



FCI  
FONDS DER  
CHEMISCHEN  
INDUSTRIE

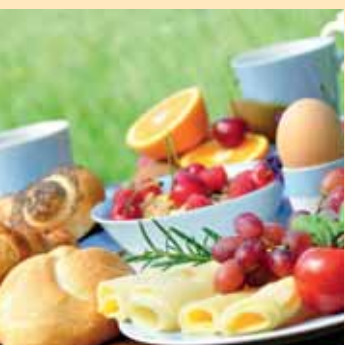
Industrieverband

**Agrar**



Themengebiet: Schule, Ausbildung, Bildung

## Informationsserie Pflanzenernährung Ernährung - Wachstum - Ernte

A large graphic of a CD-ROM is centered on the page. The CD's surface is a photograph of a young green seedling with two leaves growing in dark soil. A hand is visible at the top, appearing to be planting the seedling. The CD has a white center hole and a white outer ring. On the left side of the CD, there is a vertical orange segment containing the text "© 2013 Fonds der Chemischen Industrie". On the right side of the CD, there are two logos: the "Industrieverband Agrar" logo, which includes a stylized 'X' symbol, and the "FCI FONDS DER CHEMISCHEN INDUSTRIE" logo, which features a circular emblem with a complex geometric pattern.

© 2013 Fonds der Chemischen Industrie

Industrieverband  
**Agrar**

FCI  
FONDS DER  
CHEMISCHEN  
INDUSTRIE

Informationsserie Pflanzenernährung  
Ernährung - Wachstum - Ernte

Diese Informationsserie ist in Zusammenarbeit mit dem Industrieverband Agrar e. V. (IVA) entstanden und steht auch unter [www.vci.de/fonds](http://www.vci.de/fonds) zum Download bereit.

Die CD-ROM enthält Vorschläge für Experimente und Arbeitsblätter. Zudem sind die Abbildungen des Textheftes als Powerpoint-Dateien hinterlegt.



Die Arbeitsblätter und  
Versuchsbeschreibungen  
finden Sie auf der  
beiliegenden CD

Arbeitsblatt	Thema	Niveau	Bezug
1	Bedarfsgerechte Pflanzenernährung	Mittelstufe	Kapitel 3
2	Nährstoffe – wichtig für Pflanzengesundheit, Ertrag und Qualität	Mittelstufe/ Oberstufe	Kapitel 3.1
3	Was Pflanzen zum Leben brauchen	Mittelstufe/ Oberstufe	Kapitel 3.1
4	Der Trick mit der Oberfläche – ein Gedankenexperiment	Mittelstufe/ Oberstufe	Kapitel 3.3
5	Düngen ja oder nein – ein Rollenspiel	Mittelstufe/ Oberstufe	Kapitel 7
6	Entwicklung der Ressourcen zur Nahrungsmittelproduktion	Mittelstufe/ Oberstufe	Kapitel 7.2
7	Bevölkerungswachstum und Ernährungsproblem	Mittelstufe/ Oberstufe	Kapitel 8

Experiment	Thema	Niveau	Bezug
1	Bedingungen des Pflanzenwachstums	Mittelstufe	Kapitel 2.1
2	Mineralisation des Bodens	Mittelstufe	Kapitel 3
3	Nachweis von $\text{Fe}^{2+}$ - und $\text{Fe}^{3+}$ -Ionen im Boden und in der Pflanze	Mittelstufe/ Oberstufe	Kapitel 3.1
4	Pflanzennährstoffe	Mittelstufe/ Oberstufe	Kapitel 3.1
5	Säure-Base-Verhalten von $\text{NH}_3$	Mittelstufe/ Oberstufe	Kapitel 3.4
6	Phosphat-Bestimmung durch Titration	Oberstufe	Kapitel 3.4
7 (1-3)	Bestimmung des Stickstoffgehalts von Erde	Oberstufe	Kapitel 4.1
8	Veraschung und Nachweis von Mineralstoffen	Mittelstufe/ Oberstufe	Kapitel 4.1
9	Untersuchung von Düngemitteln auf Nitrate	Oberstufe	Kapitel 5
10	Untersuchung von Düngemitteln auf Phosphate	Oberstufe	Kapitel 5
11	Modellexperiment zur Ammoniaksynthese	Oberstufe	Kapitel 5.1
12	Herstellung von Salpetersäure durch katalytische Verbrennung von Ammoniak an Platinwolle	Oberstufe	Kapitel 5.1
13	Enzymatischer Nachweis von Harnstoff im Kalkstickstoffhydrolysat	Oberstufe	Kapitel 5.1
14	Untersuchung von Düngemitteln auf Sulfate	Mittelstufe/ Oberstufe	Kapitel 5.4
15	pH-Wert von Bodenproben	Mittelstufe/ Oberstufe	Kapitel 5.5
16	Bau einer Biogasanlage	Mittelstufe/ Oberstufe	Kapitel 6
17	Untersuchung des Nitratgehalts von Gemüse und Obst	Mittelstufe/ Oberstufe	Kapitel 6.1

## Inhalt

› 6	Methodisch-didaktischer Kommentar
› 8	1 Einleitung
› 10	2 Grundlagen des Pflanzenwachstums
› 10	2.1 Wachstumsfaktoren
› 12	2.2 Der Boden: „Die dünne Haut der Erde“
› 17	3 Pflanzen brauchen Nährstoffe
› 17	3.1 Makro- und Mikronährstoffe
› 18	3.2 Wie nehmen Pflanzen Nährstoffe auf?
› 20	3.3 Pflanzenverfügbarkeit von Nährstoffen
› 22	3.4 Die natürliche Nährstoffdynamik im Boden am Beispiel von Stickstoff, Phosphor und Kalium
› 28	4 Bedarfsgerecht düngen
› 29	4.1 Wie viel ist „bedarfsgerecht“?
› 31	4.2 Düngung nach Bodenanalyse
› 32	4.3 Präzise Düngung durch Hightech
› 34	5 Mineraldünger und deren Produktion
› 35	5.1 Stickstoffdünger
› 40	5.2 Phosphatdünger
› 41	5.3 Kalium- und Magnesiumdünger
› 44	5.4 Schwefel-, Calcium- und Mikronährstoffdünger
› 44	5.5 Die Kalkdüngung: ein spezieller Fall
› 46	6 Organische Dünger
› 48	6.1 Düngung und Ernährung
› 50	7 Auswirkungen auf die Umwelt
› 50	7.1 Nährstoffverluste
› 54	7.2 Mineraldüngung und Ressourcenverbrauch: Rohstoffe, Fläche, Energie
› 60	7.3 Mineraldüngung, Treibhausgase, Klimawandel
› 62	8 Düngung und Welternährung
› 66	Literatur
› 68	Glossar
› 69	Impressum

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wurde im gesamten Heft die männliche Sprachform gewählt. Im Glossar können die im Text mit \* hervorgehobenen Stichwörter nachgeschlagen werden.

Das Thema Pflanzenernährung bietet eine ganze Reihe von Anknüpfungspunkten an die Erfahrungswelt der Schülerinnen und Schüler und bei einer Behandlung im Chemieunterricht zudem eine große Zahl an konzeptionellen Zugängen und Verbindungen. Es eignet sich für den fächerübergreifenden wie für den fächerverbindenden Unterricht. In Biologie können die Vorgänge, die innerhalb der Pflanzen ablaufen und die Bedeutung der Nährstoffe für ihren Stoffwechsel ebenso behandelt werden wie die mikrobiellen Auf-, Ab- und Umbaureaktionen, die mit Pflanzennährstoffen im Boden stattfinden.

Das Thema weist darüber hinaus Verknüpfungen zu den Gesellschaftswissenschaften und der Geografie auf, so zum Beispiel im Kontext der Verfügbarkeit und der Art von Ackerböden, der Bedeutung des Klimas für das Pflanzenwachstum oder der Ernährung einer wachsenden Weltbevölkerung.

Im Kontext der Pflanzenernährung kann eine Reihe zentraler Konzepte der Chemie angesprochen werden, die von den grundlegenden Struktur-Eigenschafts-Beziehungen und der Löslichkeit der Düngemittel über

die Behandlung von Redoxreaktionen bei der Betrachtung ihrer Herstellung bis hin zur differenzierten Analyse chemischer Gleichgewichtsprozesse und ihrer Beeinflussung im Zusammenhang mit der Haber-Bosch-Synthese reichen. Zudem können Aspekte der nasschemischen und der instrumentellen Analytik im Umfeld der Überlegungen zum bedarfsgerechten Düngen angesprochen werden.

Ist es nicht möglich, das Thema als Ganzes zu behandeln, so kann auf einem Einstiegsniveau zum Beispiel zunächst ausschließlich der Frage nachgegangen werden, welche Löslichkeitseigenschaften potenziell als Dünger einsetzbare Substanzen aufweisen müssen und welche Folgen das für deren chemische Eigenschaften mit sich bringt. In diesem Zusammenhang können chemische Bindungen, insbesondere die kovalente und die Ionenbindung, erarbeitet, vor allem aber verglichen werden. Im Kontext von Überlegungen zum Periodensystem der Elemente kann bereits auf wichtige als Düngemittel genutzte Verbindungen der 15. Gruppe eingegangen werden, die zudem eine gute Übungsmöglichkeit für die Erstellung von Lewis-Formeln bieten. Im Laufe des weiterführenden Unterrichts können die



Redoxprozesse, die bei der Herstellung von Düngemitteln eine Rolle spielen, ebenso als ein abgeschlossenes Teilthema in den Blick genommen werden, wie die Säure-Base-Eigenschaften des Ammoniaks oder der Säurehaushalt und die Pufferwirkung von Böden. Im Rahmen der Oberstufe kann der Haber-Bosch-Prozess als Teilthema aus dem Bereich der Pflanzenernährung aufgegriffen werden. Schließlich besteht in der Oberstufe noch die Möglichkeit, der in der Landwirtschaft zum bedarfsgerechten Düngen eingesetzten Analytik nachzugehen und ihre chemisch-physikalischen Grundlagen als ein Teilthema zu behandeln.

Mit der Behandlung des Themas Pflanzenernährung können alle Kompetenzbereiche der Bildungsstandards abgedeckt werden: So ist ein profundes chemisches Fachwissen nötig, und jeder Teilaspekt des Themas eröffnet die Möglichkeit, über den speziellen Kontext hinaus wichtige chemische Fakten und Prinzipien zu erarbeiten. Der Kompetenzbereich Erkenntnisgewinnung wird ebenfalls in jedem Teilaspekt des Themas bedeutsam, denn die auf der beiliegenden CD vorgeschlagenen Experimente stehen in einem logischen Gang konkreter wichtiger Fragen, die in der Realität

geklärt werden mussten oder immer wieder geklärt werden müssen, um eine optimale Pflanzenernährung zu gewährleisten. Viele von ihnen sind darüber hinaus geprägt von einer systematischen Veränderung von Variablen, womit sie einen wesentlichen Aspekt naturwissenschaftlicher Vorgehensweise repräsentieren. Damit werden die Stellung und die Bedeutung von Experimenten im Gang des naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinns an vielen Stellen des Themas deutlich. Die Frage nach der Nutzung von Mineraldüngern oder organischen Düngern oder die Kontroverse „Tank oder Teller“, also die Frage, ob und in welchem Umfang Nahrungspflanzen der Energiegewinnung dienen dürfen, erlaubt schließlich, Schüler zur eigenen Positionierung zu ermutigen und das Abwägen von Argumenten anderer ebenso zu üben wie die Verteidigung einer begründeten eigenen Meinung.

Alles in allem bietet das Thema Pflanzenernährung also eine Vielzahl von Anknüpfungspunkten für einen modernen, spannenden und inhaltlich anspruchsvollen Unterricht. Lassen Sie sich inspirieren!



## Mehr Nahrung, mehr nachwachsende Rohstoffe – in der Landwirtschaft ist Produktivität gefragt

„Food, feed, fibre, fuel“ – in der Landwirtschaft dreht sich alles um Nahrungsmittel, Tierfutter, Fasern und nachwachsende Rohstoffe zur Herstellung von Bioenergie. Die Nachfrage nach diesen Agrarprodukten steigt, denn eine wachsende Weltbevölkerung will ernährt werden, und erneuerbare Energiequellen sollen vermehrt die begrenzt vorkommenden fossilen Energieträger ersetzen.

Der global stark zunehmende Bedarf an Nahrungsmitteln und Bioenergie hat zu einem Paradigmenwechsel in der Landwirtschaft geführt. Prägte in den 80er und 90er Jahren des 20. Jahrhunderts eine Überproduktion an Getreide, Milch und anderen Agrarerzeugnissen das Bild der europäischen Landwirtschaft, kann heute bei vielen Agrarprodukten die Produktion mit der global steigenden Nachfrage kaum Schritt halten. Daher steht heute wieder eine hohe Produktivität im Vordergrund – gerade auch beim Anbau von landwirtschaftlichen Kulturpflanzen. Intensive Landwirtschaft kann allerdings auch negative Effekte auf die Umwelt haben. Stehen also eine hohe Produktivität und Nachhaltigkeit zwangsläufig im Widerspruch, und welche Rolle spielt dabei die Düngung?

Wie wir Menschen brauchen Pflanzen zum Leben neben Luft, Wärme, Licht und Wasser auch Nährstoffe. In der Human- und Tierernährung sind damit Kohlenhydrate, Eiweiße, Fette, Vitamine und Mineralstoffe gemeint. Im Unterschied dazu handelt es sich bei den Nährstoffen, die die Pflanze benötigt, ausschließlich um Mineralstoffe – etwa Stickstoff-, Phosphor- und Kaliumverbindungen. Nur wenn diese Pflanzennährstoffe alle ausreichend vorhanden sind, kann sich die Pflanze optimal entwickeln und hohe Erträge sowie gute Qualitätseigenschaften der Ernteprodukte hervorbringen. Doch wo kommen diese Nährstoffe her? Warum reichen die natürlicherweise im Boden vorkommenden Mineralstoffe nicht aus, um einen leistungsfähigen Pflanzenbau betreiben zu können?

Düngung ist die zentrale Stellgröße, um Erträge auf Äckern und Grünland zu steigern und langfristig zu sichern. Einer der bedeutendsten Meilensteine in der Entwicklung unserer Landwirtschaft ist daher die industrielle Produktion von Mineraldüngern. Vor allem die Erfindung des Haber-Bosch-Verfahrens 1913 und die darauf basierende Herstellung von mineralischen Stickstoffdüngern ermöglichten enorme Ertragssteigerungen. Diese wiederum waren und sind eine wichtige Voraussetzung für unsere gesellschaftliche Entwicklung und unseren heutigen Wohlstand.

### Herausforderungen der Zukunft: Welternährung und Klimawandel

Nach Schätzungen der Welternährungsorganisation FAO (2009) müssen, ausgehend vom Basisjahr 2009, bis Mitte des Jahrhunderts etwa 70 Prozent mehr Lebensmittel produziert werden, um rund neun Milliarden Menschen zu ernähren. Neue Flächen werden aber nur sehr eingeschränkt zur Verfügung stehen. Zum einen sind geeignete und bisher ungenutzte Flächen für die landwirtschaftliche Nutzung weltweit begrenzt. Zum anderen werden bei jeder Umwandlung von Grasland und Wäldern zu Ackerland immense Mengen an Kohlenstoffdioxid freigesetzt, das dort im Boden und in der Biomasse gespeichert ist. Eine umfangreiche Ausdehnung der Ackerflächen würde die Erderwärmung demnach weiter beschleunigen. Die Erträge auf den vorhandenen Flächen zu optimieren, ist deshalb ein notwendiges Ziel und eine große Herausforderung für die Landwirtschaft.



Pflanzen benötigen für ihr Wachstum Sonnenlicht, Wärme, Wasser, Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff und mineralische Nährstoffe. Beim Wachsen erzeugen sie mit Hilfe des Sonnenlichtes Biomasse, die uns als Nahrung, Rohstoff und zur Energiegewinnung dient.

Sobald einer dieser Wachstumsfaktoren in nicht ausreichendem Maße vorhanden ist, kommen Wachstum und Entwicklung der Pflanzen zum Stillstand. Fehlt das Licht, dann unterbleibt die Fotosynthese, auch wenn Wasser und Mineralstoffe verfügbar sind. Fehlt das Wasser, können die mineralischen Nährstoffe, die im Boden vorliegen, nicht in die Pflanzen transportiert werden, ist es zu kalt, stellt die Pflanze das Wachstum ein, und bei Nährstoffmangel im Boden fehlen die „Bau- und Betriebsstoffe“.

## 2.1 Wachstumsfaktoren

Jede Pflanzenart hat ihre eigenen Ansprüche an Lebensraum, Temperatur, Wasser und Nährstoffe. Je besser sie erfüllt werden, desto besser ist das Wachstum. Der Landwirt versucht daher, die Wachstumsbedingungen möglichst optimal zu gestalten. Er bearbeitet den Boden für eine gute Entwicklung von Keimling und Wurzeln, ernährt die Pflanzen bedarfsgerecht mit mineralischen und organischen Düngemitteln und schützt sie vor Unkräutern, Krankheiten und Schädlingen.

### Sonnenlicht als Energiequelle

Das Licht der Sonne liefert die notwendige Energie zum Aufbau pflanzlicher Substanz: Bei der Fotosynthese ( $\text{CO}_2$ -Assimilation) werden mit Hilfe von Chlorophyll (grüner Blattfarbstoff) aus Lichtenergie, Kohlendioxid und Wasser Kohlenhydrate gebildet. Sie dienen dem Aufbau der Pflanzenorgane (zum Beispiel Blätter, Stängel) und zur Bildung von Reservestoffen in Samen, Wurzeln, Knollen und anderen Pflanzenteilen. Je besser das Licht genutzt wird, desto mehr Biomasse kann gebildet werden.

### Kohlenstoffdioxid und Sauerstoff

Um organische Substanz im Zuge der Fotosynthese zu bilden, benötigt die Pflanze Kohlenstoff (C). Diesen gewinnt sie aus dem Kohlenstoffdioxid der Luft, das über die Blätter aufgenommen wird.

Der bei der Fotosynthese frei werdende Sauerstoff ist für die Atmung von Mensch, Tier und Pflanze unerlässlich. So werden zum Beispiel von einem Hektar Zuckerrübenpflanzen pro Jahr 13 Millionen Liter Sauerstoff freigesetzt.

### Netto-Reaktionsgleichung für die Fotosynthese



### Netto-Reaktionsgleichung der Atmung



**Temperatur**

Die Temperatur beeinflusst die Geschwindigkeit der Stoffwechselprozesse in den Pflanzen. Bei Unter- oder Überschreitung der optimalen Temperaturen sinkt die Stoffproduktion. Sie ist bei gemäßigten Tagestemperaturen und kühlen Nächten am höchsten, in unseren Breiten also vom Frühjahr bis zum Vorsommer und vom Spätsommer bis zum Herbst.

**Wasser**

Ohne Wasser findet keine Fotosynthese und damit auch kein Stoffaufbau statt (vgl. Netto-Reaktionsgleichung). Darüber hinaus ist Wasser aber auch als Lösungs- und Transportmittel für Pflanzennährstoffe und für die von den Pflanzen gebildeten Stoffwechselprodukte unverzichtbar. Deshalb spielen der Wasserhaushalt und das Wasserhaltevermögen des Bodens eine wichtige Rolle für das Wachstum der Pflanzen.

**Mineralische Pflanzennährstoffe**

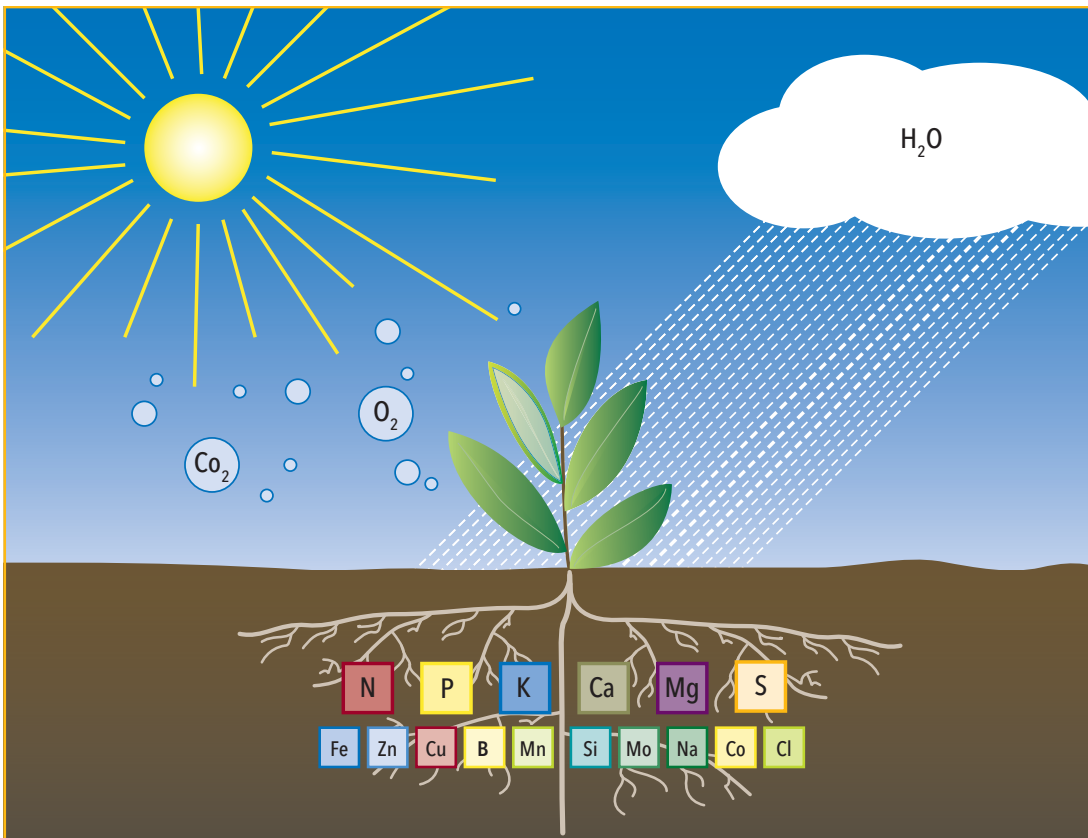
Bestimmte Mineralstoffe (s. Kap.3.1.), die sogenannten Pflanzennährstoffe, sind als Bestandteile von Pflanzenzellen und aufgrund ihrer Funktionen im Stoffwechsel für das Wachstum und die Entwicklung der Pflanzen unentbehrlich. Sie können nur aufgenommen werden, wenn sie als Ionen im Bodenwasser gelöst sind. Erst wenn die Pflanzen ausreichend mit allen mineralischen Nährstoffen versorgt sind, können sie Licht und Wasser optimal für ihr Wachstum nutzen.

LEHRER-INFO

Bedingungen des Pflanzenwachstums  
*Experiment 1*

ABBILDUNG 1

Wachstumsfaktoren



## 2.2 Der Boden: „Die dünne Haut der Erde“

Wenn wir von Boden sprechen, meinen wir damit die wenige Zentimeter bis einige Meter dicke oberste Schicht der Erdkruste. Wie die Schale einen Apfel, so umhüllt der Boden die Erde. Fruchtbare Böden bilden die Lebensgrundlage für Pflanzen und damit auch für Tiere und Menschen.

### HINWEIS

Einige der wichtigsten Funktionen der Böden: Sie

- enthalten und speichern Pflanzennährstoffe
- liefern den Großteil unserer Nahrungsmittel
- schützen und filtern unser Trinkwasser
- beeinflussen Atmosphäre und Klima, da sie umweltrelevante Gase (wie Methan, Kohlenstoffdioxid), Wasserdampf und Staub binden, zum Teil aber auch abgeben

Knapp 4000 Jahre sind unter unseren Klimabedingungen für die Bildung einer Schicht von 20 Zentimetern landwirtschaftlich nutzbarem Boden notwendig. Bezogen auf die Dauer eines menschlichen Lebens ist der Boden also eine nicht erneuerbare Ressource.

### HINWEIS

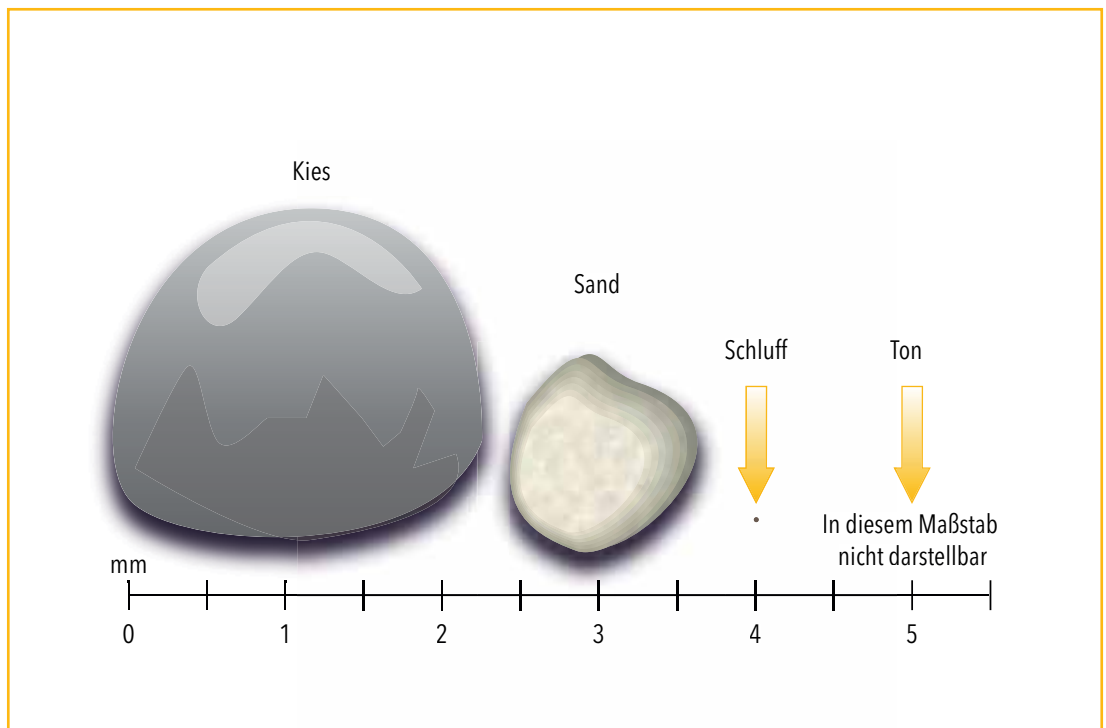
Der Boden ist der einzige Bereich, in dem Atmosphäre, Lithosphäre\*, Hydrosphäre\* und Biosphäre\* gleichzeitig vorhanden sind und sich gegenseitig durchdringen und beeinflussen.

### „Mutter Erde“ oder „der letzte Dreck“?

Böden sind komplizierte, zusammengesetzte Systeme aus mineralischen und organischen Bestandteilen mit Pflanzenwurzeln, Bodenorganismen und Hohlräumen, in denen sich Luft und Wasser befinden. Die unterschiedliche Kombination der Bodenbestandteile bestimmt maßgeblich die Eigenschaften eines Bodens.

### ABBILDUNG 2

#### Korngrößen



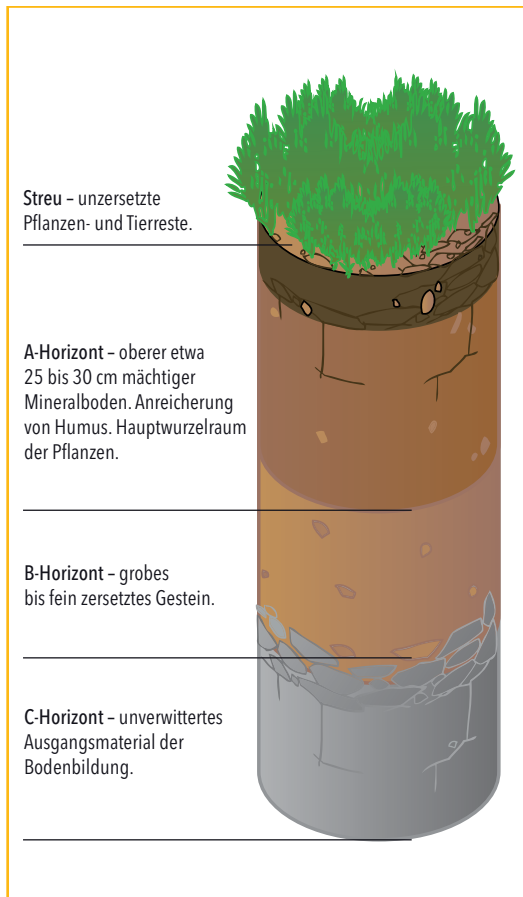
Der Charakter eines Bodens hängt in hohem Maße von der Korngrößenzusammensetzung der mineralischen Bodensubstanz ab. Je nach Durchmesser unterscheidet man den Grobboden (Blöcke, Steine und Kies) vom Feinboden, der aus den Fraktionen Sand (0,063–2 mm), Schluff (0,002 – 0,063 mm) und Ton (< 0,002 mm) besteht.

Die organischen und mineralischen Bodenteilchen können im Boden einzeln oder zusammengelagert – als sogenannte Aggregate – vorliegen. Sie sind in bestimmter Weise räumlich angeordnet und bilden miteinander ein Bodengefüge mit einem Hohlraumsystem. Dieses besteht aus Poren unterschiedlicher Größe und Form, die mit Wasser und Luft gefüllt sind. Das Bodengefüge ist ein wichtiger Einflussfaktor für die Fruchtbarkeit eines Bodens.

Gräbt man ein tiefes Loch, so kann man schon mit bloßem Auge verschiedene Bodenschichten voneinander unterscheiden. Farbe und Struktur des Bodens ändern sich mit zunehmender Tiefe. Beispielsweise sind die oberen 15 bis 30 Zentimeter eines Bodens durch die höheren Humusanteile dunkler gefärbt. Die Schichten eines Bodens werden auch als Bodenhorizonte bezeichnet.

ABBILDUNG 3

Bodenhorizonte



HINWEIS

**Boden ist nicht gleich Boden**

Abhängig von Ausgangsmaterial, Relief, Klima, Tieren und Pflanzen in und auf dem Boden sowie der Entstehungsgeschichte gibt es ganz unterschiedliche Bodentypen, zum Beispiel Schwarzerden, Braunerden, Podsole, Rendzinen. Sie unterscheiden sich in der Abfolge verschiedener Schichten (Horizonte), deren Mächtigkeit, Zusammensetzung und Struktur ebenso wie in den Gehalten und der Verteilung der mineralischen und organischen Bodensubstanz.

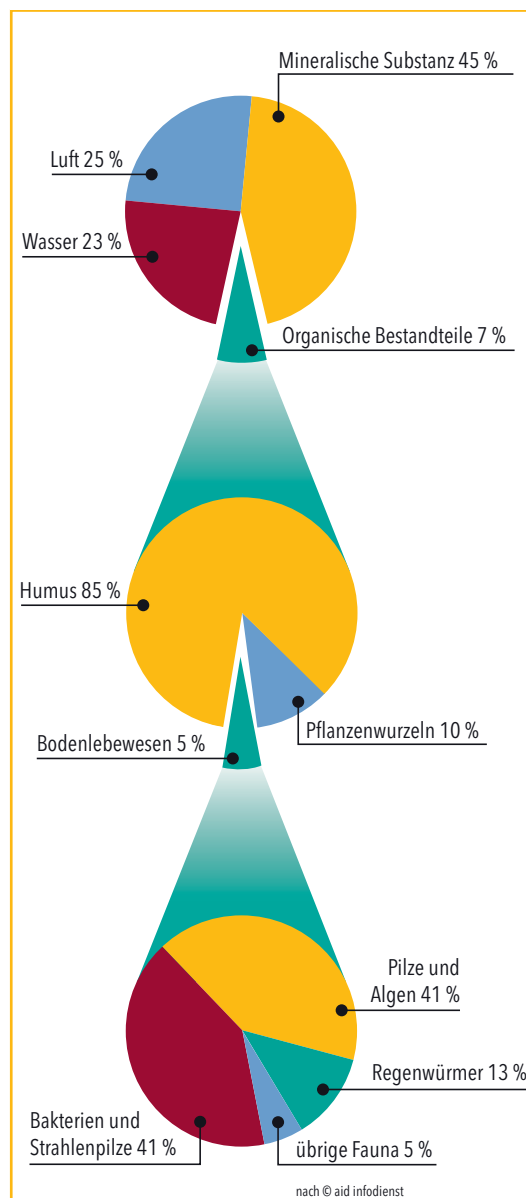


Rendzina



Schwarzerde

Bodenbestandteile



Dicht besiedelt: die Bodenorganismen

Die Bodenorganismen spielen bei Abbau- und Umbauprozessen von organischer Substanz im Boden eine wesentliche Rolle. Die biologische Aktivität von Böden ist ein wichtiges Kriterium für die Bodenfruchtbarkeit. Auch das Gefüge des Bodens wird maßgeblich vom Bodenleben beeinflusst.

Bakterien, Pilze, Algen, Wurzelfüßer, Wimperntiere, Geißeltiere, Regenwürmer, Asseln, Spinnentiere, Tausendfüßler, Milben, Insekten, Schnecken und Wirbeltiere (zum Beispiel Maulwürfe, Mäuse). Im Boden wimmelt es nur so von Leben.

HINWEIS

Es leben wesentlich mehr Organismen in als auf dem Boden! Hochgerechnet auf einen Hektar, entspricht ihr Gewicht ca. 15 Tonnen, so viel wie 20 Kühe. (Glante F. o. J.)

Fällt ein abgestorbenes Blatt zu Boden, wird es von Bodenorganismen zerkleinert. Das entstandene Substrat bietet Bakterien und Pilzen neue Besiedlungsmöglichkeiten. Bis ein Blatt vollständig in Humus umgewandelt worden ist, wird es mehrfach gefressen. Das Ergebnis ist die Bildung von Humus in den oberen Bodenschichten. Der Prozess, bei dem hochpolymere dunkelgefärbte Huminstoffe entstehen, wird als Humifizierung bezeichnet.



### Bodenfruchtbarkeit

Auf einem fruchtbaren Boden können höhere Pflanzenerträge erzielt werden als auf einem weniger fruchtbaren Boden. Aber was bedeutet Bodenfruchtbarkeit eigentlich? Ein fruchtbarer Boden muss genügend Wasser und Nährstoffe zur Verfügung stellen. Gleichzeitig muss er gut durchlüftet und von den Pflanzen durchwurzelbar sein, damit Nährstoffe und Wasser gut erschlossen werden können.

Die Fruchtbarkeit des Bodens wird also von einer Reihe von Bodeneigenschaften bestimmt. Sie basiert neben einem guten Humus- und Nährstoffzustand auch auf der Tiefgründigkeit der durchwurzelbaren Schicht, der Zusammensetzung der mineralischen Bodensubstanz, dem Bodengefüge und der biologischen Aktivität.

Ohne den Ersatz des Humus und der mineralischen Nährstoffe, die dem Acker durch die Ernte entzogen werden, geht die Bodenfruchtbarkeit auf Dauer verloren.



Von Licht und Wasser allein kann keine Pflanze leben. Für den Stoffwechsel und die Biomasseproduktion benötigt die Pflanze 14 mineralische Nährstoffe, die sie aus dem Boden aufnimmt und für den Aufbau von Wurzeln, Stängeln, Blättern, Blüten und Früchten nutzt.

## LEHRER-INFO

Mineralisation des Bodens  
*Experiment 2*

Historisch ist das Wissen um die Notwendigkeit der Mineralstoffe für das Pflanzenwachstum vergleichsweise neu und mit den Namen Carl Sprengel (1787–1859) und Justus von Liebig (1803–1873) verbunden. Ackerbauliche Maßnahmen wie Bracheperioden, Anbau von Leguminosen (Hülsenfrüchte) oder die Düngung mit Mist, alles Maßnahmen, um dem Boden Nährstoffe zuzuführen, waren dagegen schon im Altertum bekannt. Auch der Nutzen der Brandrodung, bei der Mineralstoffe dem Boden über die Asche zugeführt werden, war schon zu römischer Zeit bekannt.

Im Zuge der Entwicklung der sogenannten Agrikulturchemie, die insbesondere der Chemiker Justus von Liebig vorantrieb, wurden zunächst Stickstoff, Phosphor, Kalium, Magnesium, Calcium und Schwefel als Nährstoffe identifiziert. Bereits der Mangel an nur einem dieser Nährstoffe führt zur Beeinträchtigung des Pflanzenwachstums.

## Gesetz vom Minimum

Justus von Liebig erkannte, dass Pflanzen aus dem Boden beträchtliche Mengen an mineralischen Nährstoffen aufnehmen, die mit dem Erntegut dem Acker entzogen werden. Er formulierte das „Gesetz des Minimums“ (1855), das besagt, dass Wachstum und Ertrag der Pflanzen von demjenigen Nährstoff begrenzt werden, der gemessen am Bedarf der Pflanzen in der geringsten Menge vorliegt.

## ABBILDUNG 5

Gesetz vom Minimum von Justus von Liebig



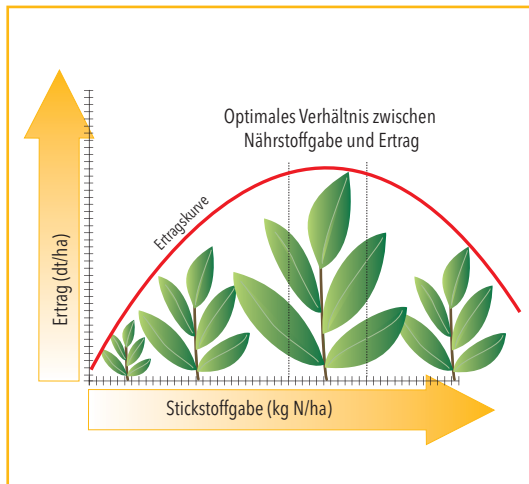


### Gesetz vom abnehmenden Ertragszuwachs

Der Agrarforscher Alfred Mitscherlich (1874–1956) entwickelte die Überlegungen von Liebig weiter und formulierte das „Gesetz vom abnehmenden Ertragszuwachs“.

#### ABBILDUNG 6

#### Gesetz vom abnehmenden Ertragszuwachs



#### LEHRER-INFO

Bedarfsgerechte Pflanzenernährung  
Arbeitsblatt 1

An jedem Standort kann – entsprechend den dortigen Klima- und Bodenverhältnissen – bei optimaler Nährstoffversorgung ein bestimmter Höchstertag erzielt werden. Je geringer die Verfügbarkeit eines Nährstoffs

ist, umso deutlicher wird der Ertrag schon durch geringe Erhöhung dieses einen Nährstoffs gesteigert (vgl. Abb. 6). Je mehr sich jedoch die Versorgung dem optimalen Zustand nähert, desto geringer fällt der Ertragszuwachs aus. Ist das Ertragsmaximum erreicht, führt eine zusätzliche Düngung nicht mehr zu weiter steigenden Erträgen.

### 3.1 Makro- und Mikronährstoffe

Die Pflanzennährstoffe werden von Pflanzen in unterschiedlichen Mengen benötigt. Dem unterschiedlichen Bedarf trägt die Unterteilung in Makronährstoffe (Hauptnährstoffe) und Mikronährstoffe (Spurennährstoffe) Rechnung. Zu den Makronährstoffen gehören Stickstoff, Kalium, Phosphor, Magnesium, Schwefel und Calcium. Von diesen benötigen die landwirtschaftlichen Kulturpflanzen im Laufe ihrer Entwicklung je nach Nährstoff pro Hektar etwa 20–350 Kilogramm. Von den Mikronährstoffen sind es lediglich etwa 5–1 000 Gramm pro Hektar. Zu dieser Nährstoffgruppe zählen Bor, Chlor, Kupfer, Eisen, Mangan, Molybdän, Nickel und Zink. Sie übernehmen vielfältige Funktionen in Pflanzen, so zum Beispiel als Bestandteile von Enzymen, bei Stoffwechselreaktionen und im Hormonhaushalt.

#### LEHRER-INFO

Nachweis von  $\text{Fe}^{2+}$ - und  $\text{Fe}^{3+}$ -Ionen im Boden und in der Pflanze  
Experiment 3

📌 TABELLE 1

Nährstoff	Mittlere Gehalte in Pflanzen (g/kg Trockenmasse)	Aufnahme als Ion	Als Baustoff	Als Betriebsstoff
Stickstoff (N)	15	$\text{NO}_3^-$ , $\text{NH}_4^+$	Nukleinsäuren (DNA, RNA), Chlorophyll, Aminosäuren, Proteine, B-Gruppen-Vitamine	Enzymreaktionen, Signalübertragungen in der Zelle (Signalstoff NO)
Phosphor (P)	2	$\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , $\text{HPO}_4^{2-}$	Zellmembran, Nukleinsäuren (DNA, RNA)	Energietransfer ATP (Adenosintriphosphat)
Kalium (K)	10	$\text{K}^+$	Aufrechterhaltung der Zellurgescenz*	Osmotikum, Regulation der Spaltöffnungen, Aktivierung von Enzymen, Erzeugung von Wurzelndruck
Calcium (Ca)	5	$\text{Ca}^{2+}$	Zellwand, Zellmembran	Membrandurchlässigkeit, Zellstreckung, Signalübertragungen in der Zelle („sekundärer Messenger“)
Magnesium (Mg)	2	$\text{Mg}^{2+}$	Chlorophyll	Aktivierung von ATP zur biochemischen Energieübertragung, Enzymreaktionen
Schwefel (S)	1	$\text{SO}_4^{2-}$	Lipide, Senföle, Lauchöle, S-haltige Aminosäuren	Antioxidanssystem, Osmotikum



📌 LEHRER-INFO

Nährstoffe – wichtig für Pflanzengesundheit, Ertrag und Qualität  
*Arbeitsblatt 2*

Was Pflanzen zum Leben brauchen  
*Arbeitsblatt 3*

Pflanzennährstoffe  
*Experiment 4*

### 3.2 Wie nehmen Pflanzen Nährstoffe auf?

Pflanzen nehmen Nährstoffe zum größten Teil über die Wurzeln aus der Bodenlösung auf, und zwar ausschließlich in mineralischer Form. Die Nährstoffe liegen dabei als Ionen in Lösung vor (s. Tab. 1). Um an die Nährstoffe zu gelangen, wächst die Wurzel im Boden zu den Nährstoffen hin. In Wurzelnahe bewegen sich die Nährstoffe in Richtung Wurzel. Zwei Prozesse spielen dabei eine Rolle:

a) Massenfluss: Durch die Wasseraufnahme der Wurzeln und der Wasserleitung in der Pflanze entsteht im Boden eine „Strömung“ hin zu den Wurzeln, mit der wieder neue Ionen zu den Pflanzen transportiert werden.

b) Diffusion: Durch den Entzug von Nährstoffionen aus der Bodenlösung entsteht ein Konzentrationsgefälle an

der Wurzeloberfläche. Weitere Ionen diffundieren in Richtung der niedrigeren Konzentration, also in Richtung der Wurzeln.

An der Wurzel angekommen, dringen die Nährstoffe entweder aktiv in das Plasma der Wurzelzellen ein oder bewegen sich zunächst passiv innerhalb der Zellwände, um später aktiv über Transportmechanismen der Pflanzenzellen in das Zellplasma aufgenommen zu werden. Über die Wurzelzellen gelangen die Nährstoffe in die Leitgefäße (Xylem) und werden auf diesem Weg zum Spross weitergeleitet.

Darüber hinaus können in Wasser gelöste mineralische Nährstoffe auch über das Blatt aufgenommen werden. Diesen Aufnahmepfad macht man sich bei der Blattdüngung zunutze.

**HINWEIS**

**Bodenapplikation, Blattdüngung und Fertigation**

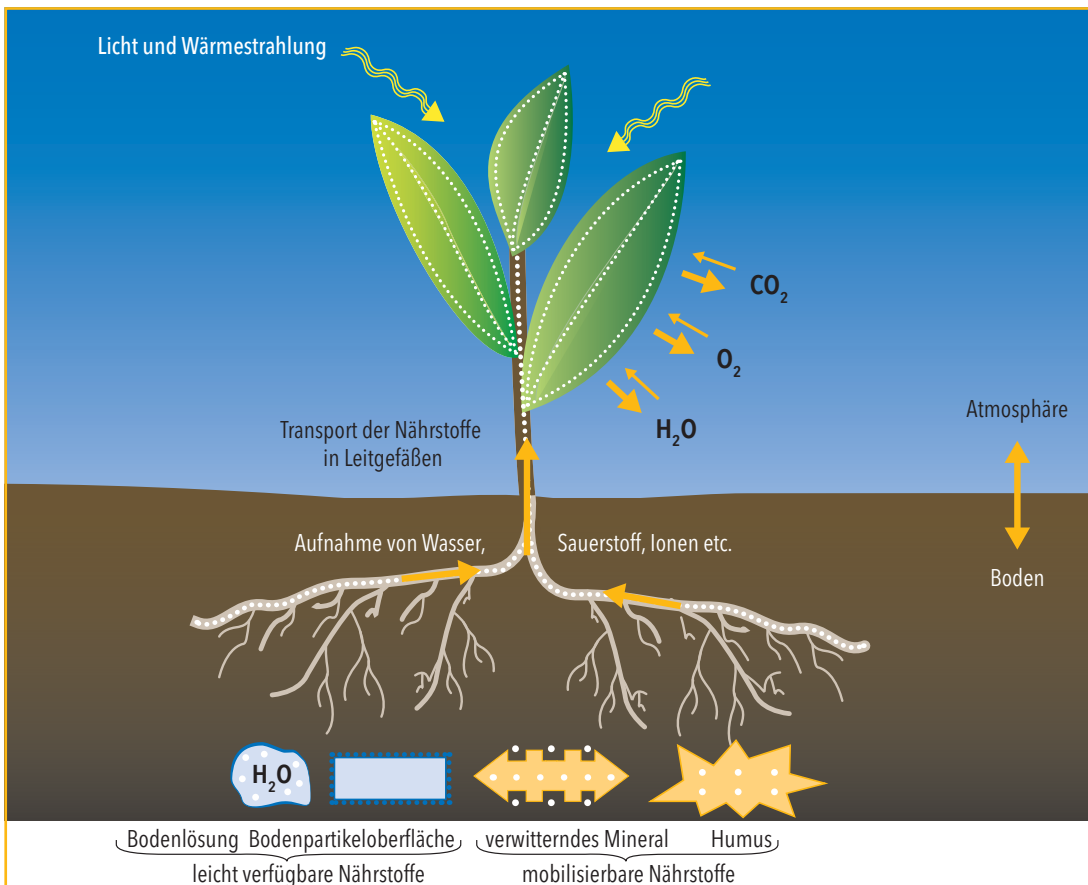
In der Landwirtschaft werden die Nährstoffe in der Regel über feste oder flüssige Düngemittel auf den Boden aufgebracht. Es gibt aber auch spezielle Formen der Mineraldüngung.

Bei der **Blattdüngung** werden Nährstoffe in flüssiger Form mit einer Feldspritze auf die oberirdischen Pflanzenteile aufgesprüht. Die Pflanze nimmt dann die Nährstoffe überwiegend über die Blätter auf. Diese Form der Düngung ist bei Mikronährstoffen verbreitet, kommt zum Beispiel im Obstbau zur Anwendung. Sie spielt aber auch bei der Düngung mit Makronährstoffen eine Rolle.

Als **Fertigation** wird die Zufuhr von Nährstoffen zusammen mit dem Bewässerungswasser verstanden.

**ABBILDUNG 7**

Nährstoffaufnahme durch die Pflanze



### 3.3 Pflanzenverfügbarkeit von Nährstoffen

Nährstoffe sind nur dann pflanzenverfügbar, wenn sie als Ionen im Bodenwasser gelöst sind oder leicht aus der festen Bodensubstanz in die Bodenlösung abgegeben werden können. Der Boden selbst verfügt über Nährstoffreserven, von denen allerdings nur ein kleiner Teil schnell in die Bodenlösung nachgeliefert werden kann und damit den Pflanzen unmittelbar zur Verfügung steht.

So liegen Nährstoffe im Boden vor:

Wasserlösliche Nährstoffe in der Bodenlösung	
<b>Austauschbare Nährstoffe:</b> Sie sind an Oberflächen der organischen und anorganischen Bodensubstanzen locker gebunden. Diese adsorbierten Nährstoffe können meist leicht in die Bodenlösung abgegeben werden. Sie sind damit direkt pflanzenverfügbar.	< 2 Prozent
<b>Reservenährstoffe:</b> Die Nährstoffe sind mittel bis schwer löslich und stehen den Pflanzen daher nicht direkt zur Verfügung. Sie liegen in organischen oder anorganischen Verbindungen vor. Im ersten Fall erfolgt die Freisetzung durch Mineralisierung*, im zweiten Fall durch Verwitterung.	> 98 Prozent

(Fink 2007)

Für die Speicherung von austauschbaren Nährstoffen spielen die Art und die Größe der Bodenteilchen eine wichtige Rolle. Während die groben Bodenbestandteile chemisch wenig aktiv sind, können vor allem die Teile der Tonfraktion Nährstoffe adsorbieren und leicht wieder in die Bodenlösung abgeben. Eine besondere Rolle hierbei spielen Tonminerale. Diese feinen Bodenteilchen besitzen eine große Oberfläche und können deshalb gut Ionen adsorbieren.

Auch Humusteilchen besitzen eine große Oberfläche und sowohl hydrophile als auch hydrophobe Bereiche und können daher geladene wie auch ungeladene Teilchen adsorbieren sowie Wasser und Nährstoffe binden.

#### LEHRER-INFO

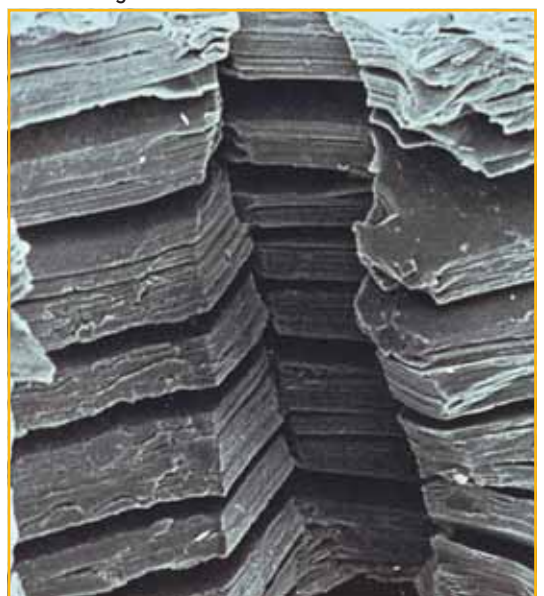
Der Trick mit der Oberfläche – ein Gedankenexperiment.  
*Arbeitsblatt 4*

#### HINWEIS

Nicht der Gesamtgehalt an Nährstoffen im Boden, sondern nur ein sehr kleiner Teil davon ist pflanzenverfügbar. Der Gehalt an Tonmineralen und Humus bestimmt die Menge an Nährstoffen, die ein Boden speichern kann.

#### ABBILDUNG 8

Tonminerale sind wichtige Bestandteile vieler Böden. Sie haben einen meist plättchenförmigen, schichtartigen Aufbau.



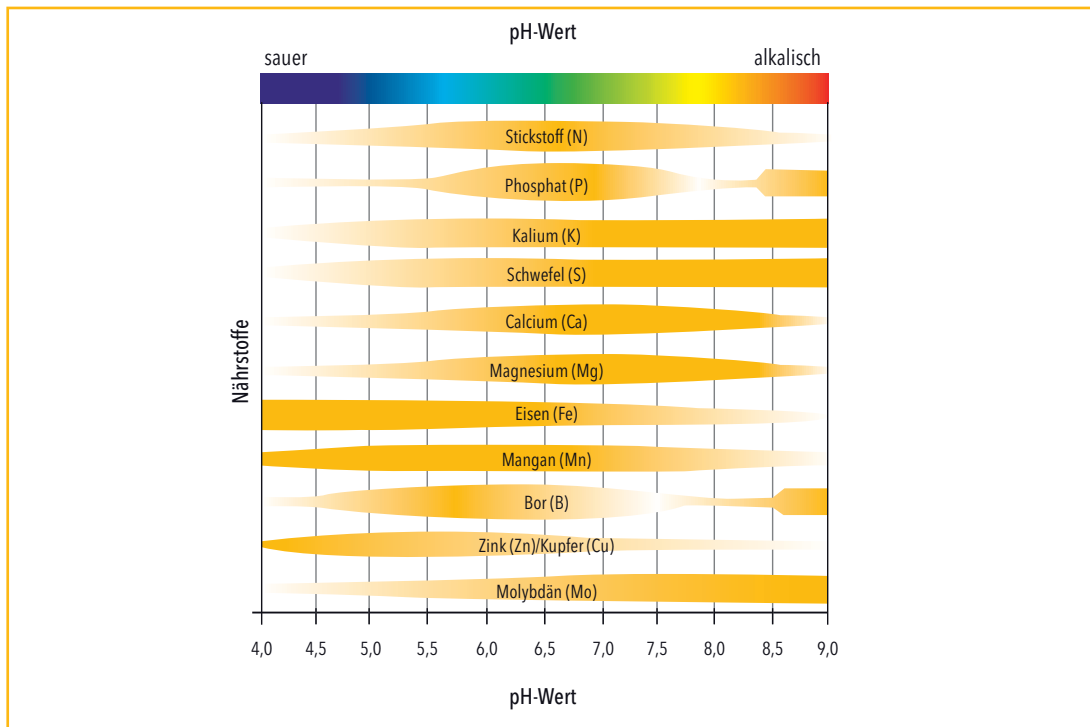
**Der pH-Wert des Bodens – wichtig für die Nährstoffverfügbarkeit**

Die Löslichkeit und damit Pflanzenverfügbarkeit vieler Nährstoffe hängt in hohem Maße vom pH-Wert des Bodens ab. Er ist ein Maß für die Wasserstoffionenkonzentration (H<sup>+</sup>) im Boden und beschreibt folglich dessen Säuregrad. Die meisten Kulturböden zeigen einen pH-Wert zwischen pH 5 und pH 8. Durch Kalkung kann der pH-Wert gezielt erhöht werden (s. Kap. 5.5). Neben der Pflanzenverfügbarkeit von Nährstoffen

wird vom pH-Wert auch eine Reihe anderer Bodeneigenschaften beeinflusst. So begünstigt ein niedriger pH-Wert (< pH 4,5) zwar die Verfügbarkeit der meisten Mikronährstoffe, andererseits wirkt sich die Bodenversauerung negativ auf die Bodenstruktur und das Bodenleben aus. Zudem kann es in einem sehr sauren Bodenmilieu zur Freisetzung hoher Konzentrationen an Aluminium-Ionen (Al<sup>3+</sup>) und damit zu Wurzelschädigungen kommen (Aluminiumtoxizität).

ABBILDUNG 9

Schematische Beziehung zwischen dem pH-Wert des Bodens und der Verfügbarkeit von Nährstoffen



HINWEIS

Ob ein Nährstoff im Boden in ausreichender Menge pflanzenverfügbar ist, hängt nicht nur von den chemischen und physikalischen Eigenschaften des Nährstoffs ab. Großen Einfluss haben die Bodenfaktoren wie pH-Wert, Bodenart, Humusgehalt, Bodenfeuchte,

Bodenstruktur und die biologische Aktivität des Bodens. Außerdem ist das Aneignungsvermögen der Pflanze entscheidend für die Nährstoffverfügbarkeit. Dafür maßgeblich ist die aktive Wurzeloberfläche, die die Pflanze ausbilden kann.

### 3.4 Die natürliche Nährstoffdynamik im Boden am Beispiel von Stickstoff, Phosphor und Kalium

Jeder Boden enthält von Natur aus – in unterschiedlichen Mengen – Pflanzennährstoffe. Sie werden aus Gesteinen durch Verwitterung freigesetzt oder gelangen aus der Atmosphäre, zum Beispiel durch Niederschläge, in den Boden.

Da Böden unmittelbar mit der Atmosphäre, der Lithosphäre\* und der Hydrosphäre\* in Verbindung stehen, stellen sie ein offenes System dar und stehen mit den benachbarten Systemen in ständigem Austausch. Anders als bei vielen industriellen Fertigungsprozessen, die in geschlossenen Produktionsanlagen ablaufen,

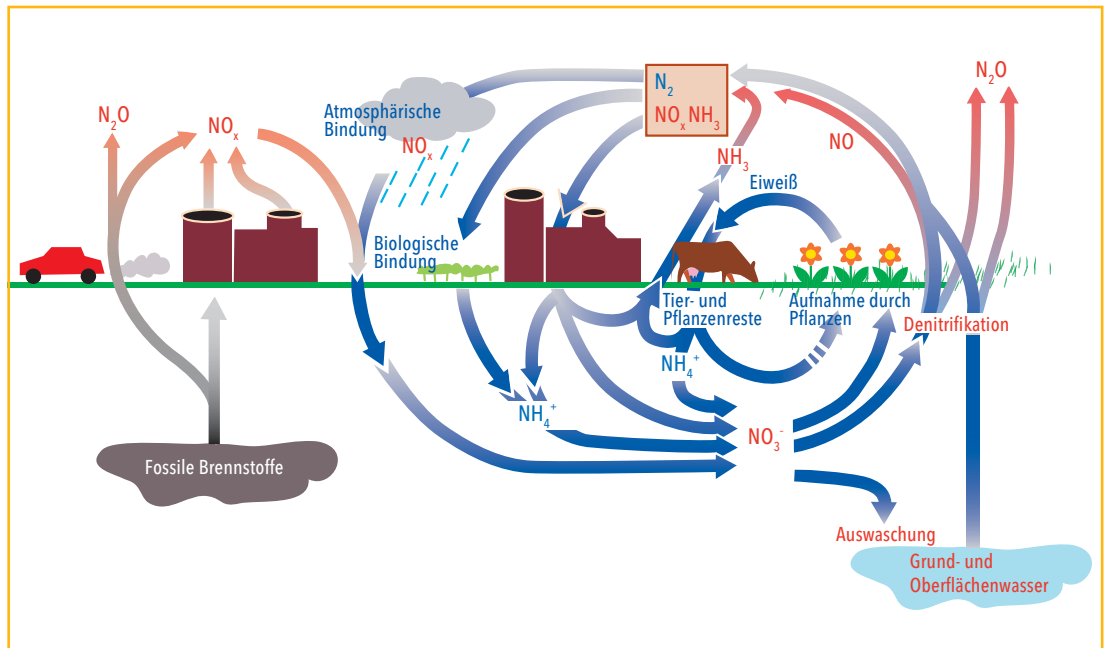
sind deshalb gasförmige und flüssige Nährstoffe- und -austräge in und aus dem Boden natürlich und unvermeidbar. Das zeigt sich unter anderem bei Lachgasemissionen ( $N_2O$ ) und der Nitrat- auswaschung, die auch auf nicht bewirtschafteten Flächen auftreten.

#### Stickstoffkreislauf

In der Natur liegt Stickstoff (N) in unterschiedlichen chemischen Formen vor; seine stetige Umsetzung in der Atmosphäre, in Gewässern, in Böden und in Biomasse wird als Stickstoffkreislauf bezeichnet. Die Pflanzen benötigen Stickstoff in verhältnismäßig großen Mengen für den Aufbau verschiedener wichtiger Verbindungen, die das Wachstum und damit Ertrag und Qualität der Kulturpflanzen beeinflussen.

ABBILDUNG 10

Der Stickstoffkreislauf



Obwohl die Luft zu 78 Prozent aus molekularem Stickstoff ( $N_2$ ) besteht, können Pflanzen das Element nicht direkt aus der Luft aufnehmen. Nur bestimmte Mikroorganismen, die frei im Boden oder symbiontisch in Pflanzenwurzeln leben, können den Luftstickstoff für den Aufbau von körpereigenem Eiweiß nutzen und stickstoffhaltige Verbindungen so im Boden anreichern.

Leguminosen wie Klee und Luzerne leben in Symbiose mit den sogenannten Knöllchenbakterien (Rhizobien), die mit Hilfe des Enzyms Nitrogenase Luftstickstoff ( $N_2$ ) binden können. Die Bakterien dringen in die Wurzeln der Pflanzen ein und rufen dort die Ausbildung von Knöllchen hervor. In diesen Wurzelknöllchen wird von den Mikrosymbionten molekularer Luftstickstoff zu Ammonium-Ionen reduziert und somit in eine für die Wirtspflanze verfügbare chemische Form umgewandelt. Dieser Vorgang wird auch als Stickstofffixierung

bezeichnet. Als Gegenleistung für die von ihnen gelieferten Stickstoffverbindungen erhalten die Mikrosymbionten von der Wirtspflanze Photosynthese-Produkte, meist in Form von Kohlenhydraten. Unter optimalen Bedingungen bindet ein Kleebestand pro Hektar mehr als 200 Kilogramm Stickstoff pro Jahr.

Symbiosen mit stickstoffbindenden Bakterien kennt man nicht nur bei Leguminosen, sondern auch bei Erle, Lederblümchen und anderen Pflanzenarten.

Neben dieser biologischen Stickstofffixierung kann der molekulare Luftstickstoff spontan durch Blitzschlag, bei Vulkanausbrüchen oder durch photochemische Reaktionen in Stickoxide umgewandelt werden, die, im Regenwasser gelöst, in den Mineralstickstoff-Pool des Bodens übergehen können.

Bei atmosphärischen Entladungen wird Stickstoff zu Stickoxiden oxidiert



Stickstoffbindende Bakterien dringen in die Wurzel ein und rufen dort die Ausbildung von Knöllchen hervor



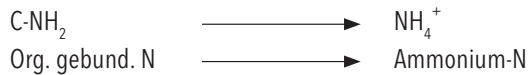
Typische Ackerböden in Mitteleuropa enthalten je nach Bodenart und Bewirtschaftung in der Krume bis 30 Zentimeter Tiefe zwischen 2 000 und 8 000 Kilogramm Stickstoff pro Hektar (Knittel & Albert 2003). Etwa 90 bis 95 Prozent dieses Bodenstickstoffs ist in der organischen Bodensubstanz (Humus) gebunden (Scheffer/Schachtschabel 1998). Damit der organisch gebundene Stickstoff von Pflanzen aufgenommen werden kann, muss er zuvor von Mikroorganismen in die anorganischen Ammonium- ( $NH_4^+$ ) und Nitrat-Ionen ( $NO_3^-$ ) umgewandelt werden. Die Nitrat-Ionen sind im

Bodenwasser gelöst und damit für Pflanzen besonders leicht verfügbar; die Stickstoffernährung der Pflanze erfolgt deshalb zum überwiegenden Teil durch Nitrat-Ionen. Demgegenüber werden Ammonium-Ionen an Bodenpartikel adsorbiert, aber durch Austauschvorgänge auch wieder pflanzenverfügbar.

Die verschiedenen Stickstoffverbindungen unterliegen im Boden vielfältigen Umsetzungsvorgängen und Verlustpfaden. Diese werden nachstehend näher beschrieben.

### Mineralisation

Bei der Mineralisation wird organisch gebundener Stickstoff durch Mikroorganismen umgewandelt. Als Endprodukt entstehen Ammonium-Ionen ( $\text{NH}_4^+$ )



Je nach Standortbedingungen können jährlich zwischen einem und drei Prozent des im Boden vorhandenen organischen Stickstoffs mineralisiert und damit für die Pflanzen verfügbar werden. Auf Ackerböden werden so in der Vegetationsperiode\* je nach Witterung und Standort 50 bis 170 Kilogramm Stickstoff pro Hektar freigesetzt. Dieser mineralisierte Stickstoff steht den Pflanzen jedoch nur teilweise zur Verfügung, da ein Teil durch Immobilisierung gleich wieder festgelegt wird oder durch unvermeidbare Verluste verloren geht.

### Nitrifikation

Ammonium-Ionen können von den Pflanzen aufgenommen und verwertet werden, besitzen aber im Vergleich zu Nitrat-Ionen eine geringere Mobilität im Boden und haben deshalb eine untergeordnete Bedeutung bei der Stickstoffversorgung der Pflanzen. Der größte Teil der Ammonium-Ionen wird in einem zweistufigen Prozess durch Nitrosomonas- und Nitrobacter-Bakterien über Nitrit- zu Nitrat-Ionen oxidiert.

Von **Ammonium** ( $\text{NH}_4^+$ ) zu **Nitrit** ( $\text{NO}_2^-$ ):



Von **Nitrit** ( $\text{NO}_2^-$ ) zu **Nitrat** ( $\text{NO}_3^-$ ):



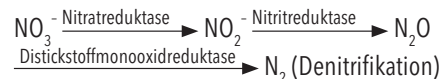
Umgekehrt kann Nitratstickstoff – vor allem in tieferen Schichten und unter Luftabschluss – auch wieder zu Ammoniumstickstoff umgewandelt werden (Nitratammonifikation).

### Immobilisierung

Im Boden lebende Mikroorganismen nehmen Ammonium- und Nitrat-Ionen aus der Bodenlösung auf und fixieren den Stickstoff in ihrem Körpereiweiß und beim Aufbau organischer Verbindungen wieder. Dieser sogenannte immobilisierte Stickstoff steht den Pflanzen nicht für die Aufnahme zur Verfügung, sondern muss später erst wieder mineralisiert werden.

### Gasförmige Stickstoffverluste

Die Denitrifikation findet vor allem in leicht saurem und sauerstoffarmem Milieu im Boden statt, zum Beispiel bei Überflutung oder Staunässe. Unter diesen Bedingungen reduzieren Bakterien (Denitrifikanten) Nitrat-Ionen, um ihre Sauerstoffversorgung zu sichern. Es entstehen dabei Stickoxide oder molekularer Stickstoff. Die gasförmigen Stoffe können in die Atmosphäre entweichen und damit zu Stickstoffverlusten führen. Besonders problematisch ist Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ), das nicht nur bei der Denitrifikation, sondern auch bei der Nitrifikation entstehen kann. Es gehört zu den klimarelevanten Spurengasen und trägt folglich zum Treibhauseffekt bei.



Stickstoff kann bei Zufuhr von tierischen Exkrementen wie Gülle und Stallmist, Gärsubstraten aus der Biogasproduktion und einigen mineralischen Düngern, insbesondere Harnstoff (s. Kap. 5.1), auch in Form von Ammoniak gasförmig entweichen. Böden mit sehr hohem pH-Wert verstärken die Verluste ( $> \text{pH } 7,5$ ).



Bei steigendem pH-Wert nimmt die  $\text{OH}^-$ -Konzentration der Bodenlösung zu. Das chemische Gleichgewicht wird dann nach rechts, also in Richtung Ammoniak, verschoben.

#### LEHRER-INFO

Säure-Base-Verhalten von  $\text{NH}_3$   
Experiment 5

### Auswaschung

Nitrat besitzt als Anion, das nur leicht lösliche Salze bildet, eine hohe Mobilität im Boden. Vor allem während der Vegetationsruhe im Winterhalbjahr – insbesondere nach starken Niederschlägen – besteht daher das Risiko einer Verlagerung in tiefere Bodenschichten. Selbst bei bester Düngetechnik sind Auswaschungsmengen in der Größenordnung von 15 bis 50 Kilogramm Nitrat pro Hektar und Jahr zumeist unvermeidbar.

### Phosphordynamik im Boden

Phosphor liegt im Boden in verschiedenen Phosphatverbindungen vor. Es stammt vor allem aus der Gesteinsverwitterung, der mineralischen Phosphatdüngung und der Zufuhr organischer Substanzen. Das anorganisch gebundene Phosphat nimmt – je nach Gehalt an organischer Substanz – einen Anteil von 35 bis 75 Prozent ein.

#### LEHRER-INFO

Phosphat-Bestimmung durch Titration  
*Experiment 6*

Vereinfacht ausgedrückt lässt sich das im Boden vorhandene Phosphat je nach Bindungsform und Löslichkeit in drei Arten unterteilen:

1. Im Bodenwasser gelöstes, unmittelbar pflanzenverfügbares Phosphat
2. Labiles, nach Lösung pflanzenverfügbares Phosphat
3. Stabiles, schwer oder meist nicht pflanzenverfügbares Phosphat

Pflanzen nehmen nur in der Bodenlösung gelöste Phosphate (Salze und Ester der Phosphorsäure) auf. Dabei handelt es sich vorwiegend um freie Anionen, insbesondere  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  und  $\text{HPO}_4^{2-}$ . Die Bodenlösung enthält aber nur äußerst geringe Mengen an gelöstem Phosphat (0,5 bis 1 Kilogramm P je Hektar). Für das Pflanzenwachstum kommt es daher darauf an, dass möglichst schnell Phosphate aus dem Boden per Diffusion in die Bodenlösung nachgeliefert werden. Die labilen Phosphate bilden während der Vegetationsperiode die Hauptquelle für diese Nachlieferung. Das labile Phosphat ist als

Anion an bestimmte Bodenteilchen (Tonminerale, Bodenoxide und -hydroxide des Eisens und des Aluminiums, organische Substanz) locker gebunden. Zur Gruppe der labilen Phosphate gehören ferner leicht mineralisierbarer organisch gebundener Phosphor und leicht lösliche anorganische Phosphatverbindungen (Magnesium-, Natrium- und Ammonium-, aber auch bestimmte Calciumphosphate).

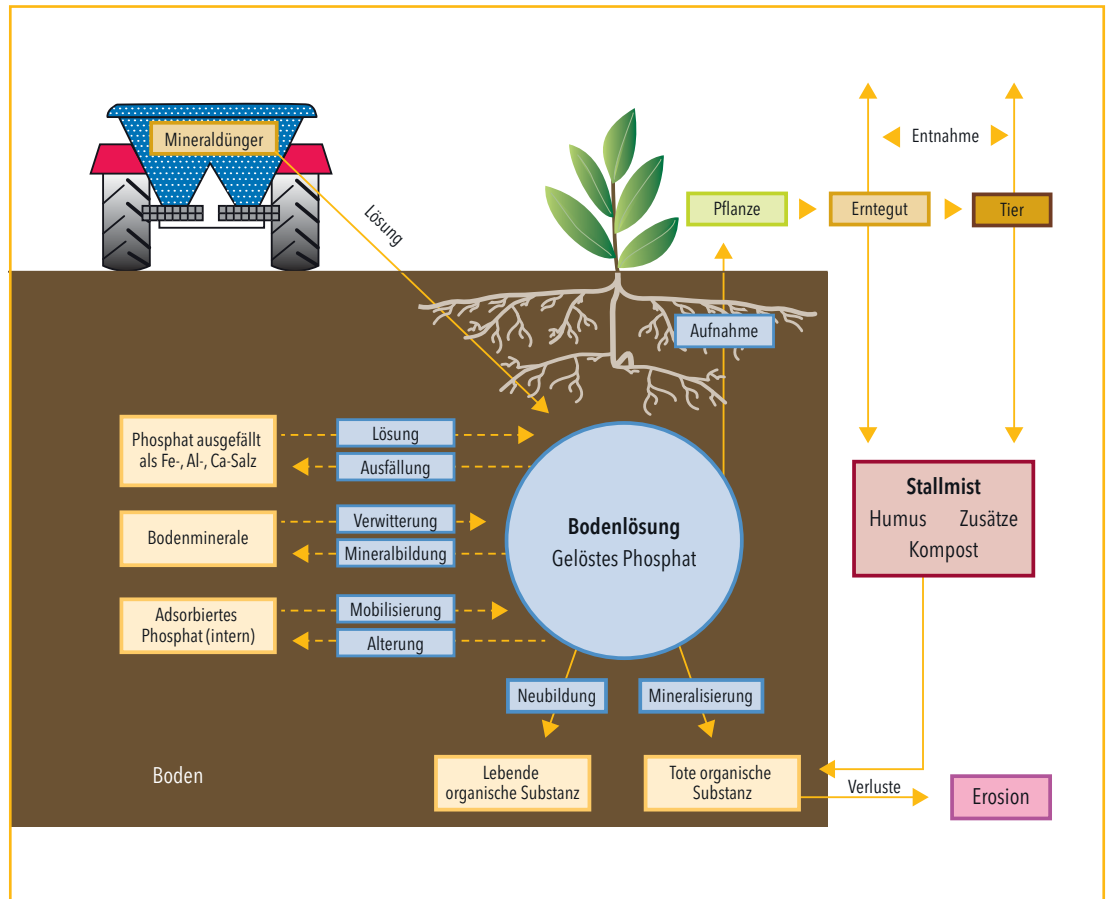
Der größte Teil des Bodenphosphats liegt in der „stabilen“ Fraktion vor. Es ist nur schwer mobilisierbar, so dass es kurz- bis mittelfristig nicht zur Ernährung der Pflanzen beitragen kann. Zu diesen Phosphorverbindungen gehören Calcium- und Eisenphosphate sowie in organischer Bindungsform Phytate\*.

Einige Pflanzen wie Raps und Weiße Lupine können durch organische Säuren, die von den Wurzeln ausgeschieden werden, nicht pflanzenverfügbare Bodenphosphate in eine für sie nutzbare Form überführen. Auch Mikroorganismen sind in der Lage, Bodenphosphate in beträchtlichem Umfang in pflanzenverfügbare Formen umzuwandeln. Neben einem aktiven Bodenleben ist ein Boden-pH-Wert im schwach sauren bis neutralen Bereich günstig für die Phosphatverfügbarkeit.

Anders als Stickstoff geht Phosphor dem System Boden nicht auf gasförmigem Wege verloren. Auch die Auswaschung spielt wegen der stärkeren Bindung an Bodenpartikel und der Bildung schwer löslicher Salze auf den meisten Böden keine große Rolle. Verluste können allerdings durch Bodenerosion auftreten. Bodenteilchen werden dabei mit dem daran gebundenen Phosphat durch Wind oder Wasser abgetragen. Das Phosphat kann auf diesem Wege in Gewässer gelangen und so die Umwelt belasten. Von Bodenabtrag betroffen sind vor allem Ackerflächen in Hanglage und Überschwemmungsgebieten.



Phosphordynamik im Boden



Kaliumdynamik im Boden

Kalium liegt im Boden ausschließlich in anorganischen Salzen als Kalium-Ionen vor. Der Gehalt eines Bodens an Gesamtkalium schwankt zwischen 0,2 und 3,3 Prozent K (Schachtschabel 1998). Davon ist jedoch nur ein geringer Teil pflanzenverfügbar. Die Kaliumdynamik und -verfügbarkeit und damit das Kaliumangebot an die Pflanzen wird in Böden entscheidend durch die Nährstoffflüsse in dem System Tonminerale – Bodenlösung – Pflanzenwurzel bestimmt.

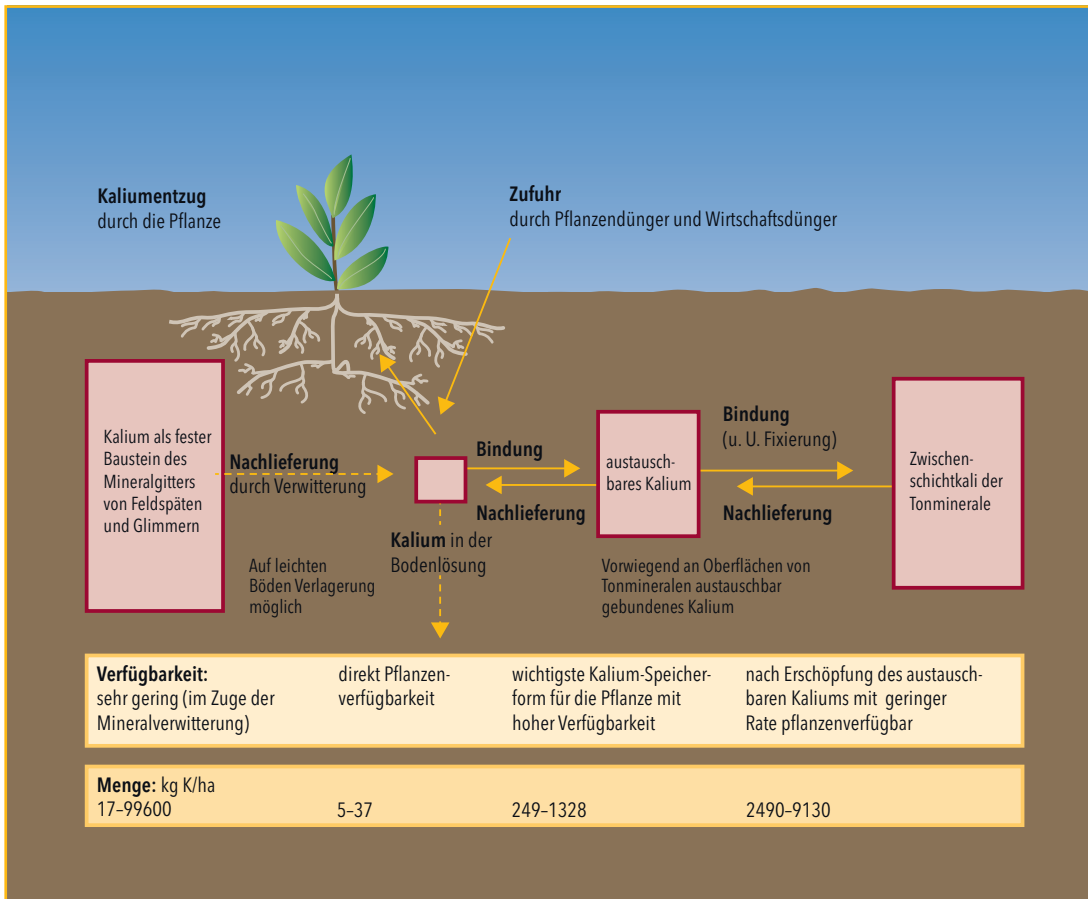
Man unterscheidet zwischen

- ⊞ direkt pflanzenverfügbaren Kalium-Ionen in der Bodenlösung
- ⊞ austauschbaren Kaliumionen mit hoher Verfügbarkeit (sind an die Oberflächen von Tonmineralen locker gebunden und können in die Bodenlösung abgegeben werden)

- ⊞ Zwischenschicht-Kalium-Ionen mit geringer Verfügbarkeit (sind in den Zwischenschichten von Tonmineralen festgelegt)
- ⊞ Kalium-Ionen, die als fester Baustein im Kristallgitter von Mineralien (zum Beispiel von Feldspäten und Glimmern) nur mit äußerst geringer Verfügbarkeit vorliegen

Zwischen 95 und 99 Prozent des Kaliums im Boden liegen in nicht austauschbarer Form vor. Es ist in den Zwischenschichten der Glimmer und Tonminerale bzw. im Kristallgitter von Mineralien (zum Beispiel Feldspäten) gebunden und steht den Pflanzen nicht unmittelbar zur Verfügung. Die Bodenlösung enthält nur vier bis 37 Kilogramm K/ha und liegt damit weit unter dem Bedarf der Kulturpflanzen. So benötigt Getreide im Laufe seiner Entwicklung rund 125 Kilogramm K/ha, Zuckerrüben brauchen sogar 370 Kilogramm K/ha.

Kaliumdynamik



Nimmt nun die Pflanze Kalium-Ionen auf, sinkt die Kalium-Ionen-Konzentration in der Bodenlösung ab. Für das Pflanzenwachstum kommt es nun darauf an, dass möglichst schnell austauschbare Kalium-Ionen von den Oberflächen der Tonminerale in die Bodenlösung nachgeliefert werden.

aber meist gute Nachlieferung und Speicherung (Pufferung), da sie einen hohen Vorrat an austauschbaren Kalium-Ionen haben. Das bedeutet, die Kalium-Ionen-Konzentration der Bodenlösung fällt nach der Kalium-Ionen-Aufnahme durch die Pflanze nicht so schnell ab wie auf dem leichten Sandboden.

Neben der Witterung und Faktoren wie der Bodenfeuchte hängt das Nachliefervermögen eines Bodens in hohem Maße vom Gehalt an Tonmineralen und deren Zusammensetzung ab. Im Vergleich zu Sanden und Mooren benötigen tonreiche Böden in der Regel höhere Kaliumgehalte, um eine für das Pflanzenwachstum ausreichende Kalium-Ionen-Konzentration in der Bodenlösung sicherzustellen. Das liegt daran, dass solche Böden durch den höheren Tongehalt mehr Bindungsstellen für die Sorption von Kalium-Ionen aufweisen als Sand- und Moorböden. Ein Vorteil tonreicher Böden ist die dann

**Kalium-Immobilisierung**

Auf manchen tonhaltigen Böden werden trotz normaler Kaliumdüngung zum Teil starke Kalium-Mangelscheinungen an Pflanzen beobachtet. Ursache ist die sogenannte „Kaliumfixierung“: Das gedüngte Kalium wird in den Zwischenschichten bestimmter Tonminerale (zum Beispiel Vermiculite\*) festgelegt und ist nicht mehr pflanzenverfügbar. In solchen Fällen müssen durch hohe Kaliumdüngergaben zunächst die Zwischenschichten der Tonminerale aufgefüllt werden. Erst danach ist gedüngtes Kalium für das Pflanzenwachstum effektiv.

Im Mittelalter lebten rund 90 Prozent der Bevölkerung auf oder in der Nähe von einem landwirtschaftlichen Betrieb. Die mit dem Erntegut dem Boden entzogenen Nährstoffe wurden über menschliche und tierische Exkremente wieder dem Acker zugeführt. Damit waren die Nährstoffkreisläufe fast geschlossen. Trotzdem nahm die Fruchtbarkeit der Böden im Lauf der Zeit ab, weil auch schon damals mit jeder landwirtschaftlichen Nutzung unvermeidbare Nährstoffverluste einhergingen. Beispiele dafür sind etwa die gasförmigen Stickstoffverluste bei der Lagerung und Ausbringung von Wirtschaftsdüngern (z. B. Stallmist, Jauche) und die Verlagerung von Stickstoff mit dem Sickerwasser aus dem durchwurzelten Bereich des Bodens.

Heute hingegen leben und arbeiten 97 Prozent der Bevölkerung in Deutschland außerhalb der Landwirtschaft. Ein beachtlicher Teil der von den Pflanzen aufgenommenen Nährstoffe wird mit den Erzeugnissen zu den Konsumenten transportiert und so dem landwirtschaftlichen Kreislauf entzogen. Denn mit dem Abtransport der Ernteprodukte verlassen auch die darin gebundenen Nährstoffe das Feld. Ein Rücktransport der Nährstoffe aus menschlichen Exkrementen über Klärschlamm findet nur eingeschränkt statt.

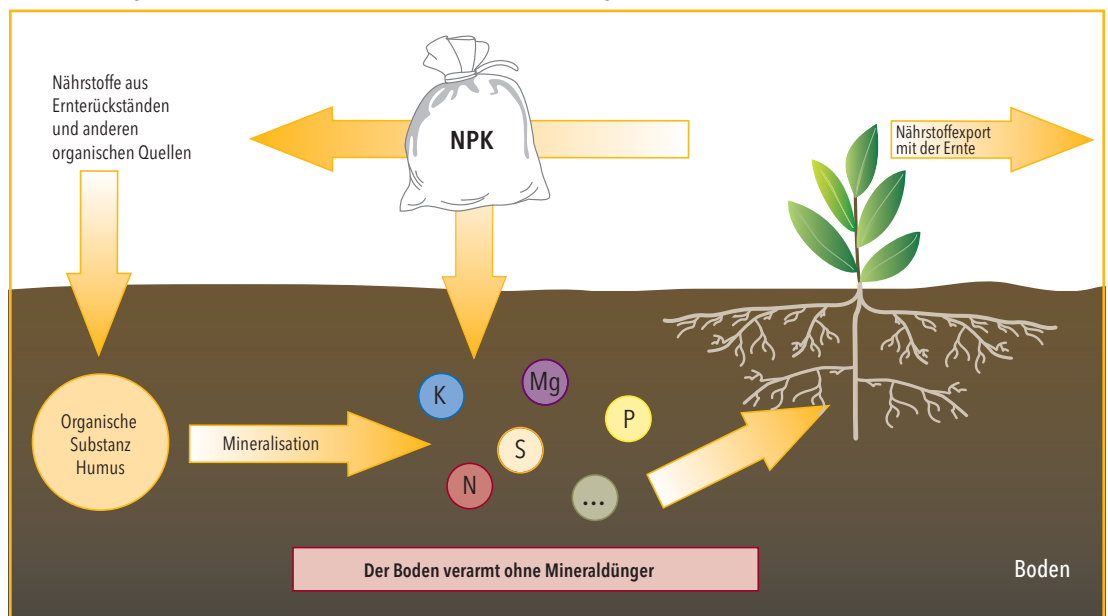
Anders verhält es sich bei Futter wie Gras, Klee oder Silomais, das an Nutztiere im Betrieb verfüttert wird. Die Nährstoffe, die von den Tieren in Kot und Harn ausgeschieden werden, verbleiben auf dem Betrieb und gelangen in Form von Stallmist, Jauche oder Gülle zurück auf das Feld. Das reicht aber zumeist nicht aus, um die Kulturpflanzen ausgewogen zu ernähren, weshalb auch viehhaltende Betriebe zusätzlich Mineraldünger einsetzen.

Nur wenn der Landwirt die Nährstoffexporte und -verluste durch eine angepasste Düngung ersetzt, kann er

- ⬢ überhaupt verkaufsfähige Ware erzeugen
- ⬢ dauerhaft hohe Erträge erzielen
- ⬢ die Qualität der Ernteprodukte verbessern (z. B. Nährwert, Geschmack, Lagerungs- und Verarbeitungseigenschaften, Aussehen)
- ⬢ die Widerstandsfähigkeit und Gesundheit der Pflanzen günstig beeinflussen
- ⬢ die Bodenfruchtbarkeit erhalten oder verbessern

⬢ ABBILDUNG 13

## Mineraldünger ersetzen die Nährstoffe, die mit der Ernte abgefahren werden



Damit kann er seinen Betriebserfolg langfristig optimieren und dazu beitragen, dass uns allen jederzeit landwirtschaftliche Produkte in ausreichender Menge und guter Qualität zur Verfügung stehen.

#### ABBILDUNG 14

##### Optimale und suboptimale Stickstoffversorgung von Winterweizen



Aber auch zu viel des Guten kann sich negativ auf die Qualität des Ernteguts und die Umwelt auswirken. Zu hohe Stickstoffdüngung führt zum Beispiel

- bei Getreide zu einer Schwächung der Standfestigkeit, so dass bei starkem Regen die Halme leichter umknicken
- bei Gemüse zu unerwünscht hohen Nitratgehalten
- im Grundwasser zu erhöhten Nitratwerten und damit zu höheren Kosten für die Wasseraufbereitung.

#### HINWEIS

Unter Düngung versteht man die gezielte Nährstoffzufuhr (richtige Menge zur richtigen Zeit) zur Ernährung einer Pflanze. Dabei spielt es für die Pflanze keine Rolle, ob die Nährstoffe über Mineraldünger oder über organische Dünger verabreicht werden.

### 4.1 Wie viel ist „bedarfsgerecht“?

Der Betriebserfolg im Pflanzenbau hängt vorrangig vom Ertrag ab. Düngung ist dabei der Produktionsfaktor, mit dem die höchsten Ertragssteigerungen erzielt werden können.

Die optimale Düngung richtet sich aber nicht nach dem Maximalertrag, sondern nach dem wirtschaftlichen Optimalertrag. Bei diesem ist der Gewinn, d. h. die Differenz zwischen dem Verkaufserlös der Ernteprodukte und den Dünger- und sonstigen Betriebskosten, für den Landwirt am höchsten. Höhere Düngemittelaufwendungen vermindern den Gewinn, wenn die zusätzlichen Düngerkosten höher sind als der zusätzliche durch Mehrertrag erwirtschaftete Erlös. Eine Düngung unterhalb des wirtschaftlichen Optimums führt dagegen zu nicht ausgeschöpftem Gewinn.

#### Das Einmaleins der Düngung

Art, Menge und Zeitpunkt der Düngung müssen am Bedarf der Pflanzen und am Nährstoffgehalt des Bodens ausgerichtet werden. Der Düngbedarf ergibt sich vereinfacht wie folgt:

$$\text{Düngbedarf} = \text{Nährstoffbedarf des Pflanzenbestandes} - \text{Nährstoffangebot des Bodens}$$

Der Nährstoffbedarf des Pflanzenbestandes entspricht der insgesamt bis zur Erntereife aufgenommenen Nährstoffmenge in Spross und Wurzeln bei optimaler Nährstoffversorgung. Sie hängt ab von der jeweiligen Kulturart sowie dem standortbedingten Ertragsniveau. Der Nährstoffbedarf kann über den Mineralstoffgehalt der Pflanzen und über das Gesamtgewicht des Aufwuchses berechnet werden. Beispielsweise liegt der Stickstoffbedarf von Winterweizen je nach Ertragsniveau zwischen 190 und 250 Kilogramm N pro Hektar. Ein Teil davon stammt aus den Bodenvorräten, der Rest muss durch Düngung bereitgestellt werden.

Von der gesamten von der Pflanze aufgenommenen Nährstoffmenge wird bei der Ernte ein Teil vom Acker abgefahren. Im Falle eines Weizen-Kornertrages von

acht Tonnen pro Hektar mit einem durchschnittlichen Stickstoffgehalt von zwei Prozent sind das pro Hektar insgesamt 160 Kilogramm Stickstoff – allein im Korn. Wird auch das Stroh vom Feld abgefahren, steigt der Nährstoffexport entsprechend weiter an (s. Tab. 2).

Deutlich schwieriger als die Ermittlung des Nährstoffbedarfs ist die Prognose des Nährstoffangebotes im Boden, das dem Pflanzenbestand im Laufe seiner Entwicklung zur Verfügung steht. Dieses Angebot unterliegt einem dynamischen Zusammenwirken aus Nährstoffzufuhr (Düngung) und Freisetzung einerseits und Immobilisierung, Festlegung und Verlusten andererseits (s. oben).

#### LEHRER-INFO

Bestimmung des Stickstoffgehalts von Erde  
*Experimente 7 (1-3)*

Veraschung und Nachweis von Mineralstoffen  
*Experiment 8*

Je nach Nährstoff kommen für die Bemessung der Düngungshöhe verschiedene Methoden und Hilfsmittel zur Anwendung:

- ⬡ Bodenuntersuchungen: Sie geben Hinweise über den Vorrat an pflanzenverfügbaren Nährstoffen im Boden.
- ⬡ Pflanzenanalysen: Sie informieren über den aktuellen Ernährungszustand der Pflanzen, zum Beispiel ob ein bestimmter Nährstoff im Mangel ist. Dadurch ist eine Anpassung der Düngung möglich.
- ⬡ Kalkulationen und Simulationen: Der Düngbedarf wird unter Verwendung empirischer Versuchsdaten bzw. durch Simulation des Pflanzenwachstums und von Nährstoffflüssen im Boden berechnet.
- ⬡ Erfahrungswerte/Faustzahlen/Beobachtung des Pflanzenbestandes

TABELLE 2

#### Mittlere Nährstoffgehalte wichtiger landwirtschaftlicher Kulturpflanzen

Fruchtart		Ertrag/ Hektar [dt Erntegut <sup>1</sup> ]	Gehalt kg/ dt Frisch- masse				
			N	P	K	Mg	S
Weizen	Korn	75	1,81	0,80	0,60	0,20	0,14
	Stroh	60	0,50	0,30	1,40	0,20	0,04
Raps	Korn	40	3,35	0,18	1,00	0,50	0,34
	Stroh	68	0,70	0,35	2,35	0,41	0,02
Kartoffeln	Knolle	400	0,35	0,14	0,60	0,04	0,02
	Kraut	80	0,20	0,04	0,36	0,08	0,02
Zucker- rüben	Rübe	600	0,18	0,04	0,21	0,05	0,01
	Blatt	420	0,04	0,11	0,71	0,01	0,02
Silomais	Ganzpflanze	420	0,43	0,18	0,51	0,01	0,03

dt = Dezitonne = 100 Kilogramm

<sup>1</sup>Frischmasse

## HINWEIS

### §§§ Aus dem Nähkästchen der Juristen §§§

#### „Gute fachliche Praxis“ der Düngung

Der Landwirt muss beim Düngen die „Gute fachliche Praxis“ beachten. Darunter versteht man Grundprinzipien, die eine bedarfsgerechte und verlustarme Düngung gewährleisten sollen. Sie werden in der Düngeverordnung verbindlich geregelt. Beispielsweise muss der Landwirt den Düngebedarf sachgerecht bestimmen. Dazu müssen der Nährstoffbedarf der Kulturpflanzen und die im Boden verfügbaren Nährstoffe ermittelt und berücksichtigt werden. Die Düngeverordnung enthält ferner Regelungen über Sperrzeiten für die Düngeausbringung, über den Gewässerschutz und über Obergrenzen, die nicht überschritten werden dürfen.

## 4.2 Düngung nach Bodenanalyse

In der landwirtschaftlichen Düngepraxis spielen Bodenuntersuchungen eine wichtige Rolle. Dabei lässt der Landwirt die pflanzenverfügbaren Nährstoffgehalte durch Bodenanalysen feststellen. Anhand der Bodengehalte wird für die jeweilige Kultur die erforderliche Düngungsmenge abgeleitet.

### Stickstoffdüngung – punktgenau nach Pflanzenbedarf

Für Pflanzen unmittelbar verfügbar ist nur der mineralische Stickstoff in Form von Nitrat- und Ammonium-Ionen. Diesen Stickstoffanteil in der von den Wurzeln nutzbaren Bodenschicht lässt der Landwirt im Frühjahr durch die sogenannte Nmin-Bodenuntersuchung (min = mineralisch) feststellen. Die Höhe der Stickstoffdüngung ergibt sich nach Abzug des gemessenen Nmin-Vorrats (=Stickstoff in Form von Ammonium- + Nitrat-Ionen) von einem sogenannten Sollwert. Dieser wird in Feldversuchen unter standorttypischen Bedingungen ermittelt. Werden neben Mineraldüngern auch organische Dünger eingesetzt, muss deren Stickstofflieferung entsprechend berücksichtigt werden.

Pflanzen haben während ihres Wachstums einen wechselnden Stickstoffbedarf. Der Landwirt präzisiert die Stickstoffversorgung, indem er bei Kulturpflanzen mit hohem Stickstoffbedarf die Mineraldüngung in mehrere Gaben aufteilt. Auf diese Weise kann er den Pflanzen zeitnah die Stickstoffmenge düngen, die sie in der jeweiligen Entwicklungsphase gerade benötigen. Weizen beispielsweise wird drei bis vier Mal im Jahr mit Stickstoff gedüngt.

## TABELLE 3

### Beispiel für die Anwendung bei Wintertraps

Sollwert	200 kg N/ha
Abzüglich Nmin-Vorrat (im Februar gemessen, 0–90 cm Bodentiefe)	– 50 kg N/ha
Erforderliche N-Düngung	150 kg N/ha



### Düngung nach Bodengehaltsklassen

Phosphor und Kalium werden in den meisten Böden wesentlich stärker festgehalten und damit besser gespeichert als der sehr mobile Stickstoff. Eine Aufteilung der Düngung auf mehrere Teilgaben ist daher nicht notwendig. Das Ziel der Düngung bei diesen Nährstoffen ist daher vor allem, den Nährstoffspeicher des Bodens in einen optimalen Zustand zu bringen und diesen dauerhaft zu halten. Zur Ableitung von Düngempfehlungen wird der Boden deshalb nach seinem Gehalt an pflanzenverfügbarem Phosphat bzw. Kalium in die Gehaltsklassen A, B, C, D und E eingeteilt. Böden in „Klasse C“ sind ausreichend mit dem betreffenden Nährstoff versorgt. Bei Böden dieser Gehaltsklasse soll die Düngung daher der Höhe der Nährstoffmenge entsprechen, die über das Erntegut dem Boden entzogen wird. Böden in „Klasse A“ sind sehr schlecht versorgt, Böden in „Klasse E“ überversorgt. Für die „Klasse A“ liegt daher die empfohlene Düngermenge über dem Ernteentzug, während auf Böden in „Klasse E“ die Düngung ganz entfallen kann. Die Bodenuntersuchungen sollten möglichst alle drei bis vier Jahre durchgeführt werden. Neben Phosphor und Kalium kommt die Düngung nach Bodengehaltsklassen auch bei Magnesium, einigen Mikronährstoffen und den Kalkdüngern zur Anwendung.

### 4.3 Präzise Düngung durch Hightech

Durch den Einsatz moderner Verfahren kann der Landwirt die Düngung an der momentanen Nährstoffversorgung der Kulturpflanzen ausrichten.

Ein Beispiel sind optische Sensoren, die bei der Stickstoffdüngung eingesetzt werden. Die auf dem Traktordach montierten Sensoren ermitteln den Chlorophyllgehalt, d. h. die Intensität der Grünfärbung der Pflanzen, sowie die Menge an Biomasse durch Messung des vom Pflanzenbestand reflektierten Lichts. Die Messung erfolgt während der Düngerausbringung auf dem Feld. Da Chlorophyllgehalt und -menge in direkter Beziehung zur Stickstoffversorgung der Pflanzen stehen, kann vom Sensormesswert online die notwendige Düngermenge abgeleitet werden. Eine hohe Chlorophyllmenge bedeutet eine gute Versorgung der Pflanzen mit Stickstoff, weshalb die Düngermenge reduziert wird. Umgekehrt bedeutet wenig Chlorophyll, dass die Düngermenge erhöht werden muss. Je nach den auf der gerade überfahrenen Fläche ermittelten Messwerten wird der Düngerstreuer gesteuert und die ausgestreute Düngermenge fortwährend erhöht oder reduziert. Auf diese Weise wird die ausgebrachte Stickstoffmenge sogar auf den Bedarf einzelner Teilflächen angepasst (teilflächenspezifische Düngung), was mit anderen Verfahren nicht möglich ist.

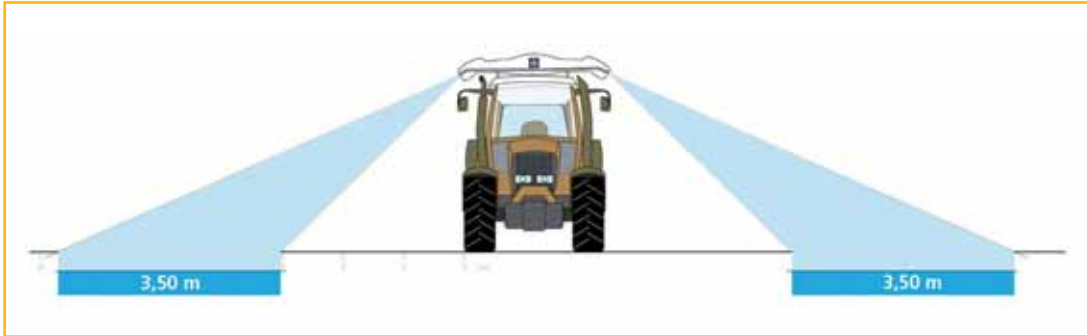
TABELLE 4

#### Düngung nach Bodengehaltsklasse

P-Gehaltsklasse	mg P/100 g Boden <sup>1</sup>	Düngebedarf	Düngebedarf am Bsp. Zuckerrüben, Ertrag 60 t pro Hektar
E	≤ 2,0	Keine Düngung	0
D	2,1 – 4,4	Verminderte Düngung	26
C	4,5 – 9,0	Erhaltungsdüngung	44 = Nährstoffentzug
B	9,1 – 15,0	Erhöhte Düngung	62
A	≥ 15,1	Stark erhöhte Düngung	78

<sup>1</sup> VDLUFA (1997)

### N-Sensor auf dem Traktordach



Ein anderer Ansatz der sogenannten teilflächenspezifischen Düngung basiert darauf, dass Daten und Informationen kleinräumig auf digitalen Karten erfasst und zur Düngplanung am Büro-PC – also im Vorfeld der Düngung – herangezogen werden. Als Grundlage dienen Karten, aus denen Bodenunterschiede hervorgehen. Auf dieser Basis erfolgt dann – zum Teil über GPS gesteuert – die Entnahme von Bodenproben, deren Ergebnisse (z. B. pH-Wert, Kalium- und Phosphatgehalt) in entsprechende Nährstoffkarten eingehen.



Darüber hinaus können Ertragsdaten einfließen, die durch Sensoren am Mähdrescher beim Mähdrusch online gemessen werden. Wenn dann die Ergebnisse der Bodenkarten, der Nährstoffkarten und der Ertragskarten zusammengeführt werden, ergeben sich daraus sehr genaue Informationen zu dem Ertragspotenzial und dem daraus resultierenden Nährstoffbedarf der einzelnen Felder und ihrer Teilstücke. Über die Steuerungselektronik an Bord des Traktors fließen diese Daten dann während der Feldarbeit etwa in die Einstellung des Düngerstreuers ein. Anwendung findet dieser auf Karten basierende Ansatz vor allem bei der Phosphat- und Kaliumdüngung sowie bei der Kalkung.



Sensoren und Karten können zudem miteinander kombiniert werden.

Für die Herstellung von Mineraldüngern werden natürliche Rohstoffe verwendet. Dazu gehören Kalisalze, Rohphosphate und Kalkgesteine, die in Lagerstätten abgebaut werden, sowie Stickstoff, der aus der Luft gebunden wird. Die Rohstoffe werden im Produktionsprozess mechanisch, thermisch oder chemisch aufbereitet, und die in ihnen enthaltenen Nährstoffe werden in eine pflanzenverfügbare Form gebracht.

Mineraldünger haben sich seit 160 Jahren bewährt, Kalk sogar seit der Römerzeit. Heute sind sie ein unverzichtbarer Bestandteil einer effizienten Landwirtschaft, denn sie enthalten die Pflanzennährstoffe konzentriert und in genau definierter Zusammensetzung. Im Gegensatz zu organischen Düngern ermöglichen sie daher eine gezielte und dadurch verlustfreiere Düngung. Damit können sie besonders umweltschonend eingesetzt werden.

Die in Mineraldüngern vorliegenden Nährstoffformen entsprechen denen, die auch natürlicherweise im Boden vorkommen. Sie werden entweder unmittelbar von den Pflanzen aufgenommen oder – wie bei organischen Düngern auch – durch Bodenorganismen und bodenchemische Vorgänge in pflanzenverfügbare Formen umgewandelt.



## HINWEIS

### Nährstoffangaben in Oxidform: $P_2O_5$ , $K_2O$ , $MgO$ und $CaO$

Schaut man auf die Verpackung eines Düngemittels, so stellt man fest, dass die Gehalte von Phosphor, Kalium, Magnesium und Calcium häufig in den Oxidformen  $P_2O_5$ ,  $K_2O$ ,  $MgO$  und  $CaO$  angegeben sind. Auch bei Düngempfehlungen, Boden- und Pflanzenanalysen – ja bis hin zur Fachliteratur – sind Nährstoffangaben in Oxidform verbreitet. Dabei handelt es sich nicht um die chemische Verbindung, in der der Nährstoff im Dünger vorliegt, sondern um eine vereinbarte Form der Angabe der Nährstoffgehalte, die sich historisch aus alten analytischen Verfahren erklärt. Über Faktoren kann die Oxidform in die Elementform umgerechnet werden, zum Beispiel  $10 \text{ kg } P_2O_5 \times 0,436 = 4,36 \text{ kg P}$ .

## LEHRER-INFO

Untersuchung von Düngemitteln auf Nitrate  
*Experiment 9*

Untersuchung von Düngemitteln auf Phosphate  
*Experiment 10*

## HINWEIS

### §§§ Aus dem Nähkästchen der Juristen §§§

#### Mineraldünger müssen wirksam und unbedenklich sein

Welche Mineraldünger in Verkehr gebracht werden dürfen, wird durch die EU-Verordnung (EG) Nr. 2003/2003 über Düngemittel und die nationalen Vorschriften der Mitgliedsstaaten (Düngemittelverordnung) geregelt. Düngemittel sind generell nur zulässig, wenn sie wirksam sind und bei sachgerechter Anwendung keine schädlichen Wirkungen auf Menschen, Tiere, Pflanzen und Umwelt haben.

### Meilensteine der Mineraldüngerproduktion

- 1804 Der Naturforscher Alexander von Humboldt bringt den Naturdünger „Guano“ nach Europa. Dabei handelt es sich um Exkremente von Seevögeln, die auf südamerikanischen Inseln im Pazifik bis zu 30 Meter mächtige Ablagerungen bilden. Um 1840 erfolgt bereits eine regelmäßige Einfuhr des Naturdüngers aus Peru.
- 1810 Die Gewinnung des Chilesalpeters beginnt um 1810. Basis dafür sind Bodenschichten in der Atacama-Wüste, aus denen das darin vorhandene Natriumnitrat durch Auslaugen gewonnen wird. 1830 erfolgt die erste Salpeter-Lieferung aus Chile nach Europa.
- 1843 Beginn der Phosphatdüngerproduktion: Durch schwefelsauren Aufschluss von Knochen wird in England sog. „Superphosphat“ hergestellt. Zunehmend werden Knochen durch mineralische Phosphate ersetzt.
- 1856 Der erste Kalibergbau der Welt entsteht: Entdeckung von Kaliumsalzen in Rückstandshalden der Steinsalzproduktion in Staßfurt bei Magdeburg. 1861 beginnt dort schließlich die Förderung von Kaliumsalzen.
- 1879 Als Nebenprodukt der Stahlherstellung entsteht in Deutschland aus den eingesetzten phosphathaltigen Erzen der Phosphatdünger Thomasmehl.
- 1890 Ammonsulfat, das als Nebenprodukt in Kokereien anfällt, wird zunehmend zur Düngung verwendet.
- 1895 Adolf Frank und Nikodemus Caro entwickeln ein Verfahren zur Herstellung von Calciumcarbit (Kalkstickstoff). 1908 startet die erste Kalkstickstoffproduktion in Trostberg (Bayern).
- 1905 Beginn der industriellen Produktion von Kalksalpeter (Norgessalpeter) durch die Norsk Hydro in Norwegen.
- 1909 Geburtsstunde des Haber-Bosch-Verfahrens: Fritz Haber entwickelt ein Verfahren zur Reduktion des Luftstickstoffs durch Wasserstoff mittels hoher Temperatur und hohem Druck.
- 1913 Bei der BASF in Ludwigshafen wird nach dem Haber-Bosch-Verfahren erstmals im industriellen Maßstab Ammoniak produziert. Auf dieser Basis werden heute etwa 99 Prozent der Stickstoffdünger hergestellt.

## 5.1 Stickstoffdünger

Von allen Pflanzennährstoffen beeinflusst Stickstoff die Ertrags- und Qualitätsbildung am stärksten. Mehr als bei allen anderen Nährstoffen kommt es beim Stickstoff auf eine exakte Dosierung zur richtigen Zeit an, denn zu viel oder zu wenig führt schnell zu Ertrags- und Qualitätseinbußen. Die Stickstoffdüngung ist das wichtigste Instrument des Landwirtes zur Steuerung des Pflanzenbestandes.

Die wichtigsten Rohstoffe für die Stickstoffdüngerproduktion sind Ammoniak und Salpetersäure.

### LEHRER-INFO

Modellexperiment zur Ammoniaksynthese  
Experiment 11

### Das Haber-Bosch-Verfahren

Stickstoff ist als Bestandteil der Proteine für alle Organismen lebensnotwendig und eigentlich im Überfluss vorhanden, denn die Luft besteht zu 78 Prozent aus elementarem Stickstoff (N<sub>2</sub>). Allerdings können nur bestimmte Bakterien den Luftstickstoff unmittelbar binden (s. Kap. 3.4), alle anderen Organismen sind auf Zufuhr von reaktiven Stickstoffverbindungen (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) angewiesen. Über Jahrhunderte stand für die Versorgung der Nutzpflanzen mit Stickstoff nur der Dung von Mensch und Tier zur Verfügung. Mit der Herstellung von Ammoniak durch die Synthese aus (Luft-) Stickstoff und Wasserstoff gelang es dem deutschen Chemiker Fritz Haber 1909, die Stickstoffvorräte der Luft „anzuzapfen“.



Um bei dieser Reaktion allerdings überhaupt brauchbare Ausbeuten an Ammoniak zu erzielen, muss mit hohen Drücken, hohen Temperaturen und einem Katalysator\* (Gemisch von Eisenoxid und Aluminiumoxid)

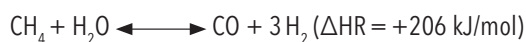
gearbeitet werden. Der deutsche Chemiker Carl Bosch konnte die Ammoniakgewinnung schließlich zur industriellen Anwendung bringen. 1913 ging die erste großtechnische Ammoniaksynthese nach dem Haber-Bosch-Verfahren in Ludwigshafen in Betrieb.

Für ihre bahnbrechende Erfindung, die die Basis für die Herstellung stickstoffhaltiger Mineraldünger lieferte und immense Ertragsteigerungen in der Landwirtschaft möglich machte, wurden Fritz Haber 1918 und Carl Bosch 1931 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet.

Die Synthese des Ammoniaks aus Stickstoff und Wasserstoff findet in Hochdruckreaktoren statt. In einem vorgeschalteten Prozess muss zuvor das bei der Ammoniaksynthese eingesetzte,  $H_2$  und  $N_2$  enthaltende Gasgemisch hergestellt und aufbereitet werden. Der Wasserstoff wird dabei in europäischen Anlagen überwiegend nach dem Steamreforming-Verfahren aus Erdgas und Wasser gewonnen. Das Erdgas liefert zusätzlich die für den Prozess notwendige Energie. Vereinfacht lassen sich folgende Verfahrensschritte unterscheiden (in Anlehnung an BASF 2012):

#### 1) Primärreformer

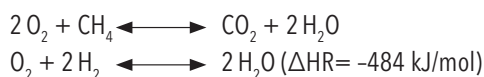
Im Primärreformer werden bei 700 bis 850 °C unter Druck Methan (aus Erdgas) und Wasserdampf über einem Nickel-Katalysator zu Wasserstoff umgesetzt.



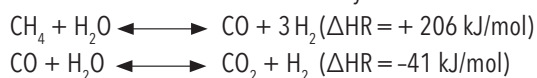
Das Gasgemisch, das den Primärreformer verlässt, besteht im Wesentlichen aus  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$  und nicht vollständig umgesetzten  $CH_4$  und  $H_2O$  (Dampf).

#### 2) Sekundärreformer

Der Sekundärreformer dient in erster Linie zur Bereitstellung des Stickstoffs. Dem aus dem Primärreformer zugeführten Gasgemisch wird dabei verdichtete Luft zugeführt. Luft besteht zu 78 Prozent aus Stickstoff und zu 21 Prozent aus Sauerstoff. Während  $N_2$  unverändert im Gasgemisch verbleibt, reagiert der Luftsauerstoff mit dem zugeführten Gas aus dem Primärreformer zu  $H_2O$ ,  $CO$  und  $CO_2$ , wobei noch vorhandenes Methan nachverbrannt wird.



Anschließend über dem Nickel-Katalysatorbett:



Das Gasgemisch aus dem Sekundärreformer enthält schließlich  $H_2$ ,  $N_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$  und Reste von  $CH_4$ .

#### 3) Entfernung von Kohlenstoffdioxid und Kohlenstoffmonoxid

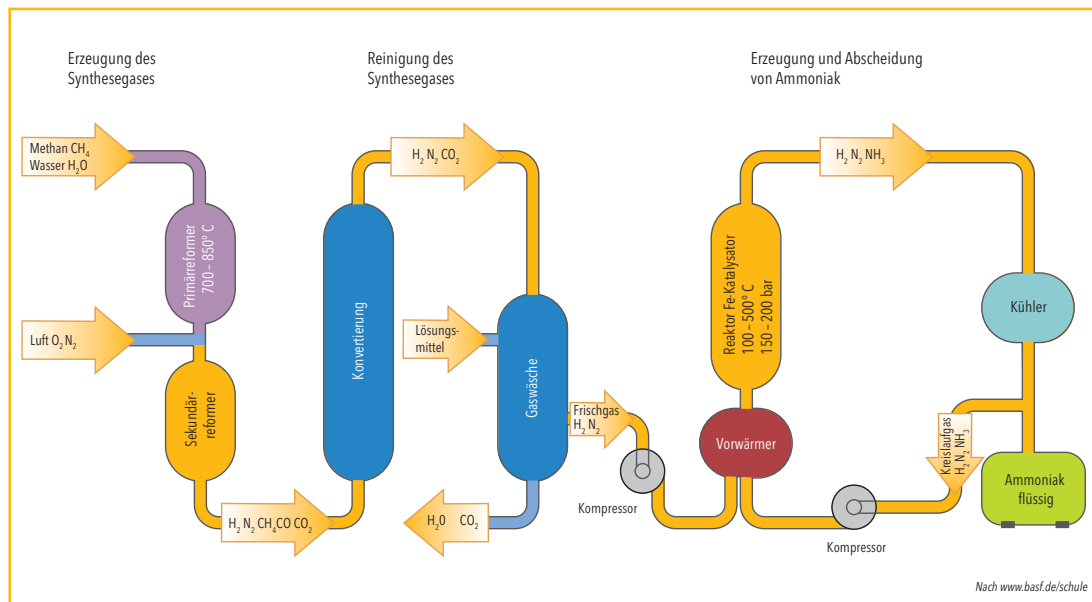
In den anschließenden Reinigungsstufen werden die im Gasgemisch vorhandenen Gase Kohlenstoffdioxid und Kohlenstoffmonoxid entfernt, da sie den Katalysator der Ammoniaksynthese schädigen würden (sog. Katalysatorgifte).



Fritz Haber



### Ammoniaksynthese im Haber-Bosch-Verfahren



#### 4) Ammoniaksynthese

In Hochdruckreaktoren, die mit einem Eisenoxid-Mischkatalysator gefüllt sind, reagieren Stickstoff und Wasserstoff bei 100 bis 500 °C unter Druck (150 bis 200 bar) zu Ammoniak.



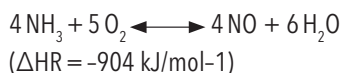
Durch Abkühlung des Gasgemisches wird das entstandene Ammoniak verflüssigt und abgetrennt.

#### Salpetersäure

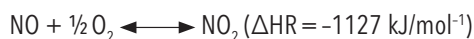
Aus Ammoniak können direkt Düngemittel hergestellt werden, die Ammonium-Ionen oder Harnstoff enthalten. Wie oben gezeigt, ist die Nitratdüngung für Kulturpflanzen jedoch weitaus bedeutsamer. Nitrate sind die Säurerest-Ionen der Salpetersäure, weswegen der Weiterverarbeitung von Ammoniak zu Salpetersäure eine große Bedeutung zukommt. Salpetersäure entsteht beim sogenannten Ostwald-Verfahren durch Oxidation des aus dem Haber-Bosch-Verfahren gewonnenen Ammoniaks.

Im ersten Schritt verbrennt ein Gemisch aus Ammoniak und Luft über einem Platin-Rhodium-Netz, das als

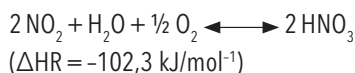
Katalysator dient. Bei Temperaturen von 810 bis 850 °C wird der Ammoniakstickstoff zu etwa 97 Prozent zu Stickstoffmonoxid (NO) umgewandelt.



In einem zweiten Schritt wird unter Zugabe von Luft bei Temperaturen zwischen 100 und 200 °C NO zu NO<sub>2</sub> oxidiert.



Salpetersäure entsteht schließlich im Gegenstromwäscher, wo NO<sub>2</sub> mit entmineralisiertem Wasser in Anwesenheit von Sauerstoff reagiert:



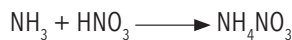
#### LEHRER-INFO

Herstellung von Salpetersäure  
Experiment 12



### Wichtige Stickstoffeinzeldünger Ammoniumnitrrathaltige Dünger, Kalkammonsalpeter

Der überwiegende Teil aller in Deutschland eingesetzten Düngemittel enthält Stickstoff in Form von Ammoniumnitrat. Bei der Herstellung von Ammoniumnitrat wird 50- bis 70-prozentige Salpetersäure mit Ammoniak neutralisiert. Die daraus hervorgehende konzentrierte Ammoniumnitratlösung wird zur Düngereproduktion eingesetzt.



Der am häufigsten in Deutschland verwendete Stickstoffeinzeldünger ist Kalkammonsalpeter (KAS, N-Gehalt = 27 Prozent). Dem Ammoniumnitrat wird Calcium- oder Calcium-Magnesium-Carbonat in Form von Kalkstein- oder Dolomitmehl zugesetzt.

### Harnstoff

Harnstoff mit 46 Prozent Stickstoffanteil entsteht durch Reaktion von Ammoniak und Kohlenstoffdioxid. In einem ersten exothermen Reaktionsschritt entsteht als Zwischenstufe Ammoniumcarbamat, das unter Energieaufnahme zu Harnstoff umgesetzt wird:

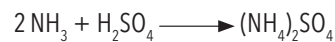


### Ammonitrratharnstofflösung (AHL)

AHL ist der gebräuchlichste flüssige Stickstoffdünger. Er enthält 28 Prozent N und besteht aus Harnstoff und Ammoniumnitrat, die zu gleichen Teilen in Wasser gelöst sind.

### Ammoniumsulfat und Ammoniumsulfatsalpeter

Ammoniumsulfat (21 Prozent Stickstoffanteil, 24 Prozent Schwefelanteil) wird durch Neutralisation von Schwefelsäure mit Ammoniak hergestellt. 80 Prozent des weltweit eingesetzten Ammoniumsulfates entstehen jedoch nicht auf diesem Wege, sondern als Nebenprodukt in Kokereien und bei der Produktion von Acrylnitril (Ausgangsstoff von Acrylsäure, Acrylestern und Acrylamid) und Caprolactam (Verwendung u. a. zur Herstellung von Fasern und Filamenten).



Wird Ammoniumsulfat in eine heiße Ammoniumnitratlösung eingebracht und anschließend granuliert, entsteht Ammonsulfatsalpeter (26 Prozent Stickstoffanteil, 14 Prozent Schwefelanteil) mit der Formel  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot \text{NH}_4\text{NO}_3$ .

### Kalkstickstoff

Kalkstickstoff enthält als Stickstoffkomponente Calciumcyanamid ( $\text{CaCN}_2$ ), darüber hinaus vor allem Calciumoxid und Kohlenstoff (18 bis 21 Prozent Stickstoffgehalt, 50 bis 60 Prozent CaO); er wird aus den Rohstoffen Kalkstein, Kohle und Luft hergestellt.

Calciumcyanamid muss im Boden erst über Harnstoff in ammoniumhaltige Verbindungen und gegebenenfalls weiter in nitrrathaltige Verbindungen umgewandelt werden, bevor Pflanzen den Stickstoff aufnehmen können. Bei der Umwandlung in Harnstoff entsteht Cyanamid ( $\text{NCNH}_2$ ) und auch etwas Dicyanamid ( $\text{NC-NH-C(=NH)-NH}_2$ ). Diese Verbindungen haben eine abtötende Wirkung auf verschiedene Unkräuter, Pilze und tierische Schädlinge.

### LEHRER-INFO

Enzymatischer Nachweis von Harnstoff im Kalkstickstoffhydrolysat

Experiment 13

HINWEIS

Spezialdünger

- ⊞ **Langzeitdünger und umhüllte Dünger**  
 Diese Dünger geben die Nährstoffe verzögert und über einen längeren Zeitraum in einer für die Pflanzen verfügbaren Form an die Bodenlösung ab. Im Idealfall stimmt die Freisetzung mit dem Bedarf der Pflanzen überein. Bei Langzeitdüngern beruht die Verzögerung auf einer anfangs wasserunlöslichen Stickstoffkomponente. Bei einem umhüllten Dünger wird die verzögerte Freisetzung dadurch erzielt, dass ein wasserlöslicher Dünger mit einer wenig durchlässigen Hüllsubstanz überzogen wird.
- ⊞ **Dünger mit Nitrifikationsinhibitoren**  
 Nitrifikationsinhibitoren sind chemische Verbindungen, die die bakterielle Oxidation (Nitrifikation) von Ammoniumstickstoff verzögern, indem sie die Enzymaktivität der Nitrosomonas-Bakterien im Boden hemmen. So bleibt der gedüngte Stickstoff länger in der weniger auswaschungsgefährdeten Ammoniumform erhalten.



TABELLE 5

Zusammensetzung wichtiger Dünger mit hohem Stickstoffgehalt

Produkt	Gesamt-Stickstoff [%]	Nitrat-Stickstoff [%]	Ammonium-Stickstoff [%]	Andere N-Formen, weitere Nährstoffe	Vorherrschende N-Verbindung
Kalkammonsalpeter	27	13,5	13,5	12 % CaO-teilw. bis 4 %	$\text{NH}_4\text{NO}_3$
Ammoniumsulfatsalpeter	26	7	19	14 %	$\text{NH}_4\text{NO}_3$ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$
Ammoniumsulfat	21	-	21	24 % S	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$
Ammonnitrat-harnstofflösung (AHL)	28	7	7	14 % Amid-N	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ $\text{NH}_4\text{NO}_3$
Harnstoff	46	-	-	46 % $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$
Kalkstickstoff	18,8	1,5	-	18,3 % $\text{CaCN}_2$	$\text{CaCN}_2$
NP, NK, NPK-Mehrnährstoffdünger		unterschiedlich		z. T. Amid-N	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ $\text{NH}_4\text{NO}_3$

## 5.2 Phosphatdünger

Die Ausgangsstoffe der gebräuchlichen Phosphatdünger sind natürlich vorkommende Phosphate, deren Vorräte im Unterschied zu Stickstoff endlich sind. Sie werden im Tage- oder Tiefbau abgebaut (s. Kap. 7.2). Durch Waschen und Anreicherung (Flotation) entsteht sogenanntes „Rohphosphat“. Es enthält in der Regel zwischen 8 und 18 Prozent P (18 bis 41 Prozent  $P_2O_5$ -Äquivalente). Das Phosphat liegt überwiegend in Form von schwerlöslichem Fluorapatit  $Ca_{10}(PO_4)_6F_2$  vor.

Die Zusammensetzung des Rohphosphats hängt von der Herkunft und Entstehung der Lagerstätte ab. Primäre Apatite sind vulkanischen Ursprungs. Weltweit überwiegen allerdings biogene Phosphatvorkommen, die vor 10 bis 15 Millionen Jahren durch Ablagerungen von Organismen am Meeresboden entstanden sind. Die größten Vorkommen an Phosphatmineralien, die unter derzeitigen Bedingungen wirtschaftlich abgebaut werden können, liegen in Afrika (Marokko, Algerien, Tunesien), in den USA (Florida) sowie in Russland (Kola).

Pflanzenwurzeln können Phosphat nur aus der Bodenlösung aufnehmen. Als Dünger ist deshalb Rohphosphat aufgrund seiner geringen Löslichkeit wenig effektiv. Durch die Behandlung mit Säure wird die Apatitstruktur\* des Ausgangsmaterials zerstört und das Phosphat in eine lösliche, gut pflanzenverfügbare Form überführt.



Phosphormine

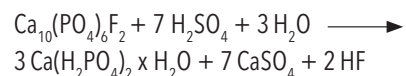
### Wichtige Dünger mit hohem Phosphatgehalt

#### 1) Vollaufgeschlossener Dünger

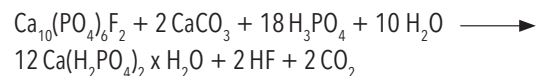
Bei diesen Düngern wird durch Nassaufschluss\* der Apatit komplett umgewandelt (Schilling 2000). Das Phosphat ist anschließend in hohem Maße pflanzenverfügbar. Zu den vollaufgeschlossenen Düngern gehören Superphosphat, Triple-Superphosphat, Ammoniumphosphate sowie eine Reihe von phosphathaltigen Mehrnährstoffdüngern.

#### Superphosphat und Triple-Superphosphat

Superphosphat (18 Prozent  $P_2O_5$ -Äquivalente) entsteht durch Aufschluss von fein vermahlenem Rohphosphat mit Schwefelsäure. Dabei entstehen in einem ersten Schritt Phosphorsäure und Gips. Die entstandene Phosphorsäure reagiert mit noch nicht umgesetzten Apatitmolekülen zu wasserlöslichem Calciumdihydrogenphosphat.

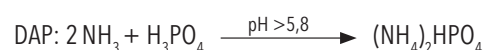
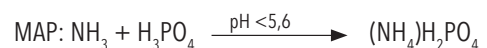


Wird zum Aufschluss des Rohphosphates Phosphorsäure anstelle der Schwefelsäure verwendet, entsteht Triple-Superphosphat (46 Prozent  $P_2O_5$ -Äquivalente). Dabei entsteht ebenfalls hochkonzentriertes Calciumdihydrogenphosphat.



#### Monoammonphosphat (MAP) und Diammonphosphat (DAP)

Ammoniumphosphate sind Mehrnährstoffdünger (NP-Dünger) mit hohem Phosphatanteil. Ammoniumphosphate entstehen durch Neutralisation von Phosphorsäure durch Ammoniak. Bei pH-Werten unter 5,6 entsteht Monoammonphosphat (52 Prozent  $P_2O_5$ -Äquivalente, 11 Prozent N), liegt der pH über 5,8, bildet sich Diammonphosphat (46 Prozent  $P_2O_5$ -Äquivalente, 18 Prozent N).



## 2) Teilaufgeschlossene Dünger

Teilaufgeschlossene Dünger werden mit einem Überschuss an Säure aufgeschlossen. Dabei wird nur ein Teil des Apatits umgesetzt. Phosphat liegt in diesen Düngern als Calciumdihydrogen-, Calciumhydrogen- und Calciumphosphat vor (Schilling 2000). Nur ein bestimmter Teil des Phosphats ist daher unmittelbar wirksam.



TABELLE 6

### Zusammensetzung wichtiger phosphathaltiger Dünger

Produkt	$P_2O_5$ Äquivalent <sup>1</sup> [%]	Weitere Nährstoffe	Vorherrschende P-Verbindung
Triple-Superphosphat	46		$Ca(H_2PO_4)_2$
Monoammonphosphat <sup>1</sup> (NP-Dünger)	52	11 % N	$(NH_4)H_2PO_4$
Diammonphosphat (NP-Dünger)	46	18 % N	$(NH_4)_2HPO_4$
PK-, NP, NPK-Mehrnährstoffdünger	>5	unterschiedlich	$Ca(H_2PO_4)_2$ $Ca(HPO_4)$ $(NH_4)H_2PO_4$ $(NH_4)_2HPO_4$

<sup>1</sup> Umrechnung in Elementform:  $P_2O_5 \times 0,436 = P$

## 5.3 Kalium- und Magnesiumdünger

Kalium ist in Mineraldüngern überwiegend in Form von Kaliumchlorid, in geringerem Umfang auch als Kaliumsulfat enthalten. Kaliumchlorid wird aus Kalium-Rohsalz gewonnen. Große Vorkommen von Kaliumsalzen finden sich in Mitteleuropa (Deutschland) und Osteuropa (Russland, Ukraine, Weißrussland), in Nordamerika (Kanada und USA) sowie in Ostasien (China). Eine Erschöpfung der Kaliumvorkommen ist nicht in Sicht.

Deutschland zählt weltweit zu den führenden Produzenten von Kaliumdüngern und rangiert mit rund zwölf Prozent der Weltproduktion auf Platz 4. Die hiesigen Vorkommen sind vor mehr als 230 Millionen Jahren durch die Verdunstung von Wasser des Zechsteinmeeres entstanden. Dabei kristallisierten Kalium- und Magnesiumsalze neben anderen Salzen aus und

setzten sich am Boden ab. Heute werden Kaliumsalze hierzulande in Tiefen von 400 bis 1 500 Metern bergmännisch abgebaut. Aus dem Kalium-Rohsalz werden für die Düngerproduktion Kaliumchlorid und Magnesiumsulfatmonohydrat (Kieserit) gewonnen. Dazu müssen diese Verbindungen von anderen Salzen und Bestandteilen abgetrennt werden. Zur Trennung kommen drei Produktionsverfahren zum Einsatz:



### Heißverlösung

Zur Herauslösung von Kaliumsalzen aus dem Rohsalz wird eine Salzlösung, die an Stein- und Kaliumsalz (NaCl und KCl) gesättigt ist, erwärmt. Nach der Erwärmung bleibt die Steinsalzlösung gesättigt, das Lösevermögen für Kaliumsalze nimmt jedoch mit der steigenden Temperatur zu. Nun wird der heißen Lösung Rohsalz zugemischt, die Kaliumsalze gehen in Lösung, Steinsalz und Kieserit bleiben als Feststoff ungelöst. Durch Filtern oder Schleudern und Nachklären wird der feste Rückstand abgetrennt. Aus der heißen, klaren Lösung wird dann nach Abkühlung in Vakuumkristallisationsanlagen Kaliumchlorid mit einer Reinheit von bis zu 97 Prozent gewonnen (VKS 2011).

### Flotation – Gewinnung von Kieserit ( $MgSO_4$ )

Das Verfahren beruht darauf, dass die zu trennenden Minerale in einer gesättigten Salzlösung suspendiert werden, in die Luft eingeblasen wird. Durch die Zugabe

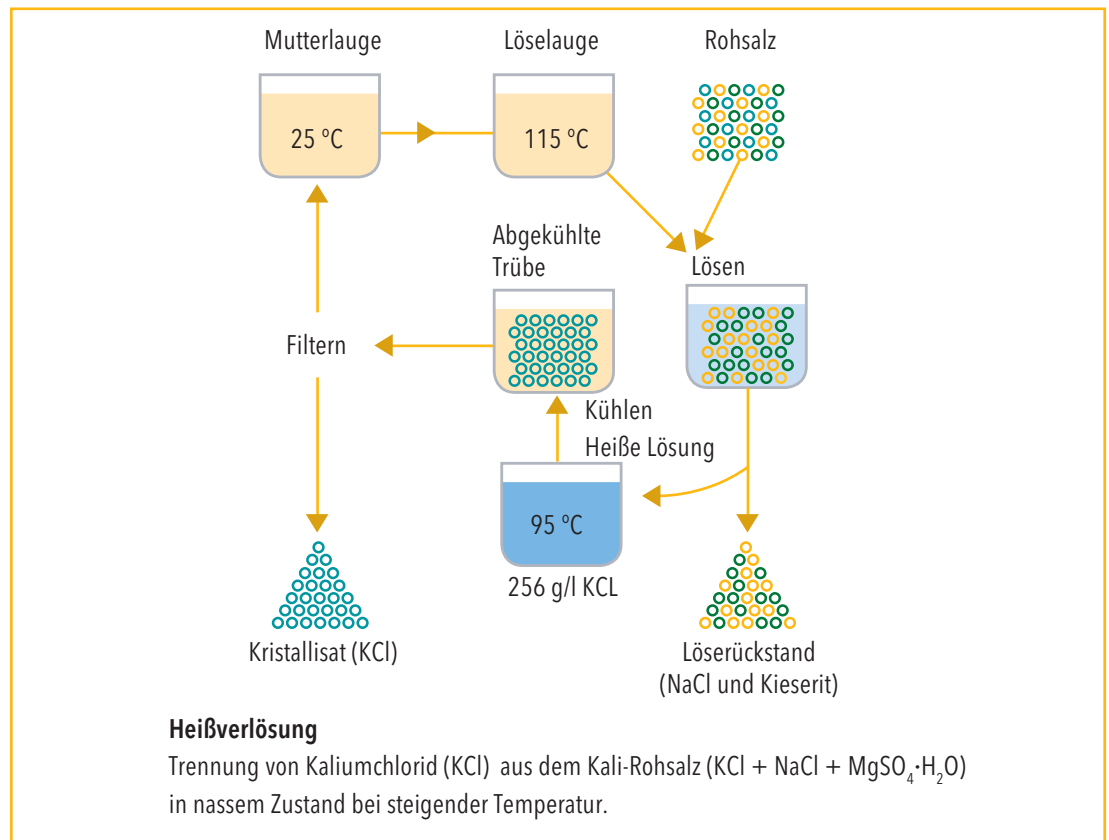
von besonderen, Schaum bildenden Flotationsmitteln lagern sich an die Luftblasen nur gewünschte Mineralstoffe an – in dem Fall das Kieserit. Das abzutrennende Kieserit schwimmt mit dem Schaum oben und kann abgeschöpft werden. Das Steinsalz bleibt am Boden der Flotationszelle zurück (VKS 2011).

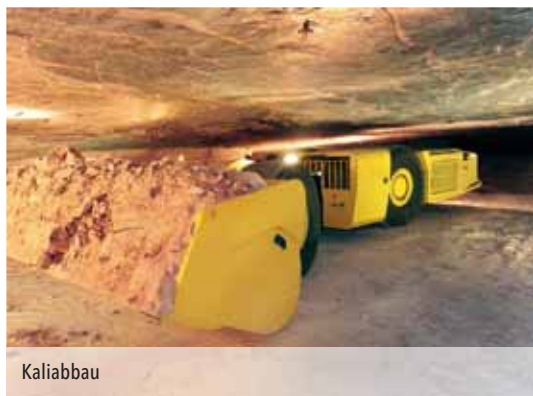
### Elektrostatisches Verfahren

Das Rohsalz wird in eine Korngröße von einem Millimeter aufgemahlen. Im nächsten Schritt werden die Salze mit oberflächenaktiven Substanzen behandelt, so dass sie sich selektiv gegeneinander positiv und negativ aufladen. Danach rieseln die Salzkristalle durch einen „Freifallscheider“. Dieser besteht aus zwei Elektroden, zwischen denen ein elektrisches Hochspannungsfeld besteht. Die unterschiedlich geladenen Salze werden zu Plus- bzw. Minuspol abgelenkt. Unterhalb des Freifallscheiders werden die sortierten Mineralien getrennt aufgefangen (VKS 2011).

ABBILDUNG 17

### Heißverlösung





Kaliabbau

### Wichtige Kalium- und Magnesiumdünger

#### Kaliumchlorid

Kaliumchlorid entsteht unmittelbar aus der Aufbereitung von Kaliumrohsalz. Je nach Reinheit unterscheidet sich der Kaliumgehalt der Dünger. Verbreitete Standarddünger sind Kaliumchlorid mit 40 Prozent und mit 60 Prozent  $K_2O$ -Äquivalent.

#### Kaliumsulfat

Kaliumsulfat mit 50 Prozent  $K_2O$ -Äquivalent und 18 Prozent Schwefel (S) in Form von Sulfat ist ein wichtiger Dünger für chloridempfindliche Kulturpflanzen.

Kaliumsulfat wird in einem zweistufigen Verfahren hergestellt. Dabei wird Kaliumchlorid mit dem bergmännisch gewonnenen Kieserit ( $MgSO_4 \cdot x H_2O$ ) umgesetzt.



#### Magnesiumdünger

Die Magnesiumversorgung der Pflanzen erfolgt überwiegend durch Kalkdünger, Kaliumdünger und Kalkammonsalpeter, die auch Magnesium in Form von Magnesiumcarbonat ( $MgCO_3$ ), Magnesiumoxid (MgO) oder Magnesiumsulfat ( $MgSO_4$ ) enthalten.

Darüber hinaus gibt es spezielle Magnesiumdünger. Am gebräuchlichsten sind die Magnesiumdünger Kieserit (Magnesiumsulfatmonohydrat, 25 Prozent  $MgO$ -Äquivalent, 20 Prozent S) als Bodendünger und Bittersalz (Magnesiumsulfatheptahydrat, 16 Prozent  $MgO$ -Äquivalent, 13 Prozent S) für die Flüssigdüngung. Sie enthalten neben Magnesiumsulfat hohe Anteile an Schwefel.

TABELLE 7

#### Zusammensetzung wichtiger Kalium- und Magnesiumdünger

Produkt	$K_2O$ - Äquivalent <sup>1</sup> [%]	$MgO$ -Äquivalent <sup>2</sup> [%]	Weitere Nährstoffe [%]	Vorherrschende P-Verbindung
Korn-Kali	40	6	4 % S	KCl, $MgSO_4$
60er Kali	60			KCl
Patentkali	30	10	17 % S	$K_2SO_4$ , $MgSO_4$
Kaliumsulfat	50		18 % S	$K_2SO_4$
Kieserit		25	20 % S	$MgSO_4$
Bittersalz		16	13 % S	$MgSO_4$
NK, NPK-Mehrnährstoffdünger	unterschiedlich	unterschiedlich	unterschiedlich	KCl, $K_2SO_4$
Kohlensaurer Magnesiumkalk/Magnesium-Branntkalk	0	5-25	25-40 % CaO	$MgCO_3$ bzw. MgO

<sup>1</sup> Umrechnung in Elementform:  $K_2O \times 0,83 = K$

<sup>2</sup> Umrechnung in Elementform:  $MgO \times 0,6 = Mg$

## 5.4 Schwefel-, Calcium- und Mikronährstoffdünger

### Schwefelhaltige Dünger

Schwefel als Rohstoff wird vorrangig aus natürlich vorkommendem elementarem Schwefel, aus Erdöl und Erdgas sowie aus Metallsulfiden gewonnen. Ein wichtiger Ausgangsstoff vieler schwefelhaltiger Dünger ist Schwefelsäure.

Die Schwefeldüngung erfolgt vorwiegend mit schwefelhaltigen N-, P-, K-, Mg- und Mehrnährstoffdüngern. Da Pflanzen den Schwefel in Form von Sulfat-Ionen ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) aufnehmen, wird der Nährstoff hauptsächlich in sulfatischer Form gedüngt. In vielen Düngern ist Sulfat als begleitendes Anion enthalten. Wasserlösliches Sulfat wie in Ammoniumsulfat, Ammonsulfatsalpeter, Kaliumsulfat und Magnesiumsulfat steht den Pflanzen sofort zur Verfügung. Das Sulfat aus dem Gips ( $\text{CaSO}_4$ ) wird langsam freigesetzt und damit kontinuierlich pflanzenverfügbar. Neben Sulfat-Schwefel wird auch elementarer Schwefel (S) zur Düngung verwendet. Dieser muss feinst vermahlen sein und zusätzlich im Boden erst mikrobiell zu Sulfat oxidiert werden, bevor er von Pflanzen aufgenommen werden kann.



#### LEHRER-INFO

Untersuchung von Düngemitteln auf Sulfate  
*Experiment 14*

### Calcium

Die Calciumversorgung landwirtschaftlicher Kulturen erfolgt in der Regel aus dem Bodenvorrat oder über die Kalkung. Das Calcium liegt in Kalkdüngern in carbonatischer ( $\text{CaCO}_3$ ), oxidischer (CaO) oder silikatischer Bindung ( $\text{CaSiO}_3$ ) vor.

Eine gezielte Düngung mit Calcium kommt nur in Spezialanwendungen, zum Beispiel im Obst- und Gemüseanbau vor. Hier werden meist Flüssigdünger verwendet, die über das Blatt wirken und damit effektiver aufgenommen werden.

### Mikronährstoffe

Die Grundversorgung mit Mikronährstoffen erfolgt heute oftmals über mikronährstoffhaltige Mehrnährstoffdünger oder Nebenbestandteile in Mineraldüngern. Darüber hinaus kommen spezielle Mikronährstoffdünger zur Anwendung. Diese Spezialdünger enthalten hochdosiert einen oder mehrere Mikronährstoffe. Sie werden häufig bei akutem Mangel eingesetzt, meist in Form einer Blattdüngung. Mikronährstoffe liegen in Mineraldüngern meist in Form von Salzen, z. T. auch als Chelate\* vor.

## 5.5 Die Kalkdüngung: ein spezieller Fall

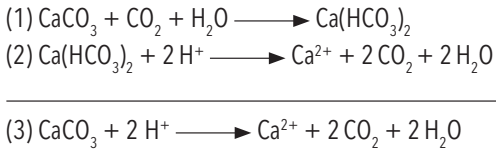
Eine besondere Form der Düngung ist die Kalkdüngung. Sie dient in erster Linie dazu, die natürliche Versauerungstendenz unserer Böden zu unterbinden und damit den pH-Wert des Bodens für das Bodenleben und die Kulturpflanzen zu optimieren (leicht sauer bis neutral). Dies hat positive Wirkungen auf die Bodenfruchtbarkeit, die Bodenstruktur und das Pflanzenwachstum.

Säuren in der Bodenlösung werden neutralisiert, indem die Protonen der Säure ( $\text{H}^+$ -Ionen) mit dem Kalk zu Wasser neutralisiert werden. Nachstehend sind die Neutralisationsreaktionen der wichtigsten Kalkdünger beschrieben.

#### LEHRER-INFO

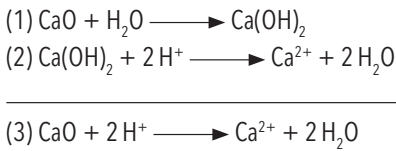
pH-Wert von Bodenproben  
*Experiment 15*

**Carbonatische Kalkdüngung:**



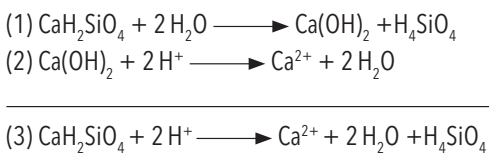
Die Neutralisationswirkung carbonatischer Kalke geht auf die Zwischenstufe des Hydrogencarbonat-Ions ( $\text{HCO}_3^-$ ) zurück. Dieses Ion entsteht durch Reaktion von  $\text{CaCO}_3$  mit dem Bodenwasser und  $\text{CO}_2$ , das aus der Atmung von Bodenorganismen stammt. Calcium- bzw. -Magnesiumcarbonat löst sich in Abhängigkeit von Temperatur und  $\text{CO}_2$ -Gehalt im Bodenwasser.

**Oxidische Kalke, Branntkalk**



CaO ist sehr reaktiv und löst sich spontan im Bodenwasser. Das ist besonders von Vorteil auf Böden mit hohen Ton- und Schluffgehalten (Lehm- und Tonböden). Der pH-Wert steigt nach dem Streuen auf solchen Böden schnell an, und die Bodenstruktur wird stabilisiert.

**Silikatische Kalke**



Die oben angegebenen Reaktionsgleichungen sind eine vereinfachte Beschreibung der Umsetzung dieser Kalke im Boden. Tatsächlich liegt das Calcium- und Magnesiumsilikat in verschiedenen Mineralen vor (Drissen 2004).

**Weitere Funktionen der Kalkdüngung**

Die Kalkdüngung hat neben ihrer Wirkung auf den pH-Wert noch weitere Funktionen, die sich auf die Bodenfruchtbarkeit und das Pflanzenwachstum positiv auswirken:

- **Physikalische Wirkung:** Kalkung verbessert und stabilisiert die Bodenstruktur und sorgt für ein

günstiges Porensystem. Ein gut mit Kalk versorgter Boden hat deshalb einen günstigen Luft-, Wasser- und Nährstoffhaushalt, ist gut durchwurzelbar und widerstandsfähiger gegen Bodenabtrag und Verschlammung.

- **Biologische Wirkung:** Kleinorganismen, wie Bakterien, Milben, Tausendfüßler und vor allem Regenwürmer, sind wichtige Bestandteile des Bodens. Im schwach sauren (pH 6,0 bis 6,8) bis neutralen pH-Bereich (pH-Wert: pH 6,8 bis 7,2) finden diese nützlichen Helfer optimale Lebensbedingungen.
- **Nährstoffwirkung:** Calcium, Magnesium und oft auch Spurennährstoffe.

ABBILDUNG 18

**Kennzeichnung Düngemittel**

**NPK 20 + 7 + 10 (+ 2 + 4)  
mit Magnesium und Schwefel**

EG-DÜNGEMITTEL

**NPK (Mg, S) Dünger 20 + 7 + 10 (+ 2 + 4)**

<b>20 %</b>	<b>N</b>	<b>Gesamtstickstoff</b> 7,7 % N Nitratstickstoff 12,3 % N Ammoniumstickstoff
<b>7 %</b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>neutral-ammoncitratlösliches und wasserlösliches Phosphat</b> 5,2 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> wasserlösliches Phosphat
<b>10 %</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>wasserlösliches Kaliumoxid</b>
<b>2 %</b>	<b>MgO</b>	<b>Gesamt-Magnesiumoxid</b>
<b>4 %</b>	<b>S</b>	<b>wasserlöslicher Schwefel</b>

**Gewicht:** \_\_\_\_\_ **kg netto**

**Hersteller:**  
Muster GmbH & Co. KG • Musterstraße 12 • 34567 Musterhausen

Zu den organischen Düngern gehören Stallmist, Gülle, Jauche, Stroh und andere Pflanzenrückstände. Diese als Wirtschaftsdünger bezeichneten Stoffe werden in den Stoffkreislauf zurückgeführt bzw. integriert. Sie setzen sich aus Harn, Kot und Einstreu zusammen und unterscheiden sich in der Höhe des Wasseranteils und ihrer Nährstoffzusammensetzung. Weitere organische Düngemittel sind Gärreste aus Biogasanlagen (Biogasgülle) und die sogenannten Sekundärrohstoffdünger aus Siedlungsabfällen wie Klärschlamm und Kompost. Darüber hinaus baut der Landwirt gezielt sogenannte Gründüngungspflanzen an, die nicht geerntet sondern in den Boden eingearbeitet werden.

## LEHRER-INFO

Bau einer Biogasanlage  
*Experiment 16*

Organische Dünger enthalten Nährstoffe in relativ geringen und stark schwankenden Konzentrationen. Die Nährstoffe sind zum Teil organisch gebunden und müssen erst im Boden von Mikroorganismen mineralisiert werden, bevor sie für die Pflanzen verfügbar sind. Die genaue Vorhersage, zu welchem Zeitpunkt und in welchem Umfang die organisch gebundenen Nährstoffe freigesetzt werden, ist daher nicht möglich.

### Wirtschaftsdünger

In welchem Umfang Wirtschaftsdünger in einem landwirtschaftlichen Betrieb anfallen, hängt jeweils von der Tierart, der Fütterung und der Anzahl der gehaltenen Tiere ab. In Deutschland werden rund 13 Millionen Rinder, 27 Millionen Schweine und 2,4 Millionen Schafe gehalten. Insgesamt fallen über Kot und Harn rund 1,4 Millionen Tonnen Stickstoff, 0,24 Millionen Tonnen Phosphor und 1,1 Millionen Tonnen Kalium an. Allerdings sind viehhaltende Betriebe oft in bestimmten Regionen konzentriert. Gülle, Jauche und Mist stellen in diesen Gebieten ein Entsorgungsproblem dar. Deshalb kann dort der hohe Anfall an Wirtschaftsdüngern zu einer Überdüngung der Felder führen – mit entsprechenden Folgen für die Umwelt.



### Klärschlamm und Bioabfälle

In Deutschland fallen bei der Abwasserbehandlung rund zwei Millionen Tonnen Klärschlamm als Trockensubstanz an. Knapp 600 000 Tonnen davon wurden im Jahr 2009 auf landwirtschaftliche Flächen aufgebracht, der Rest überwiegend verbrannt und in der Rekultivierung eingesetzt (Statistisches Bundesamt).

Neben Klärschlamm werden auch kompostierte Bioabfälle in der Landwirtschaft eingesetzt. Im Jahr 2009 landeten rund 2,4 Millionen Tonnen Kompost (Frischmasse) auf landwirtschaftlichen Feldern (Statistisches Bundesamt).

Da Klärschlamm und Bioabfälle Schadstoffe wie zum Beispiel Schwermetalle (Cu, Zn, Cd und Pb), organische Schadstoffe (Dioxine, Furane) oder Krankheitserreger (Salmonellen oder Kolibakterien) enthalten können, dürfen sie nicht auf Gemüsegärten und auf Grünland ausgebracht werden.





### Gründüngung

Der Anbau von Leguminosen ist eine Möglichkeit, dem Boden organisch gebundenen Stickstoff zuzuführen. Zur Gründüngung angebaute Leguminosen werden nicht geerntet, sondern in den Boden eingearbeitet. Wie bei allen organischen Düngern lassen sich aber auch bei der Nutzung von Leguminosen die Mineralisierung des fixierten Stickstoffs einerseits und der pflanzliche Bedarf andererseits nicht vollständig zur Deckung bringen. Das Risiko von Auswaschung und gasförmigen Stickstoffverlusten ist deshalb beim Anbau und Umpflügen von Leguminosen erhöht.

#### HINWEIS

Organische Dünger sind Wirtschaftsdünger, Gründüngungspflanzen, Gärreste (Substrate) aus Biogasanlagen und Sekundärrohstoffdünger. Sie werden zur Deckung des Grundbedarfs der Kulturen eingesetzt; die Nährstofffreisetzung ist allerdings nicht hinreichend steuerbar und deshalb zum Teil mit Nährstoffverlusten verbunden, die die bakterielle Oxidation (Nitrifikation) von Ammoniumstickstoff verzögern, indem sie die Enzymaktivität der Nitrosomonas-Bakterien im Boden hemmen. So bleibt der gedüngte Stickstoff länger in der weniger auswaschungsgefährdeten Ammoniumform erhalten.

#### TABELLE 8

Mineraldünger und organische Dünger im Vergleich

	Mineraldünger	Organische Dünger
Zusammensetzung	wählbar, bekannt, gleichbleibend	vorgegeben, unbekannt, veränderlich
Düngerwirkung	sicher	unsicher
Nährstoffdichte	hoch	niedrig
Lager- und Transportfähigkeit	einfach, preiswert	aufwendig
Technologische Eigenschaften	homogen, gut dosierbar, rieselfähig	nicht homogen, neigen zum Entmischen
Verfügbarkeit	Handelsprodukt (Preise saisonal schwankend)	Wirtschaftsprodukt (stets vorhanden, preiswert)

TABELLE 9

Mengen an Stickstoff, Phosphor und Kalium, die im Jahr 2009 in Deutschland in der Landwirtschaft eingesetzt wurden

	Stickstoff in 1000 t N/Jahr	Phosphor in 1000 t P/Jahr	Kalium in 1000 t K/Jahr
Mineraldünger <sup>2</sup>	1.550,6	76,0	148,7
Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft <sup>1</sup>	1.357,0	238,0	1133,9
Kompost <sup>1</sup>	22,0	4,4	13,9
Klärschlamm <sup>1</sup>	23,3	15,4	4,4

<sup>1</sup>IVA-Schätzung auf Basis von Angaben des Statistischen Bundesamtes; Kalenderjahr 2009

<sup>2</sup>Quelle: Statistisches Bundesamt; Düngjahr Juli 2008 bis Juli 2009

## 6.1 Düngung und Ernährung

Regelmäßige Schlagzeilen über vielfältige Belastungen unserer Nahrungsmittel (auch aus der Düngung) führen zu Verunsicherung vieler Menschen in Fragen der Ernährung. Aber sind diese Ängste begründet? Düngemittel bestehen aus Pflanzennährstoffen wie Stickstoff, Phosphor und Kalium, die Pflanzen für ihr Wachstum benötigen und aus denen sie wertvolle Inhaltsstoffe wie Proteine, Kohlenhydrate und Vitamine

aufbauen. Ob diese Nährstoffe aus mineralischen Düngern, Wirtschaftsdüngern oder aus bodenbürtigen Quellen stammen, spielt für die Pflanze keine Rolle. Wichtig ist allein, dass sie ausreichend versorgt wird. Mangelernährte Pflanzen wachsen nicht optimal und bilden auch deutlich weniger Inhaltsstoffe aus.

Es ist also gerade das Ziel der Düngung, dass Pflanzen einen möglichst hohen Anteil des ausgestreuten Düngemittels aufnehmen, dadurch Verbindungen wie Proteine oder Fette aufbauen können und so zu einer gesunden Ernährung beitragen.



### LEHRER-INFO

Untersuchung des Nitratgehalts von Gemüse und Obst  
*Experiment 17*

### Gutes Gemüse – böses Nitrat?

Weithin gilt Nitrat als gesundheitsschädlich, weil es im Organismus in krebserregendes Nitrosamin umgewandelt werden kann. Obwohl in zahlreichen Studien bislang kein Zusammenhang zwischen der Höhe der Nitrataufnahme und der Häufigkeit von Krebserkrankungen festgestellt wurde, steht der Verdacht weiterhin im Raum.

Im Sinne eines vorbeugenden Verbraucherschutzes wurden daher Höchstgehalte für Nitrat im Trinkwasser und in Gemüse und Salat festgelegt, die mit hohen Sicherheitsfaktoren versehen sind. Diätetische Lebensmittel für Säuglinge und Kleinkinder müssen besonders niedrige Grenzwerte einhalten.

Die größte Menge an Nitrat (ca. 70 bis 80 Prozent der Gesamtaufnahme) nehmen wir mit Gemüse auf. Nach Einschätzung des Bundesinstituts für Risikobewertung (BfR) darf das jedoch nicht zu einer Einschränkung des Verzehrs von Gemüse und Salat führen. Der Nutzen

eines hohen Anteils von Gemüse in der Nahrung überwiegt das potenzielle Risiko leicht erhöhter Nitrat- und Nitritgehalte um ein Vielfaches.

Einige Neubewertungen des Nahrungsnitrates kommen aus der jüngeren Forschung. Wissenschaftler der Kyorin University School of Medicine (Japan) und des Karolinska-Instituts in Stockholm (Schweden) fanden 2009 heraus, dass der diastolische Blutdruck durch eine erhöhte Aufnahme von nitratreichen Lebensmitteln sinkt.

Durch Speichel erzeugtes Nitrit aus Nahrungsnitrat zeigt eine antimikrobielle Wirkung. Dies belegen Wissenschaftler der University of Aberdeen (UK) in einer in vitro-Studie (1996). Außerdem gibt es Hinweise, dass Nitrat die sportliche Leistungsfähigkeit erhöht (Lansley et al. 2011).



Etwa die Hälfte (fast 17 Millionen Hektar) der Fläche Deutschlands wird landwirtschaftlich genutzt. Was hierzulande auf den Feldern und in den Ställen erzeugt wird, füllt das ganze Jahr über die Regale in den Supermärkten. Niemals zuvor konnten die Bürger in Deutschland und in anderen Industrienationen aus einer solchen Fülle an hochwertigen und gesunden Lebensmitteln wählen. Die Landwirtschaft in Deutschland hat ihre Produktion in den letzten 60 Jahren enorm gesteigert. Noch im Jahr 1900 produzierte ein Landwirt gerade genug Nahrung, um vier Menschen ernähren zu können. Um 1950 waren es zehn, 2006 bereits 127, und heute sind es mehr als 130 Menschen, mit steigender Tendenz (DBV 2008).

Damit einher gingen auch negative Auswirkungen auf die Umwelt, etwa Treibhausgas-Emissionen, Bodenerosion und -verdichtung sowie Nährstoffeinträge in Flüsse, Seen und Grundwasser. Diese werden in der Öffentlichkeit intensiv diskutiert. Doch kaum jemand hinterfragt, wie unsere heutige Nahrungssicherheit gewährleistet wird.

Dabei führt der global zunehmende Bedarf an Nahrungsmitteln und Bioenergie bei gleichzeitig niedrigen Weltgetreidevorräten und gestiegenen Lebensmittelpreisen heute zu einer Neubewertung von Intensitäten, gerade auch im Pflanzenbau. Denn wenn die Landwirtschaft immer mehr Nahrungsmittel auf den begrenzten Ackerflächen erzeugen muss und keine weiteren natürlichen Ökosysteme in Ackerland umgewandelt werden sollen, kann dies nur durch eine Erhöhung der Erträge auf den vorhandenen Ackerflächen gelingen.

In vielen Industrieländern steht zudem inzwischen die Nahrungsmittelproduktion auf landwirtschaftlichen Nutzflächen in Konkurrenz mit dem Anbau von Energiepflanzen. 2011 wuchsen in Deutschland bereits auf rund 2 Millionen Hektar Raps, Mais und Getreide, die zur Erzeugung von Biodiesel, Biogas oder Bioethanol verwendet werden (FNR 2012).

Das Resultat: Ackerflächen sind knapp und ihr Preis steigt. Immer mehr ausländische Investoren erwerben zu Spekulationszwecken großflächig Agrarland in Entwicklungs- und Schwellenländern. Besonders bedenklich ist auch, dass weltweit in teilweise erheblichem Umfang Wälder

und andere wertvolle Ökosysteme in Ackerflächen umgewandelt werden.

Für die Landwirtschaft stellt sich also die Herausforderung, die knappe Ressource Ackerland möglichst effizient und umweltschonend zu nutzen und gleichzeitig die Versorgung mit hochwertigen Lebensmitteln und nachwachsenden Rohstoffen zu sichern.

Der Einsatz von Düngern nach guter fachlicher Praxis bietet die Möglichkeit, beiden Zielen Rechnung zu tragen.

## LEHRER-INFO

Düngen ja oder nein? Ein Rollenspiel  
Arbeitsblatt 5



## 7.1 Nährstoffverluste

Trotz bedarfsgerechter Düngung und eines sachgerechten Einsatzes von Düngemitteln können Nährstoffverluste nicht vollständig vermieden werden (s. Kap. 3.4).

## HINWEIS

### Eutrophierung von Gewässern

Unter Eutrophierung versteht man allgemein die Anreicherung von Nährstoffen in Böden und Gewässern.

Gewässer eutrophieren, wenn zu große Mengen Phosphat oder Nitrat eingetragen werden. Die Nährstoffeinträge führen dann zu einem vermehrten Algenwachstum. Dadurch trübt sich das Wasser, so dass nur noch die Algen in der oberflächennahen Wasserschicht genügend Licht für die Fotosynthese bekommen. Die Algen in tieferen Gewässerschichten hingegen sterben ab und werden zersetzt. Dabei wird viel Sauerstoff verbraucht. Mit der Verringerung des Sauerstoffgehalts laufen die Abbauprozesse zunehmend als Fäulnis ohne Sauerstoff ab. Es kommt zur Bildung giftiger Stoffe wie Schwefelwasserstoff und Ammoniak. Die immer lebensfeindlicheren Bedingungen führen dazu, dass immer mehr Organismen absterben: das Gewässer „kippt um“.

Stehende Gewässer sind stärker von Eutrophierung betroffen als Fließgewässer, da bei Flüssen über den ständigen Zustrom neues, sauerstoffreicheres Wasser herangeführt wird und durch die Strömung eine vertikale Durchmischung der Wasserschichten erfolgt. Hauptursache für Eutrophierung ist in Binnengewässern Phosphor, in Meeren hingegen Stickstoff (Galler 1999).

### Phosphat und Gewässereutrophierung

Phosphat ist eine der wichtigsten Ursachen der Eutrophierung von Binnengewässern. Etwa die Hälfte der Gesamteinträge in Gewässer stammt aus der Landwirtschaft und gelangt vor allem durch Abschwemmung von Bodenmaterial (Bodenerosion) und Düngern (Oberflächenabfluss) nach starken Niederschlägen in die Oberflächengewässer. Ein weiterer wichtiger Eintragungspfad sind Kläranlagen. Phosphatauswaschung in das Grundwasser hingegen spielt auf den meisten Standorten keine Rolle. Grund ist die relativ feste Bindung des Phosphats an Bodenpartikel (s. Kap. 3.4).

Landwirtschaftlich bedingte Phosphatprobleme in Gewässern treten heute vor allem in Regionen auf, in denen sich Tierhaltung konzentriert. Durch Überdüngung insbesondere mit der phosphatreichen Schweinegülle

können Böden stark mit Phosphat angereichert sein. Um den Phosphateintrag in Gewässer zu minimieren, müssen vorrangig der Bodenabtrag und der Oberflächenabfluss verhindert werden. Flächen in Hanglage werden daher nicht in Zeiten gedüngt, in denen die Gefahr einer Abschwemmung besteht. Außerdem können durch reduzierte Bodenbearbeitung (pfluglos), durch Begrünung, durch Bodenbearbeitung quer zum Hang und durch begrünte Uferrandstreifen Erosion und Abschwemmung in Gewässer vermieden werden.

### Stickstoffauswaschung in das Grundwasser und in Oberflächengewässer

Nitrat ist mit dem Bodenwasser leicht beweglich (s. Kap. 3.4). Es kann daher mit dem Sickerwasser aus dem Oberboden in tiefere Bodenschichten und weiter in das Grundwasser verlagert werden. Über den Grundwasserpfad und über Drainagen gelangt Nitrat schließlich in Oberflächengewässer. Auf geneigten Flächen kann Stickstoff auch nach Niederschlägen durch Abschwemmung von Bodenmaterial (Bodenerosion) und Düngern direkt in unmittelbar angrenzende Oberflächengewässer und über Flüsse in Meere eingetragen werden.

Der Stickstoffeintrag in das Grundwasser und in Oberflächengewässer hat negative Auswirkungen auf die Umwelt:

- ⊞ Eutrophierung von Oberflächengewässern
- ⊞ Erhöhte gasförmige Stickstoffverluste
- ⊞ Erhöhte Nitratwerte im Trinkwasser bzw. erhöhte Kosten für die Trinkwasseraufbereitung

Nitratauswaschung ist unter mitteleuropäischen Bedingungen vor allem über das Winterhalbjahr von Bedeutung. Das hat zwei Ursachen: Zum einen nehmen Pflanzen in dieser Zeit kaum Stickstoff auf, zum anderen bildet sich in dieser Zeit im Boden vermehrt Sickerwasser, das das darin gelöste Nitrat in Richtung Grundwasser verlagert. Wie viel Nitrat ausgewaschen wird, hängt vor allem von der im Boden vorhandenen Menge an Nitratstickstoff zu Beginn der Sickerwasserbildung im Spätherbst ab.

Wichtigste Maßnahme zur Minimierung der Nitratverlagerung ist daher die Optimierung der Stickstoffdüngung. Denn wenn die Kulturen bedarfsgerecht mit

Stickstoff gedüngt werden, hinterlassen sie nach der Ernte im Herbst nur sehr geringe Mengen an Nitrat im Boden. Dagegen können die Pflanzen bei überhöhter Stickstoffdüngung den zu viel gedüngten Stickstoff nicht mehr aufnehmen, so dass entsprechend mehr „Restnitrat“ im Boden verbleibt und ausgewaschen werden kann. Viele Versuche zeigen sogar, dass die Nitratrestmengen nach der Ernte bei einer ordnungsgemäßen N-Düngung kaum höher liegen als bei einer überhaupt nicht mit Stickstoff gedüngten Vergleichsvariante.

Eine weitere wirkungsvolle Maßnahme, um die Auswaschung gering zu halten, ist eine möglichst langandauernde Bodenbedeckung, zum Beispiel durch den Anbau von Zwischenfrüchten.

#### Ammoniakverflüchtigung

Über 90 Prozent der Ammoniakemissionen in Deutschland stammen aus der Landwirtschaft und zwar ganz überwiegend aus der Tierhaltung und aus den Wirtschaftsdüngern. Etwa 18 Prozent entfallen auf Mineraldünger.

Der größte Teil des Ammoniaks wird in der Atmosphäre schnell zu Ammonium-Ionen beziehungsweise Ammoniumsalzen umgesetzt. Diese Verbindungen werden zum Teil über größere Entfernungen transportiert. Sie gelangen schließlich überwiegend durch Niederschläge zurück auf die Erdoberfläche. In der Nähe des Emittenten, zum Beispiel einer Tierhaltungsanlage, kann hingegen die Verbreitung auf trockenem Wege durch den Staub überwiegen.

Ammoniak beziehungsweise die Verbreitung von Ammoniumverbindungen ist an folgenden wichtigen Prozessen beteiligt:

○ Versauerung von Böden durch den Eintrag von Ammonium-Ionen.

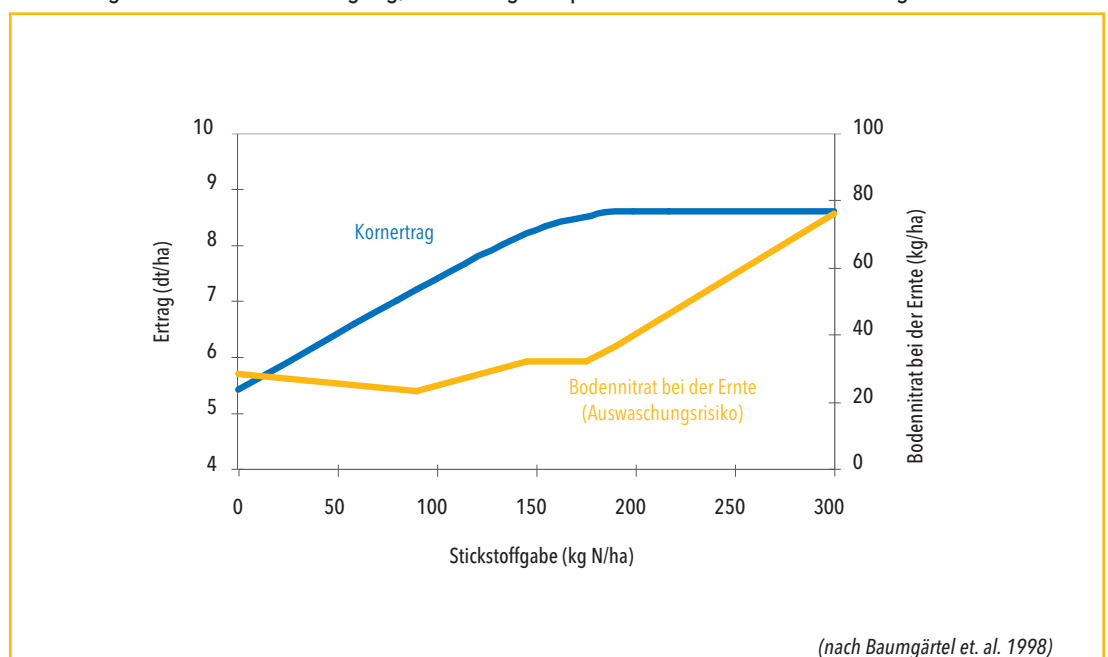
Hierfür sind vor allem zwei Prozesse verantwortlich.

(1) Bei der Aufnahme von Ammonium-Ionen geben Pflanzen Protonen ( $H^+$ ) an die Bodenlösung ab.

(2) Bei der Nitrifikation, also der Umwandlung von Ammonium- zu Nitrat-Ionen werden Protonen freigesetzt. In Deutschland gehen fast 40 Prozent der Immissionen an Säurebildnern auf den Eintrag von Ammonium-Ionen

ABBILDUNG 19

Beziehung zwischen Stickstoffdüngung, Ernteertrag und potentieller Stickstoffauswaschung



zurück (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2004). Eine Folge von Versauerung sind zum Beispiel Waldschäden.

Stickstoffeintrag in Oberflächengewässer und naturbelassene, nährstoffarme Landökosysteme (Eutrophierung).

Neben der zuvor beschriebenen Gewässereutrophierung werden auf dem Land Pflanzenarten verdrängt, die an nährstoffarme (magerere) Bedingungen angepasst sind. Häufig handelt es sich um seltene und vom Aussterben bedrohte Arten.

Direkte Schädigungen an Pflanzenbeständen und Wäldern durch Ammoniak bei höheren Konzentrationen.

Indirekte klimaschädigende Wirkung. Etwa zwei Prozent des eingetragenen Ammoniaks werden in das Treibhausgas Lachgas (N<sub>2</sub>O) umgewandelt.

Ammoniakemissionen entstehen in höherem Umfang beim Abbau der im Kot und im Harn enthaltenen Stickstoffverbindungen mit Hilfe von Enzymen. Der größte Teil davon stammt aus dem im Urin ausgeschiedenen Harnstoff. Bei Geflügel ist es die im Kot enthaltene Harnsäure.

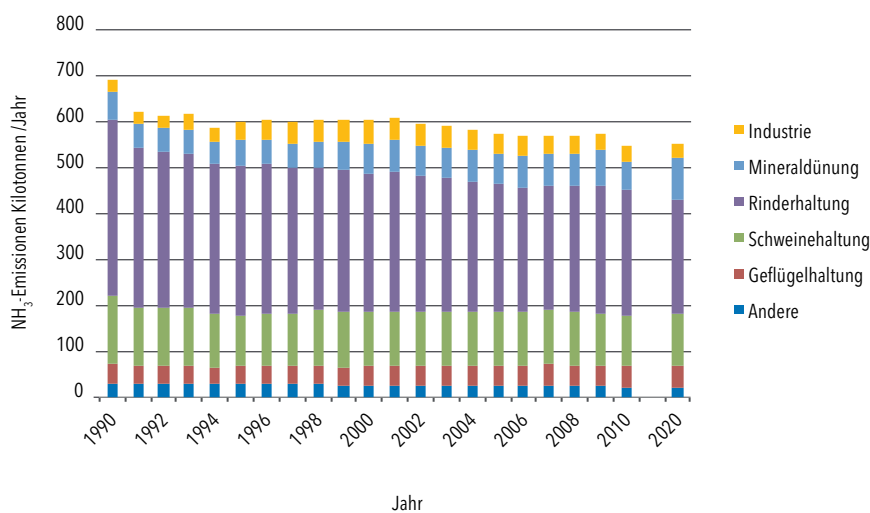


Die Verflüchtigung des Ammoniaks beginnt unmittelbar nach der Ausscheidung von Kot oder Urin. Sie setzt sich während der Lagerung und Ausbringung dieser organischen Dünger fort.

Auch bei der Anwendung von Mineraldüngern kann Ammoniak entweichen. Unterschiede gibt es zwischen den verschiedenen Düngertypen: Insbesondere Harnstoff besitzt ein höheres Potenzial zur Emission von Ammoniak. Harnstoff wird im Boden durch Hydrolyse mit Hilfe des Enzyms Urease zunächst zu Ammoniak und Kohlendioxid umgesetzt. Dabei wird der pH-Wert in der Umgebung des Düngergranulats stark erhöht, was die Ammoniakfreisetzung begünstigt. Neben dem pH-Wert des Bodens hängt die Höhe der Ammoniakfreisetzung von der Bodentemperatur und -feuchte, der Sorptionsfähigkeit und der Bodenbedeckung ab (aid 2003).

ABBILDUNG 20

### Trend der Ammoniakemissionen in Deutschland



(nach H. Döhler KTBL)

Eine wichtige Maßnahme zur Verminderung der Ammoniakemissionen ist die rasche Einarbeitung von Wirtschaftsdüngern in den Boden. Das gebildete Ammoniak wird so im Bodenwasser gelöst und als Ammonium-Ion an Bodenpartikel sorbiert.

#### Stickstoffverluste in Form von Lachgas ( $N_2O$ )

Lachgas ist ein Spurengas mit starker Klimawirkung. So ist eine Tonne Lachgas so klimaschädlich wie 296 Tonnen Kohlenstoffdioxid. Darüber hinaus schädigt Lachgas die Ozonschicht.

Lachgas hat einen Anteil an den globalen Treibhausgasemissionen von etwa sechs Prozent. Diese Größenordnung trifft auch für Deutschland zu. Hierzulande stammen etwa 60 Prozent der Lachgasemissionen aus der Landwirtschaft. Über 90 Prozent davon gehen auf Stickstoffumsätze in Böden zurück. Stickstoffzufuhr über Wirtschaftsdünger, Kot und Harn weidender Tiere, Mineraldünger oder stickstoffbindende Leguminosen, wie zum



Einrichtungen zur Probenahme von Lachgasemissionen auf einem Versuchsfeld

Beispiel Klee, erhöht daher die Lachgasemissionen aus landwirtschaftlichen Böden. Ein kleiner Teil entsteht bei der Lagerung von Wirtschaftsdüngern.

Lachgas wird im Boden und in tierischen Ausscheidungen durch mikrobielle Vorgänge freigesetzt: Die bedeutendsten Prozesse sind die Denitrifikation und, in geringerem Umfang, die Nitrifikation (s. Kap. 3.4).

Die wichtigste Maßnahme zur Verminderung der  $N_2O$ -Emissionen aus Böden ist die präzise und bedarfsgerechte Düngung (s. Kap. 4.2 und 4.3). Darüber hinaus kann der Zusatz von Nitrifikationsinhibitoren die Emissionen verringern (s. Kap. 5.1)

#### HINWEIS

Nährstoffverluste in Form von Nitratauswaschung, gasförmigen Stickstoffverlusten und Phosphateinträgen in Gewässer führen zu Umweltbelastungen. Folgen können sein: Versauerung von Böden, Eutrophierung von Gewässern und Landökosystemen, Trinkwasserbelastung sowie Bildung von Treibhausgasen.

## 7.2 Mineraldüngung und Ressourcenverbrauch: Rohstoffe, Fläche, Energie

Für die Mineraldüngerproduktion werden natürliche Rohstoffe wie Phosphate und Kaliumsalze in Lagerstätten abgebaut und fossile Energie aufgewendet. Diese Ressourcen sind endlich, vor allem bei Erdöl und Erdgas ist die Reichweite begrenzt. Auf der anderen Seite werden durch den Einsatz von Mineraldüngern Erträge gesteigert. Das spart Fläche und erhöht die erzeugte Menge an „pflanzlichem Rohstoff“, der zur Ernährung, zur Energiegewinnung oder für technische Zwecke direkt verwendet oder weiterverarbeitet wird.

### Phosphat – wie begrenzt sind die Vorräte?

Von den aus natürlichen Lagerstätten gewonnenen Rohstoffen für die Düngerproduktion wurde in der Vergangenheit vor allem das Vorkommen an Phosphat als begrenzt angesehen. Dieses Bild hat sich durch die Neubewertung der Rohstoffvorkommen in Marokko und der Westsahara deutlich geändert. Danach lagen die weltweit gut erkundeten und wirtschaftlich gewinnbaren Phosphatvorkommen – die sogenannten „Reserven“ – im Jahr 2010 bei 65 Milliarden Tonnen Phosphatgestein. Im gleichen Jahr wurden 176 Millionen Tonnen im Bergbau gefördert. Legt man diese Fördermenge zugrunde, wären die Phosphatreserven in knapp 370 Jahren verbraucht (U.S. Geological Survey 2011). Noch im Jahr 2005 ging man von einer Reichweite von lediglich 115 Jahren aus, da die Weltreserven mit lediglich 16,9 Milliarden Tonnen Phosphatgestein angenommen wurden (Fördermenge in 2005: 147 Mio. Tonnen, BGR-Datenbank). Diese Kalkulation – auch als statische Reichweite bezeichnet – berücksichtigt allerdings nicht die Vorkommen, die unter den heutigen Rahmenbedingungen technisch oder wirtschaftlich noch nicht abbaubar sind. Darüber hinaus geht man von Phosphatvorkommen aus, die bislang nicht nachgewiesen wurden. Andererseits wird sich auch die geförderte Rohphosphatmenge ändern.

Generell ist ein sparsamer Umgang mit endlichen Rohstoffen geboten. Die Weiterentwicklung von Technologien zur Rückgewinnung von Phosphat aus Klärschlämmen ist dabei ein wichtiger Ansatz, um die natürlichen Phosphatvorkommen zu entlasten. Damit würde sich die Reichweite weiter erhöhen.

### Mineraldüngung spart Fläche

Landwirtschaftliche Fläche ist knapp. Nur ein kleiner Teil der festen Erdoberfläche ist überhaupt für die Landwirtschaft und damit für die Erzeugung von Lebensmitteln geeignet. Diese Eignung nimmt von fruchtbaren Ackerstandorten über trockene Steppen bis hin zu Wüsten und Gebirgen immer weiter ab. Weltweit gehen von den vorhandenen landwirtschaftlich nutzbaren Flächen jedes Jahr riesige Areale durch Versalzung, Versteppung, Erosion und Versiegelung verloren. Andererseits werden in Entwicklungs- und Schwellenländern bis heute natürliche und naturnahe Ökosysteme wie etwa Regenwälder in landwirtschaftliche Nutzflächen umgewandelt.

#### HINWEIS

Die pro Mensch für die Erzeugung von Nahrung und Rohstoffen verfügbare Nutzfläche wird von derzeit 2 100 m<sup>2</sup> bis zum Jahr 2050 auf rund 1 800 m<sup>2</sup> zurückgehen! (nach FCI 2011)





### Welchen Einfluss hat nun die Düngung auf den Flächenverbrauch?

Nicht nur in Deutschland und Europa, sondern auch global ist die Ausdehnung landwirtschaftlicher Flächen begrenzt. Die Flächen, die derzeit noch als potenzielle Nutzflächen gelten, haben häufig einen großen ökologischen Wert und sollten möglichst nicht zur landwirtschaftlichen Nutzung herangezogen werden. Es handelt sich dabei um verbliebene Reste des tropischen Regenwalds und andere naturnahe Ökosysteme wie Wälder, Moore, Grünland und Steppenregionen. Die Umwandlung solcher Ökosysteme in Ackerland führt neben dem Verlust an Biodiversität unter anderem zu einem enorm hohen zusätzlichen Ausstoß an klimaschädlichem  $\text{CO}_2$  (s. Kapitel 7.3).

Ertragssteigerung wirkt also der Ackerflächenausdehnung entgegen. Ein Zusammenhang, der häufig auch beim Vergleich zwischen konventionellem und ökologischem Landbau diskutiert wird. Weil Ökolandbau auf die Anwendung von leicht löslichen Mineraldüngern und synthetischen Pflanzenschutzmitteln verzichtet, sind die Erträge deutlich geringer als beim konventionellen Landbau. Erntet ein konventioneller Landwirt hierzulande auf einem Hektar zwischen 70 und 80 Dezitonnen Winterweizen, so kommt der Ökobauer auf etwa die Hälfte.

#### LEHRER-INFO

Entwicklung der Ressourcen zur Nahrungsmittelproduktion  
*Arbeitsblatt 6*

**Effizienz der Landnutzung**

Für die beispielhaften Kulturen Weizen und Kartoffeln weist die Statistik des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz folgende Erträge aus (BMELV, 2010a):

	Ökologisch wirtschaftende Haupterwerbsbetriebe	Konventionell wirtschaftende Vergleichsbetriebe
Winterweizen	34 dt/ha	78 dt/ha
Kartoffeln	217 dt/ha	289 dt/ha
Gesamterntemengen 2010 in Deutschland (nach BMELV 2010b u. 2010c)		
Winterweizen	23 586 000 Tonnen	
Kartoffeln	9 503 500 Tonnen	
Rechnerisch erforderliche Fläche bei den angegebenen Erträgen/ha zur Erzeugung der Gesamterntemengen 2010:		
	Ökologische Wirtschaftsform	Konventionelle Wirtschaftsform
Winterweizen	6,937 Mio. ha	3,023 Mio. ha
Kartoffeln	0,438 Mio. ha	0,244 Mio. ha

Von den knapp 11,8 Millionen Hektar Ackerland in Deutschland würden bei Ökolandbau 62,5 Prozent allein für die Erzeugung von Weizen und Kartoffeln benötigt. Bei konventionellen Betrieben sind nur 27,7 Prozent der Ackerfläche erforderlich.

Während bei flächendeckendem Ökolandbau also nur 37,5 Prozent der Ackerfläche verfügbar wären, um andere Kulturen wie Mais, Raps, Zuckerrüben oder Gemüse anzubauen, wären dies im konventionellen Anbau noch 72,3 Prozent.



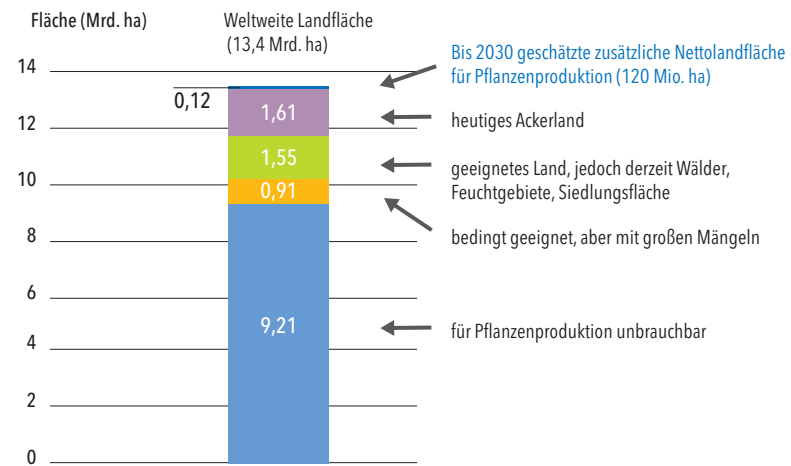
### Energiebilanz der Mineraldüngung

Die Fotosynthese der grünen Pflanzen ist das eigentliche Geheimnis, warum der Pflanzenbau der einzige Wirtschaftszweig ist, welcher während der Produktion mehr Energie erzeugt, als er verbraucht.

Das wird deutlich, wenn die insgesamt eingesetzte Energie mit der Energie im Erntegut (=Energieertrag) verglichen wird. Solche Vergleiche zeigen, dass durch den Einsatz von Mineraldüngern die Ertragsbildung optimiert und der maximale Energiegewinn (=Energieertrag - Energieverbrauch) erzielt wird.

ABBILDUNG 21

### Die globale Herausforderung: Ackerland ist begrenzt

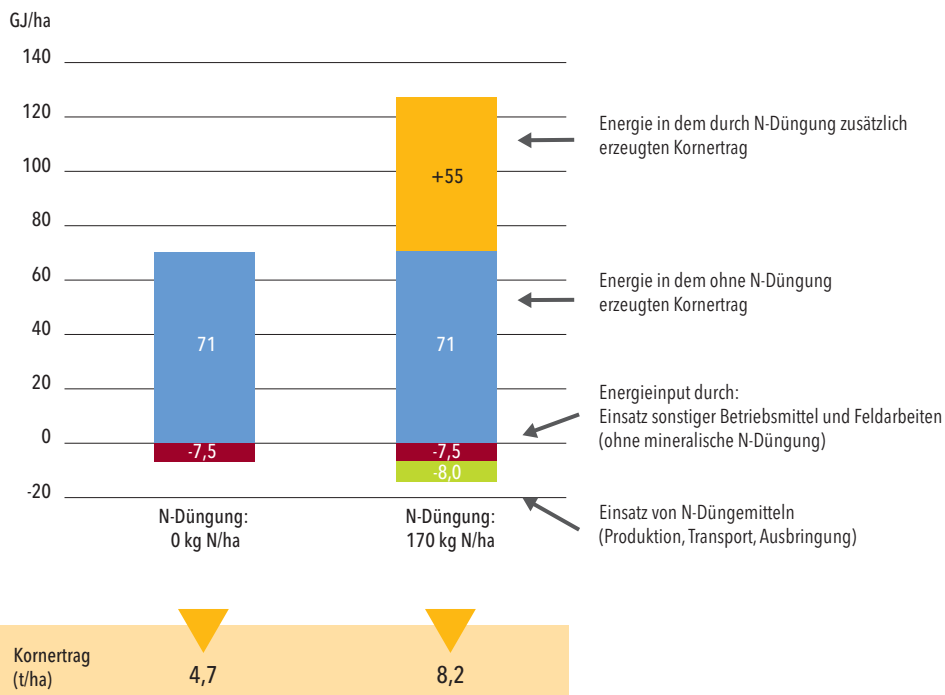


Die 120 Mio. ha zusätzliches Ackerland liegen in Brasilien und in Afrika südlich der Sahara

Quelle: FAO (2003) World Agriculture: Towards 2015/2030



Energieproduktion auf 1 ha Weizen (Kornertrag)



Quelle: Daten von Küsters und Lammel 1999



Beispiel: Energiegewinn durch Stickstoffdüngung bei Weizen

- Bei einer Düngung von 170 Kilogramm Stickstoff wurden 8,2 Tonnen Weizen pro Hektar geerntet, ohne N-Düngung dagegen nur 4,7 Tonnen/Hektar.
- In 8,2 Tonnen Weizen sind 126 GJ Energie gebunden; in 4,7 Tonnen Weizen dagegen nur 71 GJ.
- Durch den Einsatz von Düngemitteln wurden also 55 GJ Energie/Hektar zusätzlich gebunden. Das ist mehr als das 6-Fache der Energie, die für Produktion, Transport und Ausbringung des N-Düngemittels eingesetzt wurde.

### 7.3 Mineraldüngung, Treibhausgase, Klimawandel

Die Ernährung der wachsenden Weltbevölkerung gehört zu den großen Leistungen der Landwirtschaft. Andererseits werden bei der landwirtschaftlichen Produktion die klimaschädlichen Gase Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>) und Lachgas (N<sub>2</sub>O) freigesetzt. Ziel der Landwirtschaft ist es, den steigenden Bedarf an Nahrungsmitteln mit möglichst geringen Treibhausgasemissionen zu erzeugen.

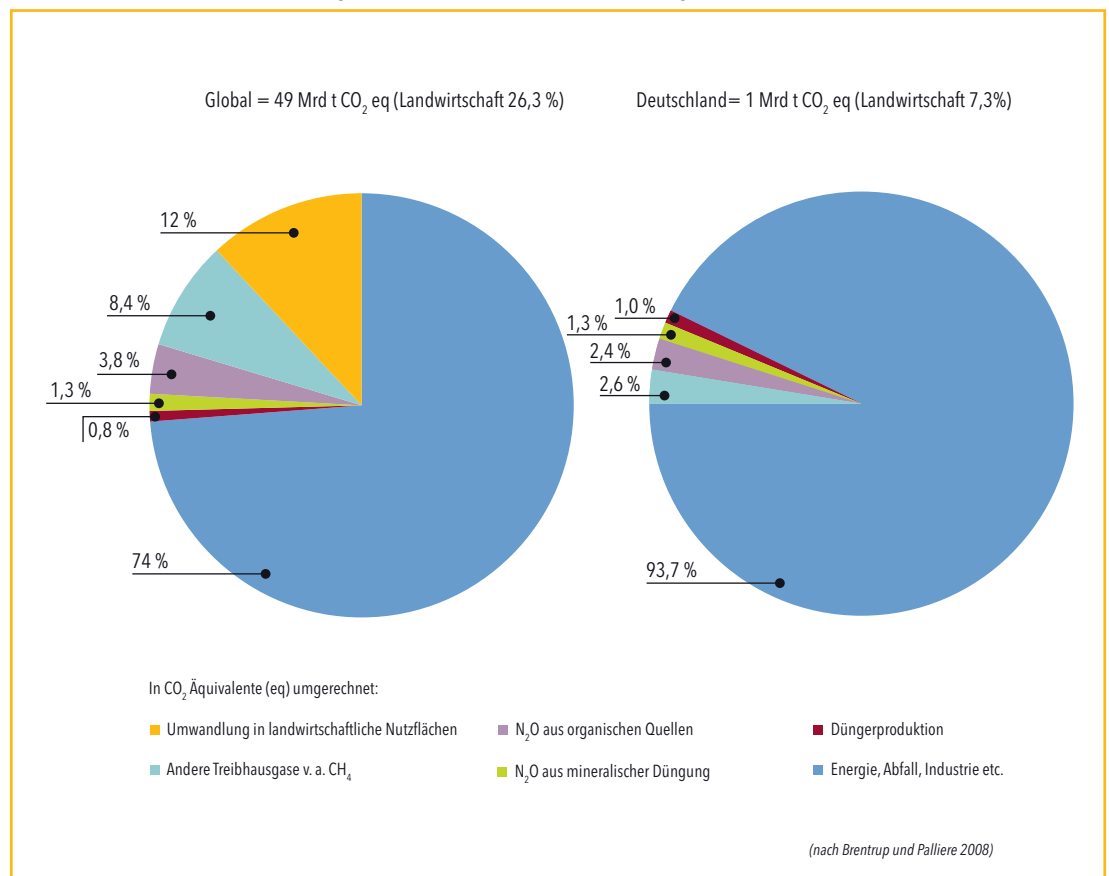
Nach der auf dem Kyoto-Protokoll basierenden Erfassungsmethodik für Treibhausgasemissionen lag der Anteil des Sektors Landwirtschaft an den globalen Emissionen im Jahr 2009 bei 13,5 Prozent. In Deutschland waren es 6,4 Prozent. Hierbei handelt es sich vor allem

um Methanemissionen aus der Tierhaltung und Lachgasemissionen, die bei der Umsetzung von Stickstoff in landwirtschaftlichen Böden entstehen. Nicht berücksichtigt werden bei dieser Zuordnung Emissionen, die zum Beispiel durch den Energieverbrauch auf landwirtschaftlichen Betrieben oder bei der Produktion von Mineraldüngern und anderen Betriebsmitteln freigesetzt werden.

Mineralische Stickstoffdünger, organische Dünger oder Leguminosen wie Klee erhöhen die Lachgasemissionen aus landwirtschaftlichen Böden. Die Anwendung von mineralischen Stickstoffdüngern hat einen Anteil von 1,0 bis 1,3 Prozent des deutschen Treibhausgasausstoßes. Hinzu kommen Emissionen bei deren Produktion im In- und Ausland. Sie entsprechen etwa einem Prozent der Treibhausgasemissionen in Deutschland.

ABBILDUNG 23

Anteil der Landwirtschaft an den globalen Emissionen von Treibhausgasen



**HINWEIS**

Aus Sicht des Klimaschutzes ist eine intensive Landwirtschaft mit bedarfsgerechter Düngung auf den bereits jetzt genutzten Flächen deutlich vorteilhafter als eine Extensivierung mit einer entsprechenden Ausdehnung der Anbauflächen.

**Ackerflächen effizient nutzen und Treibhausgasemissionen gering halten**

Laut FAO (Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen) wird der Bedarf an Nahrungsmitteln zwischen 2009 und 2050 um 70 Prozent zunehmen (s. Kap. 8). Um den steigenden Bedarf zu decken, müssen

- entweder die Erträge auf den vorhandenen Flächen erhöht werden
- oder die Ackerflächen deutlich ausgedehnt werden.

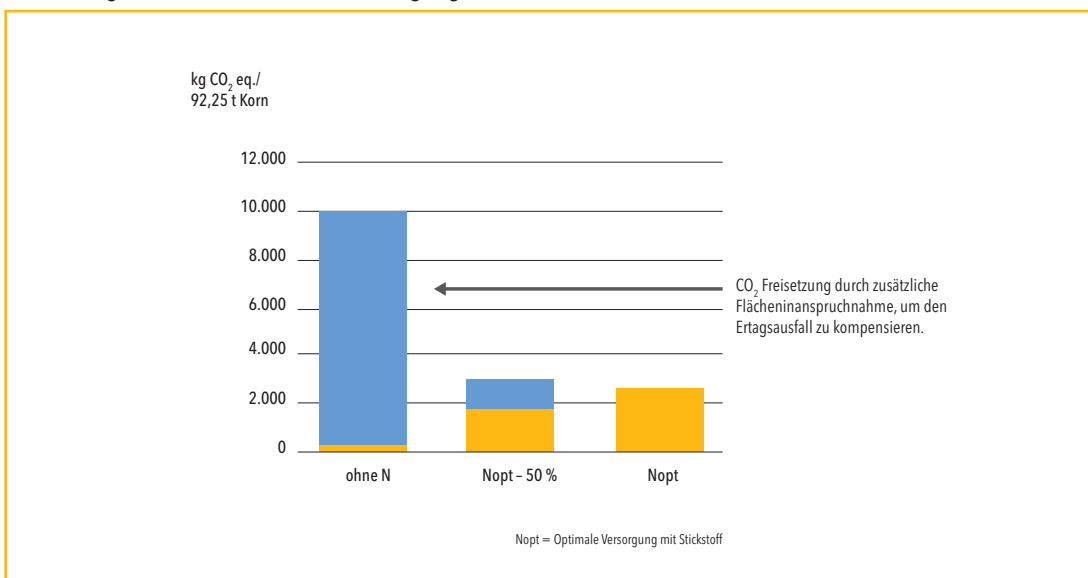
Die erforderliche Erhöhung der Flächenerträge ist nur durch moderne Anbauverfahren mit einer optimierten Düngung möglich. Bei Extensivierung müssten aufgrund der niedrigen Erträge deutlich mehr bisher nicht landwirtschaftlich genutzte Flächen in Kultur genommen werden. Die Ausdehnung des Ackerlandes ginge auf Kosten von wertvollen Ökosystemen wie Wäldern, natürlichem Grasland und Mooren – mit gravierenden Folgen für das Klima: Diese Biotope speichern Kohlenstoff im Holz und im Bodenhumus. Durch Abholzung und Humusabbau wird dieser Kohlenstoff in Form von klimaschädlichem CO<sub>2</sub> freigesetzt. Bereits 12 Prozent der globalen Treibhausgasemissionen gehen auf solche Landnutzungsänderungen zurück.

**Klimaschutz: Treibhausgasemissionen nicht in andere Länder verlagern**

Europa und Deutschland sind für die Landwirtschaft geradezu prädestiniert: Fruchtbare Böden, genügend Wasser, hochqualifizierte Landwirte und moderne Technik machen die Region zum Gunststandort. Verzichten wir bei uns durch Extensivierung auf Produktion, nimmt sie in anderen Regionen der Erde stärker zu. Dies wären häufig Regionen mit ungünstigeren Standortbedingungen und weniger effizienten Produktionsverfahren, wo zwangsläufig natürliche und naturnahe Ökosysteme in Ackerland umgewandelt werden müssten. Ein zusätzlicher Anstieg der globalen Treibhausgasemissionen wäre absehbar.

**ABBILDUNG 24**

**Treibhausgasemissionen durch die Erzeugung von 10 t Weizen**



Nüchterne Fakten sprechen ihre ganz eigene Sprache: Die Weltbevölkerungsuhr der Stiftung Weltbevölkerung tickt unaufhaltsam. Während es 123 Jahre dauerte, bis sich die Zahl der auf der Erde lebenden Menschen von einer Milliarde (1804) auf zwei Milliarden (1927) verdoppelte, war die nächste Verdopplung auf vier Milliarden (1974) schon nach 47 Jahren erreicht. Auch wenn die Prognosen davon ausgehen, dass sich das Wachstum wieder etwas verlangsamt, so werden doch im Jahr 2050 mehr als neun Milliarden Menschen auf der Erde leben. Sie alle brauchen Platz, sauberes Trinkwasser und Nahrung – in angemessener Menge und Qualität.

Allerdings gehen weltweit jedes Jahr fünf bis sieben Millionen Hektar Ackerboden verloren. Ursachen sind unter anderem Erosion, Versalzung, Versiegelung und Versteppung, die oft mit einer nicht standortgerechten Landnutzung einhergehen. Das gilt insbesondere für die Dritte Welt, und damit eben für die Länder, die das höchste Bevölkerungswachstum aufweisen.

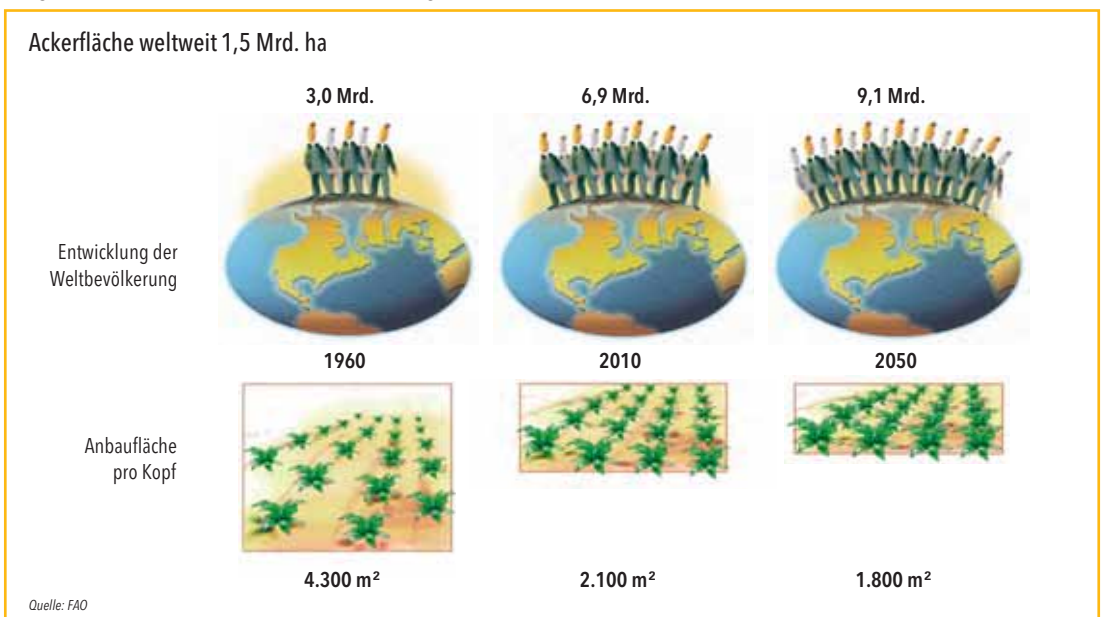
Eine der größten Herausforderungen unserer Zeit ist es, künftig mehr Menschen ausreichend mit Nahrungsmitteln zu versorgen, und das bei einem gleichzeitigen Rückgang der Ackerfläche, die pro Kopf zur Verfügung steht.

## HINWEIS

Link zur Weltbevölkerungsuhr  
<http://www.weltbevoelkerung.de>

## ABBILDUNG 25

### Begrenzte Fläche – wachsende Bevölkerung



Die Verbesserung der Verteilungsgerechtigkeit zwischen Kontinenten, Ländern und Regionen ist zweifellos eine wichtige Voraussetzung, um den Hunger auf der Welt zu vermindern, ebenso wie die Reduzierung der Nachernteverluste und der Menge an Lebensmitteln, die weggeworfen werden. Darüber hinaus bedeuten das anhaltende Wachstum der Weltbevölkerung und das sich vor allem in den Schwellenländern ändernde Konsumverhalten (höherer Fleischanteil in der Nahrung) aber insbesondere, dass deutlich mehr produziert werden muss. So prognostiziert die Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (FAO), dass die Weltnahrungsproduktion ausgehend vom Basisjahr 2009 bis 2050 um rund 70 Prozent gesteigert werden muss. Das bedeutet: Pro Jahr müssen zusätzlich rund eine Milliarde Tonnen Getreide und 200 Millionen Tonnen Fleisch erzeugt werden (FAO 2009).

Für die Nahrungsmittelproduktion zeigt sich die Bedeutung einer modernen mineraldüngerbasierten Landwirtschaft an den Produktivitätssteigerungen, die in

vielen Industrieländern im Laufe der Zeit erzielt wurden. Während der letzten 200 Jahre haben sich die Hektarträge fast verzehnfacht. So wurde in Deutschland um 1800 weniger als eine Tonne/Hektar Getreide geerntet, heute sind es im Durchschnitt rund 7,5 Tonnen/Hektar. Leistungsfähigere Sorten, Mechanisierung, Pflanzenschutz und vor allem auch die Mineraldüngung sind die Gründe für diese Ertragssteigerungen.

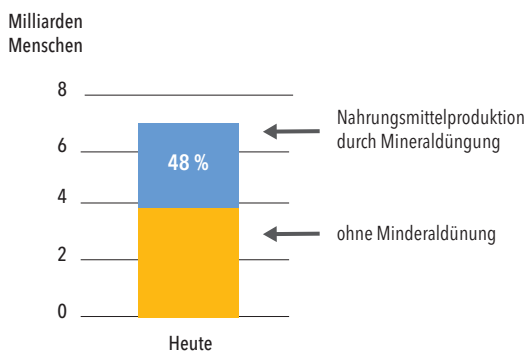
Die Entwicklung hin zu einer produktiven Landwirtschaft hat nicht nur die Ernährung der Bevölkerung möglich gemacht. Sie ist auch die Voraussetzung für unsere moderne arbeitsteilige Gesellschaft und folglich unseren Wohlstand.

#### LEHRER-INFO

Bevölkerungswachstum und Ernährungsproblem  
Arbeitsblatt 7

#### ABBILDUNG 26

Bereits heute bildet Mineraldüngung die Grundlage für fast die Hälfte der weltweit verbrauchten Nahrungsmittel.



Derzeit wird etwa die Hälfte der Pflanzenproduktion durch den Einsatz von Mineraldüngern ermöglicht



(nach Erisman et al. 2008, Nature Geoscience)

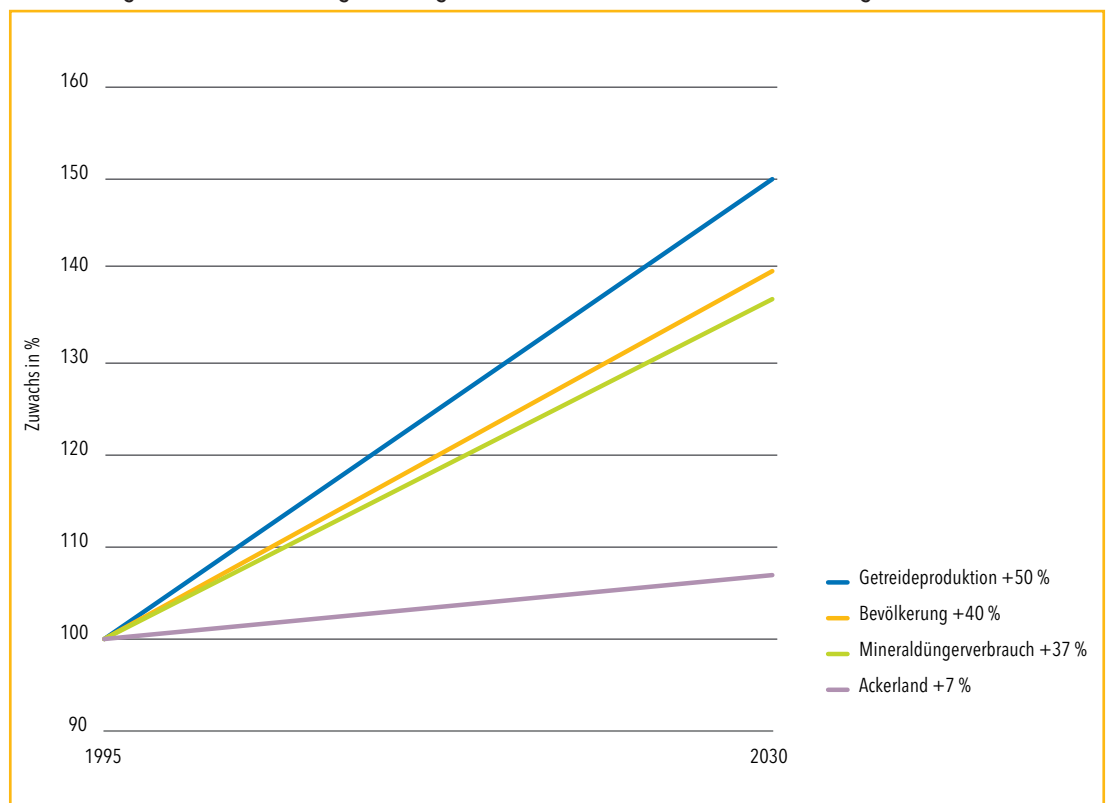
In anderen Teilen der Welt kann die Nahrungsmittelproduktion mit dem Bevölkerungswachstum auch in absehbarer Zeit nicht Schritt halten. In Afrika südlich der Sahara und Südasien beispielsweise sind trotz der weltweit kräftig gestiegenen Erträge Hunger und Unterernährung nicht besiegt worden. Neben klimatischen und geografischen „Gunst“- oder „Ungunsth Faktoren“ gibt es weitere wesentliche Gründe dafür, dass aktuell rund eine Milliarde Menschen nicht ausreichend mit Nahrung versorgt sind. Dazu gehören u. a. instabile politische Verhältnisse und Bürgerkriege, fehlender Zugang zu Land, mangelnde Bildung, unzureichende Infrastruktur und Korruption. Ein ganz wesentlicher Faktor ist aber auch der fehlende Zugang zu Wasser, Technik, Dünge- oder Pflanzenschutzmitteln. Das bedeutet, dass die Entwicklung hin zu einer leistungsfähigen, umweltschonenden und effizienten Landwirtschaft, wie

sie in den entwickelten Ländern vollzogen wurde und wird, auch in den Ländern der Dritten Welt sowie in den Schwellenländern in Gang gebracht bzw. beschleunigt werden muss. Dies ist umso dringlicher, da aufgrund des Bevölkerungsanstiegs in diesen Ländern die zur Nahrungsmittelproduktion verfügbare Ackerfläche pro Kopf immer weiter abnimmt.

Um den steigenden Nahrungsmittelbedarf zu decken, müssen die Flächenerträge weltweit gesteigert werden. Dies ist bei gleichbleibenden Ernährungsgewohnheiten nur durch eine Intensivierung der landwirtschaftlichen Produktion möglich. Mineraldünger spielen dabei eine zentrale Rolle, da sie die einzige in großem Maßstab zur Verfügung stehende Nährstoffquelle für Pflanzen darstellen, die noch weiter ausgebaut werden kann.

ABBILDUNG 27

Entwicklung von Weltbevölkerung, Nahrungsmittelbedarf und Einsatz von Mineraldüngern





- aid (2003): Ammoniak-Emissionen in der Landwirtschaft mindern. Gute fachliche Praxis. aid & KTBL (Hrsg.) Druckhaus Benatzky GmbH, Hannover.
- AMI – Agrarmarkt Informations-Gesellschaft (2012): Markt Bilanz Vieh und Fleisch 2012.
- BASF (2010):  
[http://www.basf.com/group/corporate/site-ludwigshafen/de/function/conversions:/publish/content/about-basf/worldwide/europe/Ludwigshafen/Education/Lernen\\_mit\\_der\\_BASF/ammoniaksynthese/data/Ammoniaksynthese.pdf](http://www.basf.com/group/corporate/site-ludwigshafen/de/function/conversions:/publish/content/about-basf/worldwide/europe/Ludwigshafen/Education/Lernen_mit_der_BASF/ammoniaksynthese/data/Ammoniaksynthese.pdf)
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (2004): Ammoniak und Ammonium. UmweltWissen:  
[http://www.lfu.bayern.de/umweltwissen/doc/uw\\_6\\_ammoniak\\_ammonium.pdf](http://www.lfu.bayern.de/umweltwissen/doc/uw_6_ammoniak_ammonium.pdf).
- Brentrup F. & Pallière C. (2008): GHG emissions and energy efficiency in European nitrogen fertiliser production and use. In: International Fertilizer Society – Proceedings 639 (2008).
- BGR-Datenbank – zitiert in: Röhling S. (2007): Wie lange reichen die Rohstoffe für die Mineraldüngerproduktion noch aus? In: Bundesarbeitskreis Düngung (Hrsg.) (2007): Rohstoffverfügbarkeit für Mineraldünger – Perspektiven unter hohen Energiekosten und begrenzten Ressourcen.
- BMELV (2010a) Die wirtschaftliche Lage der landwirtschaftlichen Betriebe. Buchführungsergebnisse der Testbetriebe. Wirtschaftsjahr 2009/10. Übersicht 8, Haupterwerbsbetriebe des ökologischen Landbaus 2009/10:  
<http://berichte.bmelv-statistik.de/BFB-0111001-2010.pdf>
- BMELV (2010b): Tabelle: Getreideernte 2010 nach Getreidearten.  
<http://berichte.bmelv-statistik.de/EQT-0202010-2010.pdf>
- BMELV (2010c): Tabelle: Kartoffelernte 2010:  
<http://berichte.bmelv-statistik.de/EQT-0202020-2010.pdf>
- DBV (2008): Situationsbericht 2009 – Trends und Fakten zur Landwirtschaft. Deutscher Bauernverband, Berlin.
- Drissen P. (2004): Eisenhüttenschlacken – industrielle Gesteine. Report des FEhS – Institut für Baustoff-Forschung 11 (2004).
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (2011): Jahresbericht 2010/2011
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (2012): Anbaufläche für nachwachsende Rohstoffe 2012:  
<http://mediathek.fnr.de/grafiken/daten-und-fakten/anbauflaeche-fur-nachwachsende-rohstoffe-2012-grafik.html>
- FAO (2009): Global agriculture towards 2050.
- Fink A. (2007): Pflanzenernährung und Düngung in Stichworten. 6. Auflage. Gebr. Borntraeger, Stuttgart.
- Galler J. (1999): Lehrbuch Umweltschutz. Ecomed Verlagsgesellschaft AG Co. KG.
- Glante F. (o. J.): Biodiversität im Boden. Umwelt Bundesamt, Dessau.
- Knittel H. & Albert E. (2003). Praxishandbuch – Dünger und Düngung. Agrimedia GmbH, Bergen/Dumme.
- Scheffer E., Schachtschabel P. (1998): Lehrbuch der Bodenkunde. 11. Auflage. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- Schilling, G. (2000): Pflanzenernährung und Düngung. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.

U.S. Geological Survey (2011): Mineral Commodity Summaries 2011. U.S. Geological Survey.

VDLUFA (1997): VDLUFA-Standpunkt „Phosphordüngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf“ – Vorschlag von Richtwerten.

VKS (2011): So entstehen hochwertige Mineraldünger:  
<http://www.vks-kalisalz.de/kali/hochwertige-mineral-duenger/>

**Apatitstruktur**

Die allgemeine, chemische Formel für Apatite ist  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$ . Sie gehören zur Mineralklasse der „Phosphate, Arsenate und Vanadate“ und entwickeln meist tafelige bis prismatische Kristalle.

**Biosphäre**

Der Raum des Planeten Erde, in dem Leben vorkommt.

**Chelate**

sind spezielle Typen von sog. Komplexverbindungen. Bei Komplexverbindungen ist das Zentralatom/-ion mit mehr Bindungspartnern (Liganden) verbunden, als man seiner Ladung nach erwarten sollte oder die Bindungspartner sind sogar ungeladen. Bildet das Zentralteilchen mit einem Liganden mehr als eine Bindung aus, nennt man diesen Liganden einen „Chelat-Liganden“ und die Verbindung allg. ein Chelat.

**Frischmasse**

ist eine Einheit für land- und forstwirtschaftliche Erzeugnisse. Sie bezeichnet die Masse des gewogenen Ertrags und wird im Regelfall pro Hektar angegeben. Sie wird der Trockenmasse gegenübergestellt, die nach Abzug des Rohwassers übrig bleibt. Trockenmassegehalt und Wassergehalt ergänzen sich also zur Frischmasse = 100 Prozent.

**Hydrosphäre**

[griech. hýdor „Wasser“ und sphaira „Kugel“]. Die Hydrosphäre bedeckt etwa 75 Prozent der Erdoberfläche und umfasst die Meere, Binnengewässer, das Grundwasser sowie Eis, Schnee und das in der Atmosphäre vorhandene Wasser.

**Katalysator**

„Reaktionsbeschleuniger“, d. h. ein Stoff, der, ohne im Endprodukt der Reaktion aufzutreten, chemische Reaktionen beschleunigt, indem er ihre Aktivierungsenergie herabsetzt.

**Lithosphäre**

[griech. lithos „Stein“ und sphaira „Kugel“]. Die oberste, starre Kruste der Erde, sie reicht etwa 100 Kilometer in die Tiefe.

**Nassaufschluss**

Unter einem Aufschluss versteht man das Überführen unlöslicher bzw. schwer löslicher Substanzen in säure- oder wasserlösliche Verbindungen. Beim Nassaufschluss werden Säuren als Aufschlussmittel verwendet.

**Phytate**

Phytinsäure kommt in der Natur als Anion, Phytat genannt, vor. Besonders viel Phytat ist in Mais, Soja sowie in Weizen-, Gersten- und Roggenkleie enthalten.

**Vegetationsperiode**

Der Zeitraum des Jahres, in dem die Pflanzen photosynthetisch aktiv sind, d. h. wachsen, blühen und fruchten.

**Vermiculite**

gehören zu der Mineralklasse der Silikate. Es sind Tonmineralien, die durch ihre Ionenaustauschfähigkeit maßgeblich zur Bodenfruchtbarkeit beitragen.

**Zellturgescenz**

Innendruck der Pflanzenzelle.

# Impressum

## Herausgeber

Fonds der Chemischen Industrie im Verband der Chemischen Industrie e. V. (FCI),  
Mainzer Landstraße 55, 60329 Frankfurt am Main  
[www.vci.de/fonds](http://www.vci.de/fonds), Tel. 069 2556-0

## In Kooperation mit

Industrieverband Agrar e. V.  
Mainzer Landstraße 55, 60329 Frankfurt  
[www.iva.de](http://www.iva.de), Tel. 069 2556-1281

## Erstauflage

Juli 2013  
27 000 Exemplare  
Alle Rechte vorbehalten

Das vorliegende Textheft zur Informationsserie „Pflanzenernährung“ ist zusammen mit einer interaktiven CD-ROM erschienen. Auf dieser CD-ROM sind alle Abbildungen nochmals als ppt- und pdf-Dateien gespeichert. Außerdem enthält die CD-ROM Arbeitsblätter und Versuchsbeschreibungen.

Die Informationsserie ist auch über das Internet abrufbar ([www.vci.de/fonds](http://www.vci.de/fonds)).

## Autoren

Dr. Andreas Frangenberg, Factum est  
Birgit Kullmann, Fonds der Chemischen Industrie (FCI)  
Dr. Hagen Trott, Industrieverband Agrar e. V. (IVA)

## Methodisch-Didaktisches Konzept:

Prof. Dr. David-Samuel Di Fuccia, Ines Schmidt,  
Universität Kassel

## Wissenschaftliche und fachdidaktische Beratung

Prof. Dr. Bernd Ralle, Technische Universität Dortmund

## Fachliche Betreuung

Prof. Dr. Andreas Gransee, Dr. Hans-Peter König,  
Dr. Reinhard Müller, Joachim Pollehn,  
Prof. Dr. Alexander Wissemeier,  
Dr. Hans-Peter Wodsak, Dr. Wolfram Zerulla, (alle  
Bundesarbeitskreis Düngung, BAD)

## Redaktion

Birgit Kullmann, Fonds der Chemischen Industrie (FCI)  
Dr. Sebastian Bott, Dr. Hagen Trott, Industrieverband  
Agrar e. V. (IVA)

## Gesamtkoordination

Birgit Kullmann, Fonds der Chemischen Industrie (FCI)

## Bildnachweis

Agri Con GmbH, Almut Hanns (Seite 33)  
aid Infodienst (Seite 13)  
BASF (Seite 37 – abgewandelt)  
Fotolia (Seiten 2, 6, 7, 8, 9, 10, 14, 15, 17, 18, 25,  
36, 39, 41, 46, 47, 49, 50, 55, 56, 57, 58, 59)  
Fotoserach (Titelseite)  
ICL Fertilizers (Seite 40)  
Institut für Geowissenschaften und  
Rohstoffe (Seite 12)  
istockphoto (Seiten 4, 31, 65)  
K+S Aktiengesellschaft (Seiten 20, 27, 29, 40, 41,  
43, 63)  
KTBL (Seite 52)  
Landwirtschaftlicher Informationsdienst  
Zuckerrübe (Seite 16)  
Universität Hohenheim, Institut für  
Pflanzenernährung (Seite 13)  
Yara (Seiten 28, 33, 38, 45, 60, 61, 63, 64)  
Alle anderen Abbildungen und Fotos FCI und IVA

## Gestaltung

Seippel & Weihe Kommunikationsberatung GmbH  
Bernardstraße 14-16  
63067 Offenbach am Main  
[www.seippel-weihe.com](http://www.seippel-weihe.com)

## Produktion

bk betterkonsult  
Königsteiner Straße 2  
61440 Oberursel/Taunus  
[www.betterkonsult.de](http://www.betterkonsult.de)

