter Oberflächenabfluss [Aufteilung in landwirtschaftliche und sonstige Flächen derzeit nicht verfügbar])	33	2006 – 2011	(Fuchs et al., 2010, UBA, 2014a)
N <sub>2</sub> O Emissionen	7		(De Vries et al., 2011)
NH <sub>3</sub> Emissionen	3		(De Vries et al., 2011)
NO <sub>x</sub> Emissionen	7	2000	(Wochele et al., 2009)
N-Entzug Holzernte (70 Mio Ernte fm; Dichte: 500 kg m <sup>-3</sup> ; Gew.-%-N: 0.2)	70		
Abwasser/Abfall			
Industrielle Abwässer	31	2008	(Austermann-Haun and Carozzi, 2011)
Kommunale Abwässer	423	2010	(DWA, 2011)
Kläranlagen	82	2006 – 2011	(Fuchs et al., 2010, UBA, 2014a)
Emissionen N <sub>2</sub> O	5	2008 – 2010	(UBA, 2012)
Denitrifikation	340	2010	(DWA, 2011)
Atmosphäre			
Blitzschlag	3	2007	(Schumann and Huntrieser, 2007)
Gesamter grenzüberschreitender Import	248	2010	(Fagerli, 2012)
Grenzüberschreitender Import Nred	117	2010	(Fagerli, 2012)
Grenzüberschreitender Import NO <sub>x</sub>	131	2010	(Fagerli, 2012)
Gesamter grenzüberschreitender Export	560	2010	(Fagerli, 2012)
Grenzüberschreitender Export Nred	261	2010	(Fagerli, 2012)
Grenzüberschreitender Export NO <sub>x</sub>	299	2010	(Fagerli, 2012)
Gesamtdeposition terrestrische Ökosys- teme	716	2005–2007	(Bultjes et al., 2011)
landwirtschaftliche Nutzflächen	451	2005–2007	
natürliche/naturnahe ÖS	266	2005–2007	
Gesamtdeposition limnische ÖS	6	2005–2007	
Gesamtdeposition Küstengewässer	36	2010	(Bartnicki et al., 2012)
Gesamtdeposition bebaute Gebiete	54	2005–2007	(Bultjes et al., 2011)
Hydrosphere			
Import über Flüsse	322	2006 – 2011	(Fuchs et al., 2010, UBA, 2014a)
Export über Flüsse	422	2006 – 2011	(Fuchs et al., 2010, UBA, 2014a)
Export in Meer (direkt)	478	2006 – 2011	(Fuchs et al., 2010, UBA, 2014a)
Deposition Küstengewässer	36	2010	(Bartnicki et al., 2012)
Stickstofffixierung (nur Ostsee)	31	2010	(Rahm et al., 2000)

## Anhang 2: Neuer Zielwert für den Stickstoffüberschuss

Die eindeutige Ableitung eines nationalen Zielwertes für den Stickstoffüberschuss, der zu keinen signifikanten negativen Umweltwirkungen (vgl. Kapitel 2) mehr führt, ist derzeit noch nicht möglich. Gründe dafür sind u. a. die Vielzahl der unterschiedlichen Wirkungen (die noch nicht verlässlich in einem einheitlichen Modell abgebildet werden können), die häufig entscheidende Bedeutung der räumlichen Verteilung (des Überschusses wie der empfindlichen Rezeptoren) und die Tatsache, dass der Überschuss sowohl über den Luft- wie den Wasserpfad entweichen kann (mit jeweils unterschiedlichen Wirkungen). Vor dem Hintergrund der jedenfalls nötigen deutlichen Absenkung der Überschüsse (s.o.) kann aber die Frage, welcher Überschuss im Sinne einer guten fachlichen landwirtschaftlichen Praxis heute und in Zukunft erreicht werden kann, wichtige Hinweise für die Höhe eines Zielwertes liefern. Dazu wurden folgende aktuelle Studien bzw. Experteneinschätzungen ausgewertet:

### Empfehlungen der Kommission Landwirtschaft am Umweltbundesamt

Die Kommission Landwirtschaft am Umweltbundesamt empfiehlt im Zuge der Diskussionen um die Reform der EU-GAP einen Überschuss von  $50 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  in der Gesamtbilanz als obligatorische Greening-Komponente einzuführen (KLU, 2011). Die Einhaltung dieses Wertes kennzeichnet eine Umweltleistung, die von allen Betrieben, die Direktzahlungen erhalten, eingehalten werden kann und sollte.

### Empfehlungen des Verbandes dt. landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten

Der Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA) schlägt maximale Überschüsse in Abhängigkeit des Anfalls organischen Dünger-N vor, die aktuell erreicht werden können (VDLUFA, 2012). Folgende Werte in der Gesamtbilanz werden dabei aktuell für realisierbar erachtet:

Betriebstyp	Organische Düngung ( $\text{kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ )	Zulässiger N-Überschuss mit N-Depo: $20 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ( $\text{kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ )	Zulässiger N-Überschuss mit N-Depo: $10 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ( $\text{kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ )
I	< 50	60	50
II	50 – 100	90	80
III	> 100	120	110

Die vom Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten vorgeschlagenen Werte beinhalten eine atmosphärische N-Deposition von  $20 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ; da bis 2040 eine Verbesserung der Luftqualität und eine Verringerung der Deposition angestrebt wird, beinhaltet obige Tabelle eine weitere Spalte, in der die N-Deposition auf einen Wert von  $10 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  reduziert wurde. Mit den Zahlen zur Verteilung der Betriebe anhand der anfallenden organischen Düngung (aus Osterburg and Tehen (2012): 57 Prozent der LNF wird von Betrieben bewirtschaftet mit einem org. N  $< 50 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  [da die Grenze von  $50 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  in den Daten nicht enthalten ist, wurde die Klasse 40-60 hälftig verteilt]; 33 Prozent mit org. N 50 bis  $< 100 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  und 10 Prozent mit org. N  $> 100 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ) lässt sich daraus ein flächengewichtetes Mittel von  $66 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  abschätzen.

#### **Benchmark ökologische bewirtschafteter Betriebe:**

Auch Überschüsse ökologisch bewirtschafteter Betriebe lassen sich für die Ableitung einer Richtgröße mit heranziehen. Öko-Betriebe weisen in der Regel einen deutlich tieferen Überschuss aus. Studien von Hülsbergen and Siebert (2010) und Bach (2013) weisen für ökologisch bewirtschaftete Betriebe Überschüsse von z. T. deutlich unter  $50 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  aus.

#### **Szenarienrechnungen:**

Eine im Rahmen des Projektes „Treibhausgasneutrales Deutschland 2050“ durchgeführte Szenarienrechnung des Thünen-Instituts (Osterburg et al., 2013) zeigt auf, dass die deutsche Landwirtschaft, durch die Erhöhung der N-Ausnutzung und unter Annahme sich entwickelnder Nachfragemuster (die zu einem Abbau der Tierbestände führen werden), einen Stickstoffsaldo (Hoftorbilanz) von rund  $50 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  erreichen kann.

Zusammengenommen zeigen diese Überlegungen, dass ein Überschusswert von  $50 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  in der Gesamtbilanz ein ambitioniertes, aber realisierbares Ziel darstellt. Die negativen Auswirkungen würden damit deutlich reduziert werden.



## Literatur

Alfred Töpfer Akademie für Naturschutz (NNA) (1997) Stickstoffminderungsprogramm. NNA-Berichte. Schneverdingen.

Austermann-Haun, U. & Carozzi, A. (2011) Bereitstellung einer qualitätsgesicherten Datengrundlage für die Emissionsberichterstattung zur Umsetzung von internationalen Luftreinhalte- und Klimaschutzvereinbarungen für ausgewählte Industriebranchen – hier: N<sub>2</sub>O Emissionsfaktoren aus der Abwasserreinigung der vier relevantesten Industriebereiche. UBA-Forschungsbericht FKZ 36016031. Dessau-Rosslau.

Bach, M. (2010) Zeitreihe Stickstoffindikator - Vereinheitlichte Methodik zur Berechnung von Stickstoff-Bilanzen für die Landwirtschaft in Deutschland. Abschlussbericht zum BLE-Dienstleistungsvertrag 114-02.05-20.006709-B. Justus-Liebig-Universität Gießen (JLU) – Institut für Landschaftsökologie und Ressourcenmanagement, Gießen.

Bach, M. (2013) Regionalisierung des Stickstoff-Überschuss einzelbetrieblicher Hoftorbilanzen (Beispiel Hessen) - Überlegungen zur methodischen Weiterentwicklung der N-Bilanzierung. Justus-Liebig-Universität Gießen (JLU) - Institut für Landschaftsökologie und Ressourcenmanagement, Gießen.

Bach, M. (2014) Berechnung von Stickstoff-Flächenbilanzen für die Landwirtschaft in Deutschland mit Regionalgliederung Kreise und kreisfreie Städte, Jahre 2003 bis 2011. Abschlussbericht. Justus-Liebig-Universität Gießen (JLU) - Institut für Landschaftsökologie und Ressourcenmanagement, Gießen.

Bartnicki, J., Gusev, A., Aas, W. & Valiyaveetil, S. (2012) Atmospheric Supply of Nitrogen, Lead, Cadmium, Mercury and Dioxins/Furans to the Baltic Sea in 2010. EMEP Centres Joint Report for HELCOM (ed EMEP/MS-C-W). Oslo.

Bergmann, A., Weber, F.-A., Hansen, C., Wilde, S., Van Straaten, L., Van Berk, W., Häußler, S., Dietrich, P., Franko, U., Kiefer, J. & Rödelberger, M. (2014) Konsequenzen nachlassenden Nitratabbaus in Grundwasserleitern. Energie-Wasser-Praxis, 2.

Bilharz, M., Fricke, V. & Schrader, U. (2011) Wider die Bagatellisierung der Konsumentenverantwortung. GAIA, 20, 9-13.

Bittman, S., Dedina, M., Howard, C. M., Oenema, O. & Sutton, M. A. (2014) Options for Ammonia Mitigation: Guidance from the UNECE Task Force on Reactive Nitrogen. Centre for Ecology and Hydrology, Edinburgh, UK.

Bobbink, R., Hicks, K., Galloway, J., Spranger, T., Alkemade, R., Ashmore, M., Bustamante, M., Cinderby, S., Davidson, E., Dentener, F., Emmett, B., Erismann, J. W., Fenn, M., Gilliam, F., Nordin, A., Pardo, L. & De Vries, W. (2010) Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: A synthesis. Ecological Applications, 20, 30-59.

Bodirsky, B. L., Popp, A., Lotze-Campen, H., Dietrich, J. P., Rolinski, S., Weindl, I., Schmitz, C., Müller, C., Bonsch, M., Humpenöder, F., Biewald, A. & Stevanovic, M. (2014) Reactive nitrogen requirements to feed the world in 2050 and potential to mitigate nitrogen pollution. Nature Communications, 5.

Builtjes, P., Hendriks, E., Koenen, M., Schaap, M., Banzhaf, S., Kerschbaumer, A., Gauger, T., Nagel, H.-D., Scheuschner, T. & Schlutow, A. (2011) Erfassung, Prognose und Bewertung von Stoffeinträgen und ihren Wirkungen in Deutschland - Zusammenfassender Abschlussbericht. UBA-Texte 38/2011 (ed Umweltbundesamt). Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

Bundesamt für Naturschutz (BfN) (2004) Daten zur Natur 2004. (ed BfN). BfN, Bonn.

Bundesamt für Naturschutz (BfN) (2012) Daten zur Natur 2012. (ed BfN). BfN, Bonn.

Bundesamt für Umwelt (BAFU) (2014) Stickstoff - Segen und Problem. Umwelt – Natürliche Ressourcen in der Schweiz (ed Bundesamt für Umwelt Schweiz). BAFU, Bern.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2013) BMELV-Statistik, MBT-0111290-0000.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2007) Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt. Berlin.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) & Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) (2012) Nitratbericht der Bundesregierung. (eds L. Keppner, W. Rohrmoser, J. Wendang & D. Fischer). BMU; BMELV.

Cleveland, C. C., Townsend, A. R., Schimel, D. S., Fisher, H., Howarth, R. W., Hedin, L. O., Perakis, S. S., Latty, E. F., Von Fischer, J. C., Elseroad, A. & Wasson, M. F. (1999) Global patterns of terrestrial biological nitrogen ( $N_2$ ) fixation in natural ecosystems. *Global Biogeochemical Cycles*, 13, 623-645.

Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (CLRTAP) (2013) Guidance document on national nitrogen budgets. Expert Panel on Nitrogen Budgets, Genf.

De Vries, W., Kros, J., Kroeze, C. & Seitzinger, S. P. (2013) Assessing planetary and regional nitrogen boundaries related to food security and adverse environmental impacts. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5, 392-402.

De Vries, W., Leip, A., Reinds, G. J., Kros, J., Lesschen, J. P., Bouwman, A. F., Grizetti, B., Bouraoui, F., Butterbach-Bahl, K., Bergamaschi, P. & Winiwarter, W. (2011) Geographical variation in terrestrial nitrogen budgets across Europe. *The European Nitrogen Assessment* (eds M. A. Sutton, C. M. Howard, J. W. Erisman, G. Billen, A. Bleeker, P. Grennfelt, H. van Grinsven & B. Grizetti). Cambridge University Press, New York.

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) (2011) Stickstoff im Mittelpunkt. 23. DWA-Leistungsvergleich Kommunalen Kläranlagen 2010. KA - Abwasser, Abfall, 10, 914-918.

Deutscher Bundestag (2013) Schlussbericht der Enquete-Kommission „Wachstum, Wohlstand, Lebensqualität – Wege zu nachhaltigem Wirtschaften und gesellschaftlichem Fortschritt in der Sozialen Marktwirtschaft“ Bundestags-Drucksache 17/13300 Berlin

Dolman, A. M., Rücker, J., Pick, F. R., Fastner, J., Rohrlack, T., Mischke, U. & Wiedner, C. (2012) Cyanobacteria and cyanotoxins: The influence of nitrogen versus phosphorus. *PLoS ONE*, 7.

Eichler, F. & Schulz, D. (1998) The nitrogen reduction programme in the Federal Republic of Germany. *Environmental Pollution*, 102, 609-617.

Environment Directorate General of the European Commission („DG Environment“) (2013) The Clean Air Policy Package. European Commission.

Eurostat (2011) Agriculture and fishery statistics 2011. Main results 2009–10. Edition Pocket-books.

Fagerli, H. G., M.; Benedictow, A.; Jonson, J. E.; Simpson, D.; Nyríi, Á.; Schulz, M.; Steensen, B. M.; Tsyro, S.; Valdebenito, Á.; Wind, P.; Shamsudheen, S. V.; Aas, W.; Hjellbrekke, A.-G.; Mareckova, K.; Wankmüller, R.; Solberg, S.; Svendby, T.; Vieno, M.; Thunis, P.; Cuvelier, K.; Koffi, B.; Bergström, R. (2012) Transboundary Acidification, Eutrophication and Ground Level Ozone in Europe in 2010. EMEP-Report, 1/2012.

Flessa, H., Müller, D., Plassmann, K., Osterburg, B., Techen, A., Nitsch, H., Nieberg, H., Sanders, J., Meyer zu Hartlage, O., Beckmann, E. & Anspach, V. (2012) Studie zur Vorbereitung einer effizienten und gut abgestimmten Klimaschutzpolitik für den Agrarsektor. *Landbauforschung*.

Fowler, D., Coyle, M., Skiba, U., Sutton, M. A., Cape, J. N., Reis, S., Sheppard, L. J., Jenkins, A., Grizzetti, B., Galloway, J. N., Vitousek, P., Leach, A., Bouwman, A. F., Butterbach-Bahl, K., Dentener, F., Stevenson, D., Amann, M. & Voss, M. (2013) The global nitrogen cycle in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 368.

Fuchs, S., Scherer, U., Wander, R., Behrendt, H., Venohr, M. & Opitz, D. (2010) Berechnung von Stoffeinträgen in die Fließgewässer Deutschlands mit dem Modell MONERIS. Nährstoffe, Schwermetalle und Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe. UBA-Texte. gefördert durch Umweltbundesamt und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Dessau-Roßlau.

Galloway, J. N., Aber, J. D., Erisman, J. W., Seitzinger, S. P., Howarth, R. W., Cowling, E. B. & Cosby, B. J. (2003) The nitrogen cascade. *BioScience*, 53, 341-356.

Galloway, J. N., Townsend, A. R., Erisman, J. W., Bekunda, M., Cai, Z., Freney, J. R., Martinelli, L. A., Seitzinger, S. P. & Sutton, M. A. (2008) Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, 320, 889-892.

Grennfelt, P., Engleryd, A., Munthe, J. & Håård, U. (2013) Saltsjöbaden V - Taking international air pollution policies into the future. . (eds P. Grennfelt, A. Engleryd, J. Munthe & U. Håård), pp. 60. Gothenburg.

Groffman, P. M. (2012) Terrestrial denitrification: challenges and opportunities. *Ecological Processes*, 1, 11.

Gu, B., Chang, J., Min, Y., Ge, Y., Zhu, Q., Galloway, J. N. & Peng, C. (2013) The role of industrial nitrogen in the global nitrogen biogeochemical cycle. *Scientific Reports*, 3.

Gutser, R., Ebertseder, T., Schraml, M., von Tucher, S. & Schmidhalter, U. (2010) Stickstoffeffiziente und umweltschonende organische Düngung. Emissionen landwirtschaftlich genutzter Böden – KTBL-Tagung Kloster Banz.

Hansen, C., Bergmann, A., Weber, F.-A., van Straaten, L., Wilde, S., van Berk, W., Häußler, S., Rödelberger, M., Diedrich, P. & Franko, U. (2011) Konsequenzen nachlassenden Nitratabbaus in Grundwasserleitern. *Energie-Wasser-Praxis*, 10, 44-49.

Häusling, M. (2011) Europa braucht eine zukunftsfähige Eiweißstrategie!. *Kritischer Agrarbericht*, 32-35.

Heldstab, J., Leippert, F., Biedermann, R., Herren, M. & Schwank, O. (2013) Stickstoffflüsse in der Schweiz 2020. Stoffflussanalyse und Entwicklungen. *Umwelt-Wissen* (eds C. Moor, B. Achermann, S. Augustin, G. Chassot, R. Quartier, R. Röthlisberger, G. Theis & D. Bretscher), pp. 107. Bundesamt für Umwelt, Bern.

Heldstab, J., Reutimann, J., Biedermann, R. & Leu, D. (2010) Stickstoffflüsse in der Schweiz. Stoffflussanalyse für das Jahr 2005. *Umwelt-Wissen* (eds C. Moor, B. Achermann, G. Karlaganis & H. Hossbach), pp. 128. Bundesamt für Umwelt, Bern.

Hülsbergen, K.-J. & Siebert, N. (2010) Integration des Biodiversitätsschutzes in das betriebliche Umweltmanagement der Agrarbetriebe und deren Bewertung. *Dialogforum „Nachhaltige landwirtschaftliche Landnutzung, Stoffflüsse und Biodiversität“*. Umweltbundesamt, Dessau.

International Assessment of Agricultural Knowledge, Science and Technology for Development (IAASTD) (2009) *Weltagrarbericht Synthesebericht*. (eds S. Albrecht & A. Engel). Hamburg.

International Council on Clean Transportation (ICCT) (2014): Real-world exhaust emissions from modern diesel cars. A meta-analysis of PEMS emission data from EU (Euro 6) and US (Tier 2 Bin 5/ULEV II) diesel passenger cars. White paper.

International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) (2014) The Final Policy Scenarios of the EU Clean Air Policy Package. TSAP Report (ed M. Amann).

Jacobsen, B. H. (2012) Reducing ammonia emission from agriculture using the BATNEEC approach in Denmark. *Food Economics*, 9, 166-176.

Jörß, W., Emele, L., Scheffer, M., Cook, V., Handke, V., Theloke, J., Thiruchittampalam, B., Dünnebeil, F., Knörr, W., Heidt, C., Jozwicka, M., Kuenen, J. J. P., Denier Van Der Gon, H. A. C., Visschedijk, A. J. H., van Gijlswijk, R. N., Osterburg, B., Laggner, B., Stern, R. & Appelhans, J. (2014) Luftqualität 2020/2030: Weiterentwicklung von Prognosen für Luftschadstoffe unter Berücksichtigung von Klimastrategien. UBA-Texte.

Kohls, M., Mierwald, U. & Zirwick, A. (2014) Irrelevanzschwellen für Stickstoffeinträge in FFH-Gebiete. *ZUR*, 150.

Kommission Landwirtschaft am Umweltbundesamt (KLU) (2011) Für eine ökologisierte erste und eine effiziente zweite Säule - Stellungnahme der Kommission Landwirtschaft am Umweltbundesamt (KLU) zur Reform der gemeinsamen Agrarpolitik. UBA Positionspapier (ed Umweltbundesamt). Umweltbundesamt, Dessau.

Kommission Landwirtschaft am Umweltbundesamt (KLU) (2013a) Biogaserzeugung und -nutzung: Ökologische Leitplanken für die Zukunft - Vorschläge der Kommission Landwirtschaft beim Umweltbundesamt (KLU). Positionspapier. Umweltbundesamt, Dessau.



Kommission Landwirtschaft am Umweltbundesamt (KLU) (2013b) Mehr Grün in die Gemeinsame Agrarpolitik – Einstieg geschafft, aber noch zahlreiche Schwachpunkte. Positionspapier. Umweltbundesamt, Dessau.

Kommission Landwirtschaft am Umweltbundesamt (KLU) (2014) Kurzstellungnahme der Kommission Landwirtschaft beim Umweltbundesamt zur Novellierung der Düngeverordnung. Positionspapier. Umweltbundesamt, Dessau.

Landwirtschaftskammer Niedersachsen (LWKNI) (2013) Nährstoffbericht in Bezug auf Wirtschaftsdünger für Niedersachsen 2012/2013. LWKNI.

Leach, A. M., Galloway, J. N., Bleeker, A., Erismann, J. W., Kohn, R. & Kitzes, J. (2012) A nitrogen footprint model to help consumers understand their role in nitrogen losses to the environment. *Environmental Development*, 1, 40-66.

Leip, A., Weiss, F., Lesschen, J. P. & Westhoek, H. (2013) The nitrogen footprint of food products in the European Union. *Journal of Agricultural Science*.

Lünenbürger, B., Benndorf, A., Börner, M., Burger, A., Ginzky, H., Ohl, C., Osiek, D., Schulz, D. & Strogies, M. (2013) Klimaschutz und Emissionshandel in der Landwirtschaft. *Climate Change* (ed Umweltbundesamt). Umweltbundesamt, Dessau.

Meier, T. & Christen, O. (2013) Environmental impacts of dietary recommendations and dietary styles: Germany as an example. *Environmental Science and Technology*, 47, 877-888.

Mills, G. & Harmens, H. (2011) Ozone Pollution: A hidden threat to food security. Report prepared by the ICP Vegetation.

Möckel, S. (2006) *Umweltabgaben zur Ökologisierung der Landwirtschaft*. Duncker & Humblot.

Möckel, S., Köck, W., Rutz, C. & Schramek, J. (2014) Rechtliche und andere Instrumente für vermehrten Umweltschutz in der Landwirtschaft. UBA Texte. Umweltbundesamt.

Mueller, N. D., Gerber, J. S., Johnston, M., Ray, D. K., Ramankutty, N. & Foley, J. A. (2012) Closing yield gaps through nutrient and water management. *Nature*, 490, 254-257.

Osterburg, B., Kätsch, K. & Wolff, A. (2013) Minderungspotential von Treibhausgasemissionen in der Landwirtschaft. UBA-Texte.

Osterburg, B. & Techen, A. (2012) Evaluierung der Düngeverordnung - Ergebnisse und Optionen zur Weiterentwicklung: Abschlussbericht (ed Bund Länder Arbeitsgruppe zur Evaluierung der Düngeverordnung). Bericht im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz.

Rahm, L., Jönsson, A. & Wulff, F. (2000) Nitrogen fixation in the Baltic proper: An empirical study. *Journal of Marine Systems*, 25, 239-248.

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, A., Chapin III, F. S., Lambin, E., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., de Wit, C. A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R. W., Fabry, V. J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P. & Foley, J. (2009) Planetary boundaries: Exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society*, 14.

Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) (2012) Umweltgutachten 2012: Verantwortung in einer begrenzten Welt. SRU.

Sala, O. E., Chapin III, F. S., Armesto, J. J., Berlow, E., Bloomfield, J., Dirzo, R., Huber-Sanwald, E., Huenneke, L. F., Jackson, R. B., Kinzig, A., Leemans, R., Lodge, D. M., Mooney, H. A., Oesterheld, M., Poff, N. L., Sykes, M. T., Walker, B. H., Walker, M. & Wall, D. H. (2000) Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 287, 1770-1774.

Schlesinger, W. H. (2009) On the fate of anthropogenic nitrogen. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106, 203-208.

Schulz, D., Irmer, U. & Geupel, M. (2009) Förderung des Ökolandbaus als strategischer Beitrag zur Verringerung umweltbelastender Stoffströme aus der Landwirtschaft in die Umwelt. Strategiepapier (ed Umweltbundesamt). Dessau.

Schumann, U. & Huntrieser, H. (2007) The global lightning-induced nitrogen oxides source. *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 3823-3907.

Stern, R. (2013a) PM10-Ursachenanalyse auf der Basis hypothetischer Emissionsszenarien Teilbericht zum F&E-Vorhaben „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung – PAREST“.

Stern, R. (2013b) Prognose der Luftqualität und Abschätzung von Grenzwertüberschreitungen in Deutschland für die Referenzjahre 2010, 2015 und 2020. UBA-Texte 65/2013 (ed Umweltbundesamt). Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Alexander, L. V., Allen, S. K., Bindoff, N. L., Bréon, F.-M., Church, J. A., Cubasch, U., Emori, S., Forster, P., Friedlingstein, P., Gillett, N., Gregory, J. M., Hartmann, D. L., Jansen, E., Kirtman, B., Knutti, R., Krishna Kumar, K., Lemke, P., Marotzke, J., Masson-Delmotte, V., Meehl, G. A., Mokhov, I. I., Piao, S., Ramaswamy, V., Randall, D., Rhein, M., Rojas, M., Sabine, C., Shindell, D., Talley, L. D., Vaughan, D. G. & Xie, S.-P. (2013) Technical Summary. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (eds T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex & P. M. Midgley), pp. 33–115. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Stokstad, E. (2014) Ammonia pollution from farming may exact hefty health costs. *Science*, 343, 238.

Sutton, M. A. & Bleeker, A. (2013) Environmental science: The shape of nitrogen to come. *Nature*, 494, 435-437.

Sutton, M. A., Bleeker, A., Howard, C. M., Bekunda, M., Grizzetti, B., de Vries, W., van Grinsven, H. J. M., Abrol, Y. P., Adhya, T. K., Billen, G., Davidson, E. A., Datta, A., Diaz, R., Erisman, J. W., Liu, X. J., Oenema, O., Palm, C., Raghuram, N., Reis, S., Scholz, R. W., Sims, T., Westhoek, H., Zhang, F. S., Ayyappan, S., Bouwman, A. F., Bustamante, M., Fowler, D., Galloway, J. N., Gavito, M. E., Garnier, J., Greenwood, S., Hellums, D. T., Holland, M., Hoysall, C., Jaramillo, V. J., Klimont, Z., Ometto, J. P., Pathak, H., Plocq Fichet, V., Powlson, D., Ramakrishna, K., Roy, A., Sanders, K., Sharma, C., Singh, B., Singh, U., Yan, X. Y. & Zhang, Y. (2013) Our Nutrient World: The Challenge to produce more food and energy with less pollution. Global Overview of Nutrient Management. Centre for Ecology and Hydrology, Edinburgh on behalf of the Global Partnership on Nutrient Management and the International Nitrogen Initiative.

Sutton, M. A., Howard, C. M., Erisman, J. W., Billen, G., Bleeker, A., Grennfelt, P., van Grinsven, H. & Grizzetti, B. (2011) The European nitrogen assessment: Sources, Effects and Policy Perspectives. Cambridge University Press, Cambridge, New York.

Umweltbundesamt (2009a) Hintergrundpapier zu einer multimedialen Stickstoffemissionsminderungsstrategie. Hintergrundpapier. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (2009b) Integrierte Strategie zur Minderung von Stickstoffemissionen.

Umweltbundesamt (2011) Stickstoff - Zuviel des Guten? (eds Schütze, G., Geupel, M.). Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (2012) Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990 – 2010

Umweltbundesamt (2013a) Globale Landflächen und Biomasse nachhaltig und ressourcenschonend nutzen. UBA Positionspapier (eds A. Jering, A. Klatt, J. Seven, K. Ehlers, J. Günther, A. Ostermeier & L. Mönch). Umweltbundesamt, Dessau.

Umweltbundesamt (2013b) Heizen mit Holz - Ein Ratgeber zum richtigen sauberen Heizen.

Umweltbundesamt (2013c) Schwerpunkte 2013 - Die Jahres-Publikation des Umweltbundesamtes. Jahresschwerpunkte (ed Umweltbundesamt). Umweltbundesamt, Dessau.

Umweltbundesamt (2014a) Ergebnisse des Bilanzierungsmodells MoRE/MONERIS

Umweltbundesamt (2014b) Genug getan für Mensch und Umwelt? Wirkungsforschung unter der Genfer Luftreinhaltekonvention.

Umweltbundesamt (2014c) Luftqualität 2013 Vorläufige Auswertung.

Umweltbundesamt (2014d) Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990 – 2012 in preparation.

Umweltbundesamt (2014e) Schwerpunkte 2014.

Umweltbundesamt (2014f) Wasserwirtschaft in Deutschland: Teil 1 – Grundlagen. (eds U. Irmer, D. Huber & A. Walter). Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.

Umweltbundesamt (2014g) Wasserwirtschaft in Deutschland: Teil 2 - Gewässergüte. (eds U. Irmer & K. Blondzik). Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.

United Nations Environment Programme (UNEP) (2012) Global Environment Outlook 5: Environment for the future we want.

van Grinsven, H. J. M., Holland, M., Jacobsen, B. H., Klimont, Z., Sutton, M. A. & Jaap Willems, W. (2013) Costs and Benefits of Nitrogen for Europe and Implications for Mitigation. *Environmental Science & Technology*, 47, 3571-3579.

Verband der Chemischen Industrie e. V. (VCI) (2012) Chemiewirtschaft in Zahlen 2012. VCI, Bochum.

Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA) (2012) Vorschlag zur Novellierung der Düngeverordnung. (ed VDLUFA Arbeitskreis Nachhaltige Nährstoffhaushalte). VDLUFA Arbeitskreis Nachhaltige Nährstoffhaushalte.

Westhoek, H., Lesschen, J. P., Rood, T., Wagner, S., De Marco, A., Murphy-Bokern, D., Leip, A., van Grinsven, H., Sutton, M. A. & Oenema, O. (2014) Food choices, health and environment: Effects of cutting Europe's meat and dairy intake. *Global Environmental Change*, 26, 196-205.

Wissenschaftlichen Beiräte für Agrarpolitik (WBA), Wissenschaftlichen Beiräte für Düngungsfragen (WBD) & Sachverständigenrates für Umweltfragen der Bundesregierung (SRU) (2013) Novellierung der Düngeverordnung (DüV): Nährstoffüberschüsse wirksam begrenzen - Kurzstellungnahme. Berlin.

Wochele, S., Kiese, R., Butterbach-Bahl, K. & Grote, R. (2009) Modellierung und Kartierung räumlich differenzierter Wirkungen von Stickstoffeinträgen in Ökosysteme im Rahmen der UNECE-Luftreinhaltekonvention. Teilbericht I: Simulationen ökosystemarer Stoffumsetzungen und Stoffausträge aus Waldökosystemen in Deutschland unter Berücksichtigung geänderter Stoffeinträge und Klimabedingungen. UBA-Forschungsbericht. gefördert durch Umweltbundesamt und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Dessau-Roßlau.



Xue, X. & Landis, A. E. (2010) Eutrophication potential of food consumption patterns. *Environmental Science and Technology*, 44, 6450-6456.





# Impressum

Herausgeber:  
Umweltbundesamt  
Fachgebiet II 4.3 – Luftreinhaltung und  
terrestrische Ökosysteme  
Postfach 14 06  
06844 Dessau-Roßlau  
Tel: +49 340-2103-0  
info@umweltbundesamt.de  
Internet: [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

 [/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)  
 [/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Redaktion:  
Markus Geupel, Jakob Frommer

Gestaltung:  
RHEINDENKEN GMBH, [www.rheindenken.de](http://www.rheindenken.de)

Publikationen als pdf:  
[www.uba.de/stickstoff-in-deutschland](http://www.uba.de/stickstoff-in-deutschland)

Bildquellen:  
iStockphoto: Titel, S. 11, S. 30, S. 31, S. 38, S. 56

Stand: Dezember 2014



► Diese Broschüre als Download

[www.uba.de/stickstoff-in-deutschland](http://www.uba.de/stickstoff-in-deutschland)



[www.facebook.com/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)



[www.twitter.com/umweltbundesamt](https://www.twitter.com/umweltbundesamt)