



Zerstört die Landwirtschaft das Klima?

10 Milliarden Menschen ernähren ohne das Weltklima zu ruinieren –
Wege aus einem globalen Konflikt

Dossier

im Auftrag des Instituts für Welternährung – World Food Institute e.V., Berlin,
mit finanzieller Unterstützung von Lehmann Natur

Recherche: Anne Preger

Redaktion: Wilfried Bommert und Manfred Linz

Verfügbar zum Download auf: www.institut-fuer-welternaeahrung.org

Stand: Oktober 2016

Inhalt

1. Worum es geht	3
2. Das Klimaproblem der Stickstoffdüngung	5
3. Warum Stickstoff gedüngt wird	8
4. Wie mineralischer Stickstoffdünger dem Klima schadet	9
5. Die Situation wird sich verschärfen	11
6. Was ist zu tun?	13
6.1 Maßnahmen im gegenwärtigen System	13
6.1.1 In der Produktion	13
6.1.2 Auf den Feldern	13
6.2 Ein fundamentaler Wandel: Ökologische Landwirtschaft	16
7. Politische Konsequenzen	18
7.1 Verbindliche Klimaziele für die Landwirtschaft	18
7.2 Eine nationale Stickstoffstrategie	18
7.2.1 Stickstoffsteuer	19
7.2.2 Klimabindung der Flächenprämie	19
7.2.3 Keine Subventionen für Agrosprit und Biogas	19
7.3 Forschungsförderung für ökologische Agrar- und Ernährungssysteme	20
Anmerkungen	21
Abkürzungsverzeichnis	23
Quellen und Literatur	24

1. Worum es geht

Eine katastrophale Veränderung des Weltklimas kann nur verhindert werden, wenn die globale Erwärmung unterhalb der 2-Grad-Marke bleibt. Dies ist der Konsens der Weltklimakonferenz 2015 in Paris. Die Landwirtschaft weltweit trägt ein Viertel zur Erderwärmung bei.ⁱ Deshalb spielt sie eine zentrale Rolle im Kampf gegen den Klimawandel. Auch das Ziel der Bundesregierung, bis 2050 Klimaneutralität zu erreichen, wird nur zu gewinnen sein, wenn die deutsche Land- und Ernährungswirtschaft selbst dazu einen erheblichen Beitrag leistet.

Die Klimalast des Ernährungssystems liegt nicht nur in der Produktion. Auch die Konsummuster und damit die Kaufentscheidungen der Menschen tragen wesentlich zum Treibhauseffekt bei, vor allem die Ernährung mit Fleisch- und Milchprodukten. Eine Entlastung wird nur durch die Reform beider Stränge, Produktion und Konsumgewohnheiten, zu bewältigen sein. Die Wende auf dem Acker muss Hand in Hand gehen mit einer Wende der Konsumgewohnheiten und Lebensstile in der Breite der Bevölkerung.

Dieses Dossier richtet sich jedoch gezielt auf die agrarische Produktion von Nahrungsmitteln und auf die politischen Vorgaben, die notwendig sind, um hier eine grundsätzliche Wende einzuleiten. Hier liegen die Prioritäten des Handelns. Im Zentrum dieser Studie steht der synthetische, also der industriell hergestellte Stickstoffdünger. Er ist der wichtigste Treibstoff der modernen Landwirtschaft und ein zentraler Treiber der Klimabelastung. Bis zur Mitte des Jahrhunderts droht diese Last noch einmal deutlich zu steigen. Grund dafür ist die steigende Nachfrage nach Nahrung und Rohstoffen. Damit ist eine weitere Verschärfung des Klimawandels durch die Landwirtschaft heute schon vorherzusehen und mit ihr eine wachsende Bedrohung der Ernten weltweit. Die Intensivierung der Landwirtschaft und der damit einhergehende Stickstoffeinsatz gefährden damit ihre eigentliche Aufgabe, die Welternährung zu sichern.

Dieser Konflikt ist auf dem derzeitigen Pfad der landwirtschaftlichen Intensivierung nicht zu lösen. Erforderlich ist, den bisher eingeschlagenen Weg grundsätzlich zu überdenken. Die Dringlichkeit der Lage verlangt durchgreifendes Nachdenken und Handeln auf allen Ebenen der Nahrungskette. Doch die EU hat bislang keine verbindlichen Klimaziele für die Landwirtschaft entwickelt.ⁱⁱ Die Bundesrepublik Deutschland bleibt in ihrem Klimaschutzplan für Marrakesch mit 31-34 Prozent für die Landwirtschaft deutlich hinter dem selbstgesteckten Gesamtziel der

Verringerung der Treibhausgase von 55 Prozent bis 2030 zurück. Der synthetische Stickstoff und seine zunehmende Gefahr für das Weltklima bleiben unerwähnt.

Heute wird die Hälfte der Weltbevölkerung mit Hilfe von synthetischem Stickstoffdünger ernährt. Doch die Menschheit wächst weiter. Hinzu kommen die Ansprüche der Bio-Ökonomie-Politik der Industrie- und Schwellenländern, die mehr Energie- und Industrierohstoffe von den Äckern beziehen wollen. Damit steigen noch einmal die Anforderungen an die Produktivität der Ackerflächen und den Einsatz von stickstoffhaltigem Dünger. Die FAO rechnet damit, dass diese Intensivierung der Landwirtschaft bis 2050 im Vergleich zu 2005/06 rund 60 Prozent mehr an Stickstoffdünger erfordern wird.ⁱⁱⁱ Dadurch wird auch die Menge der Treibhausgase erheblich steigen. Allein bis 2030, so prognostiziert der Weltklimarat, könnte der Ausstoß um 35 bis 60 Prozent zunehmen. Diese Entwicklung würde das Ziel der Weltklimakonferenz von Paris, die Erderwärmung unter 2 Grad zu halten, unerreichbar machen, wie auch die Vorgabe der Bundesregierung, bis 2050 Klimaneutralität zu erreichen, in Frage stellen. Auch für die Welternährung sind fatale Konsequenzen zu erwarten. Der Weltklimarat IPCC sieht die Sicherheit der Ernten in Gefahr, besonders in Indien und Afrika.

Dieser Konflikt zwischen Klima und Welternährung kann gelöst werden. Voraussetzung dafür sind zunächst klare Klimaziele für die Landwirtschaft und eine Reduktions- und Ausstiegsstrategie für die derzeitige Praxis der Stickstoffdüngung. Während die Reduktion eingeleitet wird und wirkt, müssen innerhalb der kommenden drei Jahrzehnte Alternativen zum synthetischen Stickstoff ausgebaut und der Einstieg in eine klimaverträgliche Land- und Ernährungswirtschaft erreicht werden.

Aus Gründen der globalen Vorsorge müsste die Landwirtschaft jedoch mehr leisten als nur Klimaneutralität für ihre eigene Produktion zu gewinnen. Sie müsste von einer Klimagasquelle zu einem Klimagaspuffer entwickeln werden, also mehr Klimagase auffangen als sie selbst ausstößt. Diese Pufferfunktion ist so wichtig, weil andere Bereiche wie Energie, Verkehr, Industrie einen längeren Bremsweg bei der Verringerung der Klimagase haben könnten, als bisher angenommen, aber keinen Puffer besitzen, der das Defizit ausgleichen kann. Diese Möglichkeit besitzen allein Landwirtschaft und Forstwirtschaft; nur sie arbeiten mit Pflanzen, die von Natur aus Klimagase aus der Luft filtern und speichern können.

Das Institut für Welternährung will mit diesem Dossier die Notwendigkeit quantitativer Klimaziele für die Landwirtschaft unterstreichen. Es soll die Möglichkeiten einer Reduktions- und einer Exit-Strategie aufzeigen und damit einen Beitrag zur

Überführung des Agrar- und Ernährungssystems in die postfossile Gesellschaft des 21. Jahrhunderts leisten.

2. Das Klimaproblem der Stickstoffdüngung

Vor dem Beginn des 20. Jahrhunderts war Stickstoff Mangelware. Von diesem Mangel war das Leben in Ökosystemen und in der Landwirtschaft geprägt. Stickstoff ist zwar als N_2 Hauptbestandteil der Atmosphäre, ist dort aber extrem stabil und reagiert in dieser elementaren Form chemisch quasi nicht. Es gab nur wenige natürliche Prozesse, durch die diese Quelle für Lebewesen angezapft werden konnte, unter anderem durch Blitze und Mikroorganismen, die in der Lage sind, N_2 in eine biologisch verwertbare Form zu überführen. Diese Stickstoff-Fixierung halten Biologen nach der Photosynthese für den bedeutendsten biologischen Vorgang auf der Erde.^{iv} Hülsenfrüchte wie Erbsen, Bohnen, Linsen und Klee, sogenannte Leguminosen, besitzen diese Fähigkeit Stickstoff zu binden. Im Laufe der Geschichte machte sich die Menschheit den Leguminosen-Anbau auch zu Dünge Zwecken zu eigen. Ab dem späten Mittelalter wurde der Klee domestiziert. Die Leguminosen traten ihren Siegeszug durch Europa an.^v Mit dem Anbau von Klee ließen sich Ackerböden mit Stickstoff anreichern. In der Folge wuchsen Getreide, aber auch anspruchsvolle Hackfrüchte wie Kartoffeln und Rüben besser.

Anfang des 20. Jahrhunderts konnten allerdings weder Klee noch importierter Chilesalpeter den Bedarf einer wachsenden Weltbevölkerung an Stickstoffdünger decken. Es lag eine andere Idee in der Luft – nämlich den Stickstoff-Vorrat in der Luft anzupapfen. Es war schließlich der deutsche Chemiker Fritz Haber, der 1909 eine Methode zum Patent anmeldete, mit der sich Luftstickstoff in Ammoniak umwandeln ließ. Carl Bosch sorgte dafür, dass das Verfahren nicht nur im Labor, sondern auch in großtechnischen Anlagen funktionierte. Ab 1913 begann die Industrie, biologisch verwertbaren, sogenannten „reaktiven“ Stickstoff herzustellen. Das Haber-Bosch-Verfahren ist eine der weitreichendsten Erfindungen der Menschheitsgeschichte. Es ermöglichte global eine landwirtschaftliche Revolution und in ihrer Folge eine Bevölkerungsexplosion. Hundert Jahre nach der Erfindung wird die Hälfte der Weltbevölkerung mit Hilfe von synthetisch hergestelltem Stickstoffdünger mit Nahrung versorgt.^{vi} So hat der Mensch seit dem Beginn des 20. Jahrhunderts radikal in den Stickstoffkreislauf der Erde eingegriffen.

Die moderne Landwirtschaft mit ihren Hochleistungspflanzen ist auf industriell hergestellten Dünger angewiesen. Die in den letzten hundert Jahren erreichte

Steigerung der Ernten wäre mit natürlichem Dünger wie Mist und Kompost nicht zu erreichen gewesen. Sie lässt sich nur mit einem hohen Stickstoffeinsatz während des Wachstums sichern. So sind die Mengen an industriellen Stickstoffdünger, die auf den Äckern insbesondere der Industrieländer ausgebracht werden, seit Einführung der Hybrid- und Hochleistungssorten dramatisch gestiegen.^{vii} Der eigentliche Höhenflug begann in den 1960er-Jahren mit dem rapiden Wachstum der Weltbevölkerung und der Verbreitung der Hochleistungspflanzen in den Industrieländern.

Produktion von Stickstoffdünger in Relation zur Weltbevölkerung

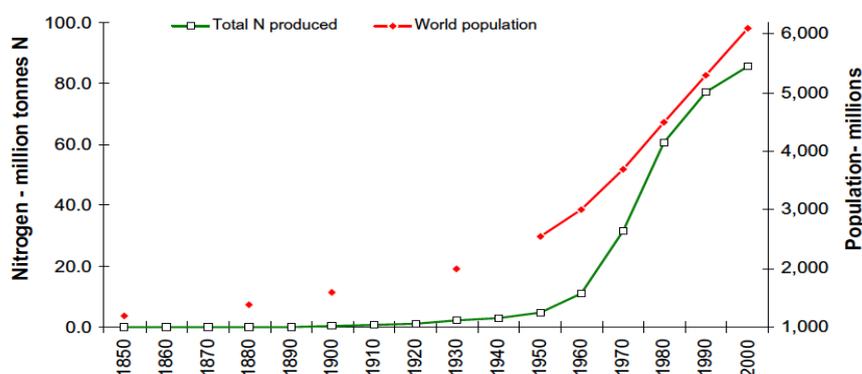


Fig. 2. Production of fertiliser nitrogen in relation to world population.

Quelle: C.J. Dawson and J. Hilton, Fertiliser Availability in a Resource limited World: Production and Recycling of Nitrogen and Phosphorus, Food Policy 2011

Diese Intensivierung der Düngung hatte zum einen zur Folge, dass die Erträge massiv anstiegen, als Beispiel: allein beim Winterweizen etwa in Deutschland zwischen 1960 und 2000 um rund 200 Prozent. Das war politisch erwünscht vor dem Hintergrund des Hungers in den Entwicklungsländern in den 50er- und 60er-Jahren. Die Grüne Revolution in Indien wäre ohne intensiven Stickstoffeinsatz nicht möglich gewesen. Erkauft wurde diese Steigerung der Ernten allerdings mit einer steigenden Klimabelastung.

Vor dem Hintergrund einer wachsenden Weltbevölkerung und zunehmender Nachfrage nach Agrosprit und Biorohstoffen für die Industrie wird der Bedarf an Stickstoffdünger steigen. Kurzfristig bis 2018 geht die FAO 2015 von einem Anstieg des globalen Bedarfs von jährlich 1,4 Prozent aus. Das bedeutet laut Industrieverband Agrar, dass aktuell mit jedem Jahr mindestens 1,5 Millionen Tonnen Stickstoff

zusätzlich produziert werden wird. Anders ausgedrückt: Jedes Jahr müssen drei neue Düngemittelwerke global in Betrieb gehen.^{viii}

Lange Zeit ist die Abhängigkeit der Landwirtschaft von synthetischem Stickstoff nicht als Gefährdung erkannt worden. Erst seit 1997 wächst mit dem in Kyoto beschlossenen Klimaregime das Bewusstsein über die schädigende Wirkung des intensiven Stickstoffdüngens. Es geht dabei vor allem um das höchst aggressive Lachgas (Distickstoffmonoxid), das bei der Anwendung von Stickstoffdünger zwangsläufig entsteht und in die Atmosphäre entweicht. Je größer der Eintrag, desto mehr Lachgas entsteht auf den Flächen. Lachgas kommt auch natürlicherweise in der Erdatmosphäre vor. Dort halten sich Lachgas-Moleküle extrem lang, etwa 121 Jahre.^{ix} Das Treibhausgas absorbiert Infrarotstrahlung und wirft Wärmestrahlung auf die Erdoberfläche zurück. Auf diese Weise hält es Wärme in der Erdatmosphäre fest. Lachgas ist dabei extrem effizient: Im Verlauf von 100 Jahren hält ein einziges N₂O-Molekül genauso viel Wärme zurück wie etwa 298 Kohlendioxid-Moleküle (CO₂), ist also um diesen Betrag wirksamer.^x Deswegen tragen schon kleinste Mengen an Lachgas-Emissionen spürbar zur Erderwärmung bei.

Es gibt keine praxistauglichen technischen Möglichkeiten, Lachgas aus der Atmosphäre zu entfernen. Nur im oberen Teil der Atmosphäre, der Stratosphäre, wird Lachgas photochemisch zerstört. Es reagiert dort unter Sonnenlichteinwirkung mit Ozon und trägt so zur Zerstörung der Ozonschicht bei. Nachdem inzwischen deutlich weniger Fluorkohlenwasserstoffe und andere ozonabbauende Stoffe freigesetzt werden, gilt Lachgas als die treibende Kraft für die Gefährdung der Ozonschicht.^{xi}

Die Belastung durch Lachgas ist seit dem Beginn des 20. Jahrhunderts stark angestiegen. Die Hauptverantwortung dafür trägt der stickstoffhaltige Dünger der Landwirtschaft.^{xii} Der Weltklimabericht schätzt ab, wie viel Lachgas aus welchen Quellen pro Jahr aktuell in die Atmosphäre gelangt: Aus der Landwirtschaft stammten im Jahr 2006 rund 60 Prozent der menschlich verursachten Lachgas-Emissionen.^{xiii} In Deutschland lag der Anteil der Landwirtschaft acht Jahre später 2014 sogar bei rund 80 Prozent.^{xiv}

3. Warum Stickstoff gedüngt wird

Pflanzen brauchen – wie alle anderen Lebewesen auch – zum Wachsen das Element Stickstoff. Es ist lebensnotwendiger Bestandteil aller Zellen. Natürlicherweise enthält der Erdboden nicht so viel Stickstoff, wie ihn Pflanzen für große Ernten und schnelles Wachstum benötigen. Wo nicht gedüngt wird, wachsen Pflanzen langsamer und bringen weniger Ertrag als dort, wo der Nährstoffhaushalt mit zusätzlichen Mengen an Dünger aufgestockt wird. Das gilt sowohl für Pflanzen auf Äckern, für den Anbau von Gemüse und auch für Gras auf Grünlandstandorten.

Im Boden liegt der meiste Stickstoff in einer Form vor, die für Pflanzen nicht direkt verdaulich ist. Er ist gebunden in lebenden Mikroorganismen und abgestorbenem organischem Material, dem Humus. An diesen Vorrat kommt eine Pflanze nur dann heran, wenn Mikroorganismen Humus zersetzen und dabei Stickstoff in pflanzenverfügbarer Form freisetzen, z.B. in Form von Nitrat (NO_3^{-2}) oder Ammonium (NH^{4+}).

In der Landwirtschaft wird Stickstoffdünger in drei Formen verwandt: als Mineralischer Dünger, als Wirtschaftsdünger und als Gründüngung.

Mineralische Stickstoff-Dünger werden fast ausschließlich synthetisch hergestellt. Dabei haben Landwirte mehrere synthetische Stickstoff-Dünger-Arten zur Auswahl. Weltweit am meisten eingesetzt wird Harnstoff.^{xv} In der Europäischen Union wird laut Eurostat vor allem Ammoniumnitrat eingesetzt. Und in Deutschland kommt laut statistischem Bundesamt vor allem Kalkammonsalpeter zum Einsatz.

4. Wie mineralischer Stickstoffdünger dem Klima schadet

Bei industriell hergestelltem Stickstoffdünger belasten sowohl die Herstellung wie auch die Anwendung das Klima deutlich. Schon die Synthese von Ammoniak aus Luftstickstoff mit Hilfe des Haber-Bosch-Verfahrens ist ein energieintensiver Prozess. Es sind extrem hohe Temperaturen und Drücke notwendig. Die eingesetzte Energie stammt nahezu ausschließlich aus fossilen Brennstoffen. Eine anschauliche Faustgröße für den Energiebedarf der Düngerherstellung ist: 1 Kilogramm Düngerstickstoff braucht den Energiegehalt von 1 Liter Erdöl. Schätzungen besagen, dass die industrielle Herstellung von reaktivem Stickstoff rund zwei Prozent des weltweiten Energiebedarfs ausmacht.^{xvi}

Synthetischer Dünger wird weltweit primär unter Nutzung von Erdgas hergestellt. Eine Ausnahme bildet die chinesische Düngemittelindustrie, die einen Großteil des Stickstoffdüngers mit Kohle synthetisiert, was noch mehr Klimagase freisetzt als Erdgas. China ist weltweit der größte Produzent von Stickstoffdünger.^{xvii}

Rechnet man allein den Energiebedarf bei der Produktion von synthetischem Stickstoff, so kommt man auf einen Wert von 0.4–0.6 Gigatonnen CO₂. Das entspricht rund 10 Prozent der Treibhausgasemissionen der globalen Landwirtschaft.^{xviii}

Bei der Anwendung des Stickstoffdüngers stehen Landwirte vor einer grundsätzlichen Schwierigkeit: Pflanzen brauchen zum Wachsen kontinuierlich Stickstoff-Nachschub, gedüngt wird aber stoßweise. Das führt dazu, dass Pflanzen meist nur 20 bis 50 Prozent des ausgebrachten Düngerstickstoffs aufnehmen. Je mehr Stickstoffdünger in den Boden gelangt und in ihm bleibt, desto mehr Lachgas entsteht – aufgrund von mikrobieller Nitrifikation und Denitrifikation.

Der Weltklimarat geht dabei bislang von einem linearen Zusammenhang zwischen dem Einsatz von mineralischem Stickstoff und der Entstehung von Lachgas aus.^{xix} Diese Annahme hat die europäische Düngemittelindustrie in ihren Berechnungen übernommen.^{xx} Doch Forscher haben inzwischen globale Studien ausgewertet und finden einen nicht-linearen Zusammenhang. Er bedeutet: Wird mehr Stickstoff gedüngt, entsteht überproportional mehr an Lachgas.^{xxi} Das gilt vor allem für Böden, die sauer und/oder humusreich sind oder nur einmal im Jahr gedüngt werden. Wird über den Stickstoffbedarf der Pflanzen hinaus gedüngt, steigen die Lachgas-Emissionen sogar exponentiell. Hinzu kommt, dass Stickstoffdünger die Böden

versauern. Dagegen werden Böden gekalkt. Auch durch Kalkgewinnung und die Anwendung von Kalk auf dem Boden entsteht zusätzliches Treibhausgas, in diesem Fall CO₂.

Beim Einsatz synthetischer Dünger kommt es ungewollt zu erheblichen Verlusten. Zum einen wird Nitrat aus Düngemitteln im Boden ausgewaschen und gelangt ins Grundwasser. Zum andern kann Boden und der in ihm enthaltene Dünger-Stickstoff durch Regen und Winde vom Acker getragen werden. Ammoniak-Dünger entweicht über die Luft und wird auf diesem Weg in andere Ökosysteme eingetragen. Diese weiträumigen Effekte der Düngung ziehen natürliche Ökosysteme in Mitleidenschaft.

Noch bedeutender ist jedoch, dass die ausgetragenen Düngerreste jenseits des Ackers den Grundstoff für weitere Lachgasproduktion bilden. So entstehen Treibhausgase in Kläranlagen, Gewässern, im Grundwasser, in Sedimenten und im Ozean. In Seen, Flüssen und Meeresregionen führt das zu massenhaft wachsenden Algenteppichen, wie vor der Ostküste Chinas. Dort bildet sich als Folge von Überdüngung alljährlich im Sommer ein Algenteppich, der die Küstengewässer des Gelben Meeres grün färbt. 2013 war der Teppich fast 30 000 Quadratkilometer groß. Sinken die Algen ab und werden zersetzt, entstehen im Wasser sauerstofffreie Zonen. Neben Lachgas wird dort auch noch das Treibhausgas Methan frei.

Gelangt Ammonium über die Atmosphäre in Waldböden, hemmt es dort die Methanaufnahme, also die Entfernung des Treibhausgases aus der Luft.^{xxii} Auf Feldern oder in Landökosystemen werden menschliche Maßnahmen einen Rückgang der Lachgas-Emissionen bewirken können. Anders jedoch im Ozean. Dort lagern die Reste der jahrzehntelangen Überdüngung im Küstensediment. Die mikrobiellen Lachgas-Produzenten können noch lange Zeit auf diese Vorräte zu weiterer Produktion des gefährlichen Klimagases zurückgreifen.

Auch andere Dünger wie Gülle, Mist und Kompost haben eine Klimawirkung. Die mikrobiellen Lachgas-Produzenten sind nicht wählerisch. Sie verarbeiten Ammonium und Nitrat jeder Herkunft. Doch unser Fokus gilt in diesem Dossier der synthetischen Stickstoffdüngung, weil ihre Auswirkung auf den Klimawandel die der gerade genannten Dünger weit übersteigt.

5. Die Situation wird sich verschärfen

Der Blick nach vorn zeigt, dass sich das Klimaproblem der Stickstoffdüngung verschärfen wird. Die Weltbevölkerung wächst. Die Vereinten Nationen gehen für das Jahr 2050 von 9,7 Milliarden Erdenbürgern aus (Prognose von 2015). Hinzu kommt: In vielen Ländern steigt der Lebensstandard und damit der Konsum. Besonders klimawirksam ist dabei der wachsende Verzehr von Fleisch und Milchprodukten.^{xxiii} Die FAO rechnet damit, dass 2050 weltweit 60 Prozent mehr Lebensmittel benötigt werden als 2005/2007. Diese Steigerung zu erreichen wird erhebliche Schwierigkeiten machen. Eine Ausweitung der Fläche für die Landwirtschaft ist kaum noch möglich, ohne auf die überlebenswichtigen Urwälder und Naturschutzflächen zurück zu greifen.^{xxiv} Hinzu kommt, dass die derzeitige Bewirtschaftung die Bodenfruchtbarkeit bisher schon verringert hat, die Vereinten Nationen sprechen von 52 Prozent landwirtschaftlich genutzten Fläche.^{xxv} Auch die schnell wachsenden Städte besonders in Asien und Afrika verschlingen weitere Bodenreserven.

Der wachsenden Weltbevölkerung steht also pro Kopf eine schrumpfende Fläche zur Nahrungsmittelproduktion gegenüber. Konnte im Jahr 2005/2007 noch jeder Mensch im Schnitt mit einer Ackerfläche von ca. 0,24 Hektar rechnen, wird diese Basis der Ernährung im Jahr 2050 auf 0,18 Hektar schrumpfen, umgerechnet 1800 Quadratmeter, oder eine Ackerfläche von 18 m mal 100 m.^{xxvi}

Hinzu kommt der wachsende Bedarf an Biomasse. Die FAO geht davon aus, dass der Anbau von Bioenergiepflanzen zunehmen wird. Die Bio-Ökonomie-Konzepte der Industrieländer, die fossile Industrierohstoffe durch nachwachsende Quellen ersetzen wollen, werden die Situation verschärfen. Setzen sie sich durch, müssen auf den vorhandenen Flächen wesentlich größere Erträge erzielt werden.

Und damit verschärft sich die Krise. Höhere Erträge auf gleicher Fläche gehen mit höherem Düngereinsatz einher. Wie oben berichtet, rechnet die FAO bis Mitte des Jahrhunderts mit rund 60 Prozent mehr ausgebrachten Stickstoff, Phosphor und Kalium im Vergleich zu 2005/2007.^{xxvii} Dabei sind Effizienzgewinne schon einkalkuliert, jedoch die Bio-Ökonomie-Konzepte sind noch nicht eingerechnet.

Diese Intensivierung der Landwirtschaft durch verstärkten Einsatz von Dünger wird vorhersehbar die Treibhausgas-Emissionen beschleunigen. Damit könnte sich der Anteil, den die Landbewirtschaftung zur Erderwärmung beiträgt, weiter steigern. Das

bedeutet: Wird das Wachstum der Klimagase im Ernährungssystem nicht beendet und eine Verringerung nicht eingeleitet, wird das überlebenswichtige 2 Grad-Ziel bis 2050 nicht erreichbar sein. Ebenso rückt das Klimaziel der Bundesregierung, bis 2050 Klimaneutralität zu erreichen, indem die Klimagase in der Landwirtschaft um 50 Prozent reduzieren werden, in weite Ferne.

Der Handlungsdruck auf Landwirtschaft und Politik wächst.

6. Was ist zu tun?

Zwei Ziele sind zu verfolgen, und zwei Strategien gleichzeitig anzuwenden. Die beiden Ziele: Der Ausstieg aus der synthetischen Stickstoffdüngung und zugleich der Einstieg in eine Landwirtschaft, die ohne synthetischen Stickstoff ertragreich wirtschaften kann. Die Strategien: Innerhalb des heutigen Agrarsystems muss die Effizienz des synthetischen Stickstoffs zügig verbessert und sein Einsatz deutlich verringert werden. Gleichzeitig muss die Zeit genutzt werden, um agrarökologische Methoden flächendeckend und mit Gewinn für die Klimastabilität umzusetzen.

6.1 Maßnahmen im gegenwärtigen System

In zwei Bereichen lassen sich kurzfristig erhebliche Mengen von Klimagasen einsparen: in der Produktion und auf den Feldern.

6.1.1 In der Produktion

Produzenten von Stickstoff-Mineraldünger können das bei der industriellen Nitrat-Herstellung entstehende Lachgas erheblich verringern. Die Reduktion liegt bei 70 bis 85 Prozent.^{xxviii} Durch solche optimierenden Maßnahmen können Düngemittelhersteller nach eigenen Angaben in der Produktion um die 25 Prozent ihrer Treibhausgasemissionen einsparen.^{xxix} China als weltgrößter Stickstoff-Düngerproduzent hat darüber hinaus die Option, Stickstoffdünger unter Einsatz von Erdgas anstelle von Kohle herzustellen. Auch das vermindert kurzfristig die Treibhausgasemissionen.

Ein Teil der Produktionsstätten in Europa wurde bereits modernisiert. Für Landwirte ist aber bislang nicht erkennbar, ob ihr Mineraldünger mit klimaschonender Technologie produziert wurde. Ein Zertifizierungssystem kann Landwirten diese Information liefern und damit den Prozess vorantreiben.

Unabhängig von diesen Verbesserungen bleibt als klimarelevante Größe der Energieeinsatz bei der Synthese des Stickstoffs aus der Luft.

6.1.2 Auf den Feldern

Die Wirksamkeit des Stickstoffeinsatzes in der deutschen Agrarwirtschaft liegt derzeit bei nur rund 50 Prozent. Der Stickstoffüberschuss auf deutschen Äckern, der von den Pflanzen nicht genutzt werden kann, liegt bei 80 kg N/ha. Das Klimagutachten 2016 des Sachverständigenrates beim Bundeslandwirtschaftsminister

kommt zu dem Schluss, dass der Stickstoff-Überschuss pro Jahr in Deutschland seit 2004 kaum zurückgegangen ist. Es handelt sich dabei um eine Menge von rund 250 000 LKW-Ladungen Stickstoff-Dünger, rechnet der Kieler Agrarwissenschaftler Friedhelm Taube vor.^{xxx}

Um diese Überschüsse zu beseitigen, fehle es jedoch an fachlichem Wissen und am Willen bei den Landwirten, so Taube. In Schleswig-Holstein hielten rund 70 Prozent der Landwirte die gute fachliche Praxis nicht ein, ebenso in Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen. Darüber hinaus mangle es an Sanktionsmechanismen, beklagen die Gutachter.^{xxxi}

Eine gute Möglichkeit, Klimagase zu vermeiden, gibt es auf Grünland. In Deutschland, Frankreich und Großbritannien gehört es zur Praxis, auf Grünland synthetischen Stickstoff-Dünger einzusetzen.^{xxxii} Doch das ist überflüssig, wenn stattdessen Leguminosen angebaut werden und wenn das Gülle-Management verbessert wird und zwar ohne Einbußen bei der Heu- und Silageernte.^{xxxiii}

Oft ist es auch sinnvoll, auf Stickstoffdüngung ganz zu verzichten, beispielsweise für nasse Moorböden, in denen die Lachgasproduktion durch Denitrifikation besonders intensiv abläuft.

Der Stickstoffbedarf hängt nicht nur von der jeweils angebauten Feldfrucht ab, sondern auch von der vorangehenden Nutzung des Bodens, der sog. Fruchtfolge: Wenn Landwirte berücksichtigen, wie viel Stickstoff durch die Kultur und Düngung der Vorjahre noch im Boden gespeichert ist, lassen sich Klimagase einsparen.^{xxxiv}

Wie viel Stickstoff genau an dem Ort zugeführt werden sollte, an dem eine Pflanze wächst, hängt außerdem entscheidend von der Bodenqualität ab. Diese kann auf Feldern sehr stark schwanken. Mithilfe moderner Precision Farming-Technik ist es möglich, diese Schwankungen zu erfassen und durch teilflächenspezifisches Düngen auszugleichen. Untersuchungen in Deutschland haben gezeigt, dass sich durch teilflächenspezifische Düngung die Stickstoff-Dosis schon um 10 bis 15 Prozent ohne Ertragseinbuße reduzieren ließe.^{xxxv}

Weniger Stickstoff zu düngen, muss nicht die Erträge senken. Ziel einer effizienten Düngung ist es, Verluste von Ammoniak und Nitrat klein zu halten und zu verhindern, dass die mikrobiellen Lachgas-Produzenten im Boden von Überschüssen profitieren. Mit einer effizienteren Düngung kann nach Ergebnissen von US-Forschern bei gleicher Erntemenge bei Getreide 50 Prozent des um die Jahrhundertwende eingesetzten Stickstoffs eingespart werden.^{xxxvi}

Die bisher vorgestellten Maßnahmen zielen vor allem auf die Verringerung der industriell produzierten Stickstoffmenge. Doch diese Reduktion wird nicht ausreichen, um das 2-Grad-Ziel zu erreichen. Notwendig ist, die synthetische Stickstoffdüngung ganz überflüssig zu machen und sie durch natürliche agrarökologische Verfahren zu ersetzen. Diese Maßnahmen lassen sich schon im gegenwärtigen Agrarsystem anwenden und bilden gleichzeitig eine Brücke zu dem vor uns liegenden Wechsel zu einem ökologischen Landbausystem.

In diesem Übergang spielen Leguminosen eine zentrale Rolle. Die Vereinten Nationen haben 2016 zum Internationalen Jahr der Hülsenfrüchte erklärt. Damit weisen die UN nicht nur auf die Bedeutung von Leguminosen für die menschliche Eiweiß-Versorgung hin, sondern auch auf die Möglichkeiten, die Hülsenfrüchte in der Stickstoff-Versorgung von Böden bieten.

Die Eigenart dieser Pflanzen ist es, durch eine Symbiose mit Stickstoff-fixierenden Bakterien selbst den Pflanzennährstoff zu erzeugen. Pro Hektar bringen sie 20 bis 140 Kilogramm Stickstoff hervor, der im Boden für weitere Pflanzengenerationen festgehalten wird.^{xxxvii} Damit möglichst viel pflanzlich fixierter Stickstoff den Folgekulturen zugute kommt, kann auf schnellwachsende Arten zurückgegriffen werden, z. B. Grünhafer, Grünroggen oder Senf.^{xxxviii}

Was es ökologisch und ökonomisch bedeutet, Hülsenfrüchte in eine konventionelle Fruchtfolge aufzunehmen, haben Forscher des Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) zusammen mit anderen europäischen Wissenschaftlern an fünf verschiedenen europäischen Standorten untersucht.^{xxxix} Ihr Ergebnis: Durch Hülsenfrüchte in der Fruchtfolge lassen sich 24 bis 38 Prozent des synthetischen Stickstoffdüngers einsparen. Dadurch würde in der Konsequenz 18 bis 33 Prozent weniger Lachgas frei.^{xl}

Stickstoff-fixierende Hülsenfrüchte eignen sich als Gründünger. Durch Unterpflügen oder Mulchen wird dem Boden organische Substanz zugeführt und verstärkt Humus gebildet, der wiederum Stickstoff bindet und dessen Auswaschen verhindert. Während des Wachstums entziehen sie dem Ackerboden auch Reste des Mineraldünger-Stickstoffs, der für die vorher angebaute Pflanzenart ausgebracht wurde und überschüssig ist. Mithilfe von Gründüngung lässt sich so der Stickstoffeinsatz auf einer Ackerfläche umweltschonend regulieren. Gründünger-Pflanzen schützen außerdem vor Bodenerosion.

Alle bisher besprochenen Maßnahmen sind dringend notwendig, um die Klimaschädigung durch den Eintrag synthetischen Stickstoffs in den Boden zu verringern.

Sie erleichtern die Klimabelastung; aber sie tun es nur teilweise, und sie tun es vor allem nur kurzfristig, weil die Anforderungen an den industriell ausgerichteten Intensiv-Landbau weiter wachsen und mit ihm der Bedarf an synthetischem Stickstoff – durch das Bevölkerungswachstum wie auch durch die steigenden Ansprüche an veredelte Nahrung. Die auf synthetischen Stickstoff angewiesene Landwirtschaft kann darum ihren hohen Anteil an der Klimaschädigung nicht selbst beheben. Soll die Welternährung gesichert werden, ohne dabei die Atmosphäre zu zerstören, ist nur ein fundamentaler Wechsel zu einer klimaverträglichen Landwirtschaft aussichtsreich.

6. 2 Ein fundamentaler Wandel: Ökologische Landwirtschaft

Der fundamentale Wandel zur Sicherung des Weltklimas und der Welternährung ist eine Generationenaufgabe. Sie muss innerhalb der kommenden drei Jahrzehnte gelingen. Der Zeitraum von einer Generation muss reichen, um den Systemwechsel zu vollbringen. Er kann ausreichen, wenn die Stärken des ökologischen Landbaus konsequent in Forschung und Praxis weiterentwickelt werden. Hier soll uns sein Umgang mit Dünger und seine Klimarelevanz beschäftigen.

Die ökologische Landwirtschaft verzichtet ganz auf synthetische Stickstoffdünger. Auch der Anbau von Leguminosen und Gründüngung gehören zum Standard des ökologischen Landbaus. Das räumt ihr in der Treibhausdebatte einen fundamentalen Vorteil ein. Doch in der Detailbetrachtung scheinen diese grundsätzlichen Vorteile zu verblassen. Es gibt für die gemäßigten Breiten inzwischen eine Reihe von Studien, die die Lachgasbilanz von ökologischem mit konventionellem Landbau vergleichen. Forscher haben diese Studien gebündelt ausgewertet. Sie kommen zu dem Schluss, dass Ökolandbau bezogen auf die Anbaufläche weniger Lachgas freisetzt. Bezogen auf die Erntemenge jedoch scheint dieser Vorsprung zu schmelzen. Als Grund wird angegeben, dass die Erträge im ökologischen Landbau geringer seien als im stickstoffgetriebenen konventionellen.^{xii}

Bei genauer Betrachtung erweisen sich diese Vergleiche jedoch als zu oberflächlich und daher als nicht aussagekräftig, weil sie wichtige Teileffekte nicht berücksichtigen. So zum Beispiel die Klimagase, die bei der Herstellung von synthetischem Stickstoff, beim Transport und bei der Ausbringung entstehen. Ebenso wenig berücksichtigen sie die externalisierten Effekte, die durch Erosion und Auswaschung jenseits der Felder das Klima belasten. Auch die sind erheblich für die Klimawirkung des synthetischen Stickstoffdüngers verantwortlich. Andererseits lassen sie

Treibhausgas mindernde Effekte des ökologischen Anbaus außer acht, wie das Fixieren von Treibhausgasen durch Humuswirtschaft und das Vermeiden von Erosion durch Gründüngung, ganzjährige Bedeckung und pfluglose Bearbeitung.

Neueste Studien aus der Washington State University beklagen, dass der Blick nur auf ein Leistungsmerkmal beim Vergleich der Landbausystemen nicht ausreicht, um ihren Vorzug zu beurteilen. Sie vergleichen stattdessen die Gesamtleistungen der unterschiedlichen Landbausysteme, wie sie in den letzten 40 Jahren dokumentiert wurden, und kommen dabei zu dem Schluss: *„Overall, organic farms tend to store more soil carbon, have better soil quality, and reduce soil erosion. Organic agriculture also creates less soil and water pollution and lower greenhouse gas emissions. And it's more energy efficient because it doesn't rely on synthetic fertilizers or pesticides. It is also associated with greater biodiversity of plants, animals, insects and microbes as well as genetic diversity. Biodiversity increases the services that nature provides like pollination and improves the ability of farming systems to adapt to changing conditions.“*^{xlii}

Die Welternährungs-Organisation FAO stellt 2016 in ihren Untersuchungen fest, dass ein tragfähiger System-Vergleich erst möglich ist, wenn man längere Bewirtschaftungsperioden, so genannte Life cycle assessments, ins Auge fasst. *„Life cycle assessments show that emissions in conventional production systems are always higher than those of organic systems, based on production area. Lower greenhouse gas emissions for crop production and enhanced carbon sequestration, coupled with additional benefits of biodiversity and other environmental services, makes organic agriculture a farming method with many advantages and considerable potential for mitigating and adopting to climate change.“*^{xliii}

Der wissenschaftliche Beirat des Landwirtschaftsministers kommt in seinem Gutachten 2016 zu dem Schluss: *„Als Fazit kann festgehalten werden, dass politische Maßnahmen zur Ausdehnung des ökologischen Landbaus aus Gründen des Klimaschutzes v. a. dann sinnvoll erscheinen, wenn zusätzliche Bedingungen/Voraussetzungen wie z. B. leichte Böden oder hoher Grünlandanteil (vgl. Taube et al. 2006) erfüllt und Win-win-Effekte mit weiteren Umweltleistungen evident sind.“*^{xliiv} Diese flächenmäßige Einschränkung scheint jedoch aus den in dieser Studie vorgebrachten Gründen nicht gerechtfertigt.

Wie groß der prinzipielle Vorteil des ökologischen Landbaus im Vergleich zum Stickstoffgetriebenen ist, lässt sich gegenwärtig in Zahlen noch nicht genau fassen. Das zu ermitteln wird die Aufgabe weiterer Forschung sein.

7. Politische Konsequenzen

Um die Klimaziele der Weltgemeinschaft zu erreichen, muss die Treibhausgasbelastung in den nächsten drei Jahrzehnten radikal heruntergefahren werden. Ohne eine klimaverträgliche Veränderung von Landwirtschaft und Ernährung wird das 2 Grad Ziel des Klimavertrages von Paris nicht zu erreichen sein.^{xlv} Insbesondere der synthetische Stickstoff spielt für die Reduktion eine zentrale Rolle.

7.1 Verbindliche Klimaziele für die Landwirtschaft

Um die internationalen Klimaschutzziele zu erreichen und die Auswirkungen des Klimawandels zu begrenzen, will die Bundesregierung die gesamten Treibhausgasemissionen Deutschlands bis 2020 gegenüber dem Niveau von 1990 um 40 Prozent und bis 2050 um 80 bis 95 Prozent senken. Das Ziel deutscher Politik ist ein „Treibhausgasneutrales Deutschland“.^{xlvi} Doch weder in der EU noch in Deutschland existierten bislang verbindliche quantitative Klimaziele für die Landwirtschaft.^{xlvii} Damit fehlte der Klimapolitik in diesem Bereich bisher jede Orientierung.

Erst im Klimaschutzplan für Marrakesch veröffentlicht die Bundesregierung im November 2016 einen Grenzwert für 2030. Er bleibt mit 31-34 Prozent für die Landwirtschaft deutlich hinter dem selbstgesteckten Gesamtziel der Verringerung der Treibhausgase von 55 Prozent zurück. Der synthetische Stickstoff und seine zunehmende Gefahr für das Weltklima bleiben unerwähnt.

Der Ziel-, Zeit- und Maßnahmenplan der Bundesregierung muss für die Landwirtschaft konkretisiert und um den Aspekt des synthetischen Stickstoffs ergänzt werden. Klar werden muss, wie das Ziel, die Treibhausgase bis 2030 von 55 Prozent bzw. bis 2050 um bis zu 95 Prozent zu senken, in der Landwirtschaft konkret erreicht werden kann.

7.2 Eine nationale Stickstoffstrategie

Dieses Ziel kann konkret gefördert werden durch eine nationale Stickstoffstrategie, wie sie der Sachverständigenrat für Umweltfragen von der deutschen Bundesregierung und den Ländern fordert. Sie soll festlegen, wie viel reaktiver Stickstoff in Deutschland in die Umwelt gelangen darf.^{xlviii} Bei der Emissionsminderung spielt die Landwirtschaft eine Schlüsselrolle. Hier sieht der Sachverständigenrat ein enormes Minderungspotenzial, allerdings auch ein erhebliches Regelungsdefizit im Vergleich

zu anderen Wirtschaftssektoren. Dort wird der Ausstoß von reaktiven Stickstoffverbindungen, der aus Schornsteinen von Industrieanlagen und Auspuffen von Fahrzeugen entweicht, deutlich schärfer reguliert als im Agrarbereich.^{xlix}

Umweltvorgaben allein sind aber nicht genug, denn die existieren teilweise schon in der deutschen Düngeverordnung. Das eigentliche Problem sieht der Sachverständigenrat bei Kontrolle und Sanktionen.ⁱ Wenn es gelingt, die Düngeverordnung durchzusetzen, ist damit eine Verringerung der Treibhausbelastung von 3,3 Mio. Tonnen CO₂ auf den Äckern und von zusätzlich 2,5 Millionen Tonnen durch die Verringerung der Düngerproduktion möglich.ⁱⁱ

7.2.1 Stickstoffsteuer

Eine Steuer auf mineralischen Stickstoffdünger wird in Teilen der USA und Europas bereits erhoben. Sie ist auch für Deutschland ratsam. Das Öko-Institut empfiehlt, mit den Einnahmen die Aus- und Fortbildung von Landwirten zu verbessern.ⁱⁱⁱ

7.2.2 Klimabindung der Flächenprämie

Die EU-Flächenprämie wird heute weitgehend ohne klimawirksame Auflagen an die Landbewirtschaftler ausgezahlt. Wenn sie an eine klimaneutrale Bewirtschaftung geknüpft wird, ist damit ein flächendeckender Anreiz geschaffen, den Stickstoffeinsatz zu verringern sowie die Humusvorräte im Boden zu erhöhen und den Anbau von Stickstoff fixierenden Leguminosen auszuweiten. Für Deutschland beträgt die Prämie im Schnitt 300 Euro pro Hektar und Jahr. Wird die Prämie an die Klimaverträglichkeit der Bewirtschaftung gebunden, kann sie eine starke Hebelwirkung entfalten. Das Subventionsvolumen der EU liegt bei 50 Milliarden Euro.

7.2.3 Keine Subventionen für Agrosprit und Biogas

Agrosprit und Biogasanlagen tragen zu erheblichen Klimagasbelastungen bei. Der Anbau von Energiepflanzen verschlingt Mengen an synthetischem Stickstoff. Das Ziel, über Energiepflanzen insbesondere das Klimagas CO₂ zu reduzieren, hat sich in unseren Breiten faktisch als Irrweg erwiesen. Dennoch erhält der Anbau erhebliche Subventionen; zum einen durch die Flächensubvention der EU, zum anderen durch den Einspeisungszwang bei Kraftstoffen und auch noch durch die Einspeisevergütung für Strom. Alle drei Subventionen erweisen sich unter Klimagesichtspunkten als schädlich. Sie sollten im Rahmen einer nationalen Klimastrategie gestrichen werden.

Bioenergie sollte stattdessen aus Abfall- oder Reststoffen gewonnen werden. Diese Umstellung lässt sich unterstützen. Unter anderem schlägt das Öko-Institut vor,

Landwirte finanziell zu fördern, wenn sie Anlagen zur Vergärung von Gülle anschaffen.^{liii}

7.3. Forschungsförderung für ökologische Agrar- und Ernährungssysteme

Der Klimaschutzplan 2050, der von zivilgesellschaftlichen Gruppen in Deutschland formuliert wurde, empfiehlt, den ökologischen Landbau als Leitbild eines zukunftsfähigen Landwirtschaftssystems konsequent auszubauen und seinen Anteil an der Fläche von derzeit rund 6,5 Prozent bis 2020 auf 10 Prozent, bis 2025 auf 15 Prozent und bis 2030 auf 20 Prozent zu erweitern.^{liv} Bis 2050 wird diese Strategie in eine flächendeckende Ökologisierung münden müssen.^{lv}

Um dies in der Kürze der noch zur Verfügung stehenden Zeit zu ermöglichen, fehlt es jedoch bisher an ausreichenden Forschungsmitteln und Programmen. Wenn die Bundesregierung ihr eigenes Klimaziel ernst nimmt, muss sie hier neue Prioritäten setzen. Das Klimaprogramm der Zivilgesellschaft fordert ein Aufstocken der Mittel für die Forschung zum Ökologischen Landbau von gegenwärtig 10 auf 60 Millionen Euro.^{lvi} Gemessen an der Herausforderung wird sie deutlich höher ausfallen müssen.

Anmerkungen

- i Wissenschaftlicher Beirat 2016
- ii UBA 2013a
- iii Alexandratos 2012
- iv Sylvia 1999
- v Kjærsgaard 2003
- vi Erisman 2008; Sutton 2013
- vii Dawso 2011
- viii http://www.iva.de/sites/default/files/praes_hermann_kuhlmann.pdf
(abgerufen am 31.5.2016)
- ix Myhre 2013
- x ebendort
- xi Ravishankara 2009
- xii Park 2012
- xiii Clais 2013
- xiv <https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/landwirtschaft/beitrag-der-landwirtschaft-zu-den-treibhausgas> (abgerufen am 2.6.2016)
- xv Wissemeier 2015
- xvi Sutton 2013
- xvii Zhang 2013
- xviii https://www.organic-center.org/wp-content/uploads/2015/11/Confluences_Program.pdf
- xix De Klein 2006
- xx Brentrup 2014
- xxi Shcherbak 2014
- xxii SRU 2015
- xxiii Alexandratos 2012; Sutton 2013
- xxiv Erb 2016
- xxv <http://www.un.org/en/events/desertificationday/background.shtml>
- xxvi Alexandratos 2012
- xxvii Alexandratos 2012
- xxviii Brentrup 2014

-
- xxix IFA, 2009; Zahlen von 2007
- xxx Sachverständigenrat 2016
- xxxi ebendort
- xxxii FAO 2006
- xxxiii Schmeer 2011
- xxxiv UBA 2011
- xxxv Zarco-Tejada 2014
- xxxvi Mueller 2014
- xxxvii <http://www.bodenfruchtbarkeit.org/331.html> (abgerufen am 1.6.2016)
- xxxviii ebendort
- xxxix Reckling 2016
- xl Reckling 2016
- xli Skinner 2014
- xlii Washington State University 2016
- xliii <http://www.fao.org/organicag/oa-specialfeatures/oa-climatechange/en/>
- xliv Wissenschaftlicher Beirat 2016
- xlv ebenda
- xlvi BMU 2016
- xlvii UBA 2013a
- xlviii SRU 2015
- xlix Fowler 2013
- I SRU 2015
- li BMU 2016
- lii Wiegmann 2016
- liii Wiegmann 2016
- liv Germanwatch: <https://germanwatch.org/de/download/14935.pdf>
- lv Dazu plant das IWE ein eigenes Dossier.
- lvi <https://germanwatch.org/de/download/14935.pdf>

Abkürzungsverzeichnis

CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlendioxid
EU	Europäische Union
FAO	Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen
FiBL	Forschungsinstitut für biologischen Landbau Deutschland e.V.
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change – Weltklimarat
IFA	International Fertilizer Industry Association
IVA	Industrieverband Agrar e. V.
IWE	Institut für Welternährung – World Food Institute e.V.
NH ₃	Ammoniak
NH ₄ ⁺	Ammonium
NO ₃ ⁻	Nitrat
N ₂	elementarer Stickstoff, Luftstickstoff
N ₂ O	Lachgas
SRU	Sachverständigenrat für Umweltfragen
UBA	Umweltbundesamt
UNEP	Umweltprogramm der Vereinten Nationen
UNO	Vereinte Nationen
ZALF	Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung e.V.

Quellen und Literatur

- Akiyama H, Yan X, Yagi K (2010): Evaluation of effectiveness of enhanced-efficiency fertilizers as mitigation options for N₂O and NO emissions from agricultural soils: meta-analysis. *Glob Change Biol*, 16: 1837–1840.
- Alexandratos, N, Bruinsma J (2012): World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. ESA Working paper No. 12-03. Rom, FAO.
- Baral BR, Kuyper TW, Van Groeningen JW (2014): Liebig's law of the minimum applied to a greenhouse gas: alleviation of P-limitation reduces soil N₂O emission. *Plant and Soil* 374 (1–2): 539–548.
- BMUB: <http://www.bmub.bund.de/themen/klima-energie/klimaschutz/nationale-klimapolitik/klimaschutzplan-2050>
- BMUB 2016: Nationales Klimaschutzprogramm: http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Aktionsprogramm_Klimaschutz/aktionsprogramm_klimaschutz_2020_broschuere_bf.pdf
- Bouwman AF, Lee DS, Asman WAH, Dentener FJ, Van Der Hoek KW, Olivier JGJ (1997): A global high-resolution emission inventory for ammonia. *Global Biogeochemical Cycles* 11(4): 561–587.
- Bouwman AF, Boumans LJM, Batjes NH (2002): Emissions of N₂O and NO from fertilized fields: Summary of available measurement data. *Global Biogeochemical Cycles* 16(4): 1058
- Modeling global annual N₂O and NO emissions from fertilized fields. *Global Biogeochem. Cycles* 16(4), 1080. Available from: https://www.researchgate.net/publication/229078023_Modeling_global_annual_N2O_and_NO_emissions_from_fertilized_fields_Global_Biogeochem_Cycles164_1080 [accessed Jun 3, 2016].
- Bouwman AF, Beusen AHW, Griffioen J, Van Groeningen JW, Hefting MM, Oenema O, Van Puijenbroek PJTM, Seitzinger S, Slomp CP, Stehfest E (2013): Global trends and uncertainties in terrestrial denitrification and N₂O emissions, *Philos. T. Roy. Soc. B* 368: 1621.
- Brentrup F, Pallière C (2014): Energy efficiency and greenhouse gas emissions in European nitrogen fertilizer production and use. *Fertilizers Europe*, Brüssel. 24 S. (ursprünglich: International Fertilizer Society Proceedings 639, 2008).
- Bryngelsson D, Wirsenius S, Hedenus F, Sonesson U (2016): How can the EU climate targets be met? A combined analysis of technological and demand-side changes in food and agriculture. *Food Policy* 59: 152-164.
- Butterbach-Bahl K, Dannenmann M (2011): Denitrification and associated soil N₂O emissions due to agricultural activities in a changing climate, *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 3: 389–395.
- Butterbach-Bahl K, Baggs EM, Dannenmann M, Kiese R, Zechmeister-Boltenstern S (2013): Nitrous oxide emissions from soils: how well do we understand the processes and their controls? *Phil. Trans. R. Soc. B* 368: 20130122.

- Ciais P et al. (2013): Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Davidson EA (2009): The contribution of manure and fertilizer nitrogen to atmospheric nitrous oxide since 1860. *Nature Geoscience* 2(9): 659–662.
- Davies KF, Gephart JA, Emery KY, Leach AM, Galloway JN, D'Odorico P (2016): Meeting future food demand with current agricultural resources. *Global Environmental Change* 39: 125–132.
- Dawso, C.J., Hilott J., Fertiliser availability in a resource limited world, *Food Policy* 2011
- De Klein C, et al.; Intergovernmental Panel on Climate Change (2006): IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Agriculture, Forestry and Other Land Use, Hrsg.: Eggleston HS, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K (Institute for Global Environmental Strategies, Kanagawa, Japan), Vol 4, S. 11.11–11.54.
- Destatis (2011): Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft in landwirtschaftlichen Betrieben – Erhebung zur Wirtschaftsdüngerausbringung – Fachserie 3 Reihe 2.2.2 – 2010.
- Erb, KH, Lauk C, Kastner T, Mayer A, Theurl MC, Haberl H (2016): Exploring the biophysical option space for feeding the world without deforestation. *Nature Communications* 7, 11382.
- Erisman JW, Sutton MA, Galloway J, Klimont Z, Winiwarter W (2008): How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geoscience* 1: 636–639.
- FAO (2006): Lifestock's long shadow - environmental issues and options. Rom. 390 S.
- FAO (2015): World fertilizer trends and outlook to 2018. Rom. 66 S.
- Fowler D, Coyle M, Skiba U, Sutton MA, Cape JN, Reis S, Sheppard LJ, Jenkins A, Grizzetti B, Galloway JN, Vitousek P, Leach A, Bouwman AF, Butterbach-Bahl K, Dentener F, Stevenson D, Amann M, Voss M (2013): The global nitrogen cycle in the twenty-first century, *Philos. T. Roy. Soc. B* 368: 1621.
- Gustavsson J, Cederberg C, Sonesson U, van Otterdijk R, Meybeck A (2011): Global Food Losses and Food Waste: Extent Causes and Prevention. Rome, Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations.
- Harty MA, Forrestal PJ, Watson CJ, McGeough KL, Carolan R, Elliot C, Krol D, Laughlin RJ, Richards KG, Lanigan GJ. (2016): Reducing nitrous oxide emissions by changing N fertiliser use from calcium ammonium nitrate (CAN) to urea based formulations. *Sci Total Environ.* 563-564: 576–586.
- Hasler K, Bröring S, Omta O, Olf HW (2015): Life cycle assessment (LCA) of different fertilizer product types. *European Journal of Agronomy* 69: 41–51.
- Haubold-Rosar M et al. (2016): Chancen und Risiken des Einsatzes von Biokohle und anderer „veränderter“ Biomasse als Bodenhilfsstoffe oder für die C-Sequestrierung in Böden. Umweltbundesamt, Berlin, 254 S.
- IFA (2009): Fertilizers, Climate Change and Enhancing Agricultural Productivity Sustainably. International Fertilizer Industry Association white paper. Paris. 30 S.
- IFA (2015): Fertilizer Outlook 2015-2019. International Fertilizer Industry Association, Paris. 8 S.
- IPCC (2014): Climate Change 2014 - Synthesis Report - Summary for Policymakers. 32 S.
- Janssens IA, Luysaert S (2009): Nitrogen's carbon bonus. *Nature Geoscience* 2 (5): 318–319.

-
- Janzen HH (2006): The soil carbon dilemma: Shall we hoard it or use it? *Soil Biology & Biochemistry* 38 (3): 419–424.
- Jung S, Wiese J, Foth H, Niekisch M (2016): Shaping Change. Food Consumption Patterns and Reactive Nitrogen as a Policy Field in a Finite World. *GAIA* 25/1: 14–18.
- Khan SA, Mulvaney RL, Ellsworth TR, Boast CW (2007): The myth of nitrogen fertilization for soil carbon sequestration. *J. Environ. Qual.* 36: 1821–1832.
- Kjærsgaard T (2003): A Plant that Changed the World: The rise and fall of clover 1000–2000, *Landscape Research*, 28/1: 41–49.
- Lelieveld J, Evans JS, Fnais M, Giannadaki D, Pozzer A (2015): The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature* 525: 367–371.
- Mueller ND, West PC, Gerber JS, MacDonald GK, Polasky S, Foley JA (2014): A tradeoff frontier for global nitrogen use and cereal production. *Environ. Res. Lett.* 9 054002: 1-8.
- Ober, Steffi (2004): *Agrarforschung in Deutschland*, 55
- Oita A, Malik A, Kanemoto K, Geschke A, Nishijima S, Lenzen M (2016): Substantial nitrogen pollution embedded in international trade. *Nature Geoscience* 9: 111–115.
- Park S, Croteau P, Boering KA, Etheridge DM, Ferretti D, Fraser PJ, Kim K-R, Krummel PB, Langenfelds RL, van Ommen TD, Steele LP, Trudinger CM (2012): Trends and seasonal cycles in the isotopic composition of nitrous oxide since 1940. *Nature Geoscience* 5: 261–265.
- Paustian K, Lehmann J, Ogle S, Reay D, Robertson GP, Smith P (2016): Climate-smart soils, *Nature* 532, 49–57.
- Powlson DS, Stirling CM, Jat ML, Gerard BG, Palm CA, Sanchez PA, Cassman KG (2014): Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation. *Nature Climate Change* 4: 678–683.
- Meyer-Aurich A, Olesen JE, Prochnow A, Brunsch R (2013): Greenhouse gas mitigation with scarce land: The potential contribution of increased nitrogen input. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global* 18(7): 921–932.
- Millar N, Doll JE, Robertson, GP (2014): Management of nitrogen fertilizer reduce nitrous oxide (N₂O) emissions from field crops, *Climate Change and Agriculture Fact Sheet Series—MSU Extension Bulletin E3152*, 5 S.
- Millar N, Robertson GP, Gehl RJ, Hoben JP (2010): Nitrogen fertilizer management for nitrous oxide (N₂O) mitigation in intensive corn (Maize) production: an emissions reduction protocol for US Midwest agriculture. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 15 (2): 185-204.
- Mulvaney RL, Khan SA, Ellsworth TR (2009): Synthetic nitrogen fertilizers deplete soil nitrogen: A global dilemma for sustainable cereal production. *J. Environ. Qual.* 38: 2295–2314.
- Myhre G et al. (2013): Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Niggli U, Fliessbach A, Hepperly P, Scialabba N (2009). Low greenhouse gas agriculture: Mitigation and adaptation potential of sustainable farming systems. *Ökologie & Landbau* 141: 32–33.
- Ravishankara AR, Daniel JS, Portmann RW (2009): Nitrous oxide (N₂O): The dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century. *Science* 326(5949): 123–125.

-
- Reckling M, Bergkvist G, Watson CA, Stoddard FL, Zander PM, Walker RL, Pristeri A, Toncea I, Bachinger J (2016): Trade-Offs between Economic and Environmental Impacts of Introducing Legumes into Cropping Systems. *Front. Plant Sci.* 7 (669).
- Rochette P, Janzen HH (2005): Towards a Revised Coefficient for Estimating N₂O Emissions from Legumes. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 732 (2–3): 171–179.
- Rosenstock TS, Tully KL, Arias-Navarro C, Neufeldt H, Butterbach-Bahl K, Verchot LV (2014): Agroforestry with N₂-fixing trees: Sustainable development's friend or foe? *Current Opinion in Environmental Sustainability* 6 (1): 15–21.
- Sachverständigenrat für Agrarpolitik, Ernährung und Forst, Klimagutachten 2016, Berlin (dpa) 02.09.2016
- Schlesinger WH (2013): An estimate of the global sink for nitrous oxide in soils. *Global Change Biology* 19: 2929–2931.
- Schmeer M, Loges R, Dittert K, Taube F (2011): Klimagasemission im Futterbau: Vergleich von leguminosenbasierten und intensiv stickstoffgedüngten Grünlandbeständen. in: Leithold, G. et al. (Hrsg.): *Es geht ums Ganze: Forschen im Dialog von Wissenschaft und Praxis – Beiträge zur 11. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau*, Justus-Liebig-Universität Gießen, Band 1, S. 135–138.
- Shcherbak I, Millar N, Robertson GP (2014): Global meta-analysis of the nonlinear response of soil nitrous oxide (N₂O) emissions to fertilizer nitrogen, *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 111: 9199–204.
- Skinner C, Gattinger A, Müller A, Mäder P, Fliessbach A, et al. (2014) Greenhouse gas fluxes from agricultural soils under organic and non-organic management – a global meta-analysis. *Science of the Total Environment* 468–469: 553–563.
- Smil V (1999): Nitrogen in crop production: an account of global flows. *Global Biogeochemical Cycles* 13(2): 647–662.
- Snyder CS, Davidson EA, Smith P, Venterea RT (2014): Agriculture: sustainable crop and animal production to help mitigate nitrous oxide emissions. *Curr. Opin. Environ. Sustainability* 9–10: 46–54.
- Springmann M, Godfray HCJ, Rayner M, Scarborough P (2016): Analysis and valuation of the health and climate change cobenefits of dietary change. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 113 (5): 4146–4151.
- SRU – Sachverständigenrat für Umweltfragen (2015): Sondergutachten „Stickstoff: Lösungsstrategien für ein drängendes Umweltproblem“, 560 S.
- Stehfest E, Bouwman L (2006): N₂O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions. *Nut Cyc in Agroeco* 74(3):207–228.
- Sutton MA, et al. (2013): *Our Nutrient World: the Challenge to Produce More Food and Energy With Less Pollution*. Centre for Ecology & Hydrology on behalf of the Global Partnership on Nutrient Management (GPNM) and the International Nitrogen Initiative (INI). 128 S.
- Sutton MA, Oenema O, Erisman JW, Leip A, van Grinsven H, Winiwarter W (2011): Too much of a good thing. *Nature* 472 (7342): 159–61.
- Sylvia DM, Fuhrmann JJ, Hartel PG, Zuberer DA (1999): *Principles and Applications of Soil Microbiology*. Prentice Hall, Upper Saddle River. 550 S.

-
- Thomson AJ, Giannopoulos G, Pretty J, Baggs EM, Richardson DJ (2012): Biological sources and sinks of nitrous oxide and strategies to mitigate emissions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 367(1593): 1157–1168.
- Tuladhar JK (2003): The Effect of Azolla on Nitrogen Use Efficiency in Rice-Wheat Rotations of Nepal. *Ecology and Development Series* 13. 121 S.
- Turner PA, Griffis TJ, Lee X, Baker JM, Venterea RT, Wood JD (2015): Indirect nitrous oxide emissions from streams within the US Corn Belt scale with stream order. *Proc Natl Acad Sci USA* 112(32): 9839–43.
- UBA (2011): Stickstoff – Zuviel des Guten? Überlastung des Stickstoffkreislaufs zum Nutzen von Umwelt und Mensch wirksam reduzieren. Umweltbundesamt, Berlin. 42 S.
- UBA (2013a): Klimaschutz und Emissionshandel in der Landwirtschaft. Umweltbundesamt. *Climate Change* 01/2013. 45 S.
- UBA (2013b): Globale Landflächen und Biomasse nachhaltig und ressourcenschonend nutzen - Kurzfassung. Umweltbundesamt, 110 S.
- UBA (2013c): Landwirtschaftliche Emissionen. Teilbericht zum F&E-Vorhaben „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung – PAREST“. Umweltbundesamt *Texte* 39/2013, 107 S.
- UBA (2015): *Schwerpunkte 2015. Jahrespublikation des Umweltbundesamtes.* 96 S.
- UBA (2016): Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung – Diskussionsbeitrag des Umweltbundesamtes. 67 S.
- UNEP (2013): *The Emissions Gap Report 2013. United Nations Environment Programme.* 64 S.
- von Buttler C, Freitag T, Rebbe F, Zorn S (2014): Minderung von Treibhausgasemissionen der Landwirtschaft. *Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Schriftenreihe* 31, 47 S.
- Wiegmann K, Scheffler M, Henneberg K (2016): Sektorale Emissionspfade in Deutschland bis 2050 - Landwirtschaft und Forstwirtschaft/Landnutzung. Arbeitspaket 1.2 im Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Wissenschaftliche Unterstützung „Erstellung und Begleitung des Klimaschutzplans 2050“.
- Wissemeier AH (2015): Können neue, innovative Düngemitteltypen das moderne Stickstoffproblem lösen? S. 205-216 in: Ertl N, Soentgen J (Hrsg.): *N. Stickstoff – ein Element schreibt Weltgeschichte*, Oekom Verlag, 272 S.
- Wissenschaftlicher Beirat des Landwirtschaftsministers (2016), Klimaschutz in der Land- und Forstwirtschaft sowie den nachgelagerten Bereichen Ernährung und Holzverwendung, Gutachten, S. 7
- Zaehle S (2013): Terrestrial nitrogen–carbon cycle interactions at the global scale. *Phil. Trans. R. Soc. B* 368, 20130125.
- Zaehle S, Ciais P, Friend AD, Priour V (2011): Carbon benefits of anthropogenic reactive nitrogen offset by nitrous oxide emissions. *Nature Geoscience* 4(9): 601–605.
- Zhang W, Dou Z, He P, Ju X-T, Powlson D, Chadwick D, Zhang, F-S (2013): New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China. *Proc Natl Acad Sci USA* 110 (21), 8375–8380.
- Zarco-Tejada PJ, Hubbard N, Loudjani P (2014): Precision Agriculture: An opportunity for EU farmers – potential support with the CAP 2014–2020. Joint Research Centre (JRC) of the European

Commission. requested by the European Parliament's Committee on Agriculture and Rural Development. 56 S.