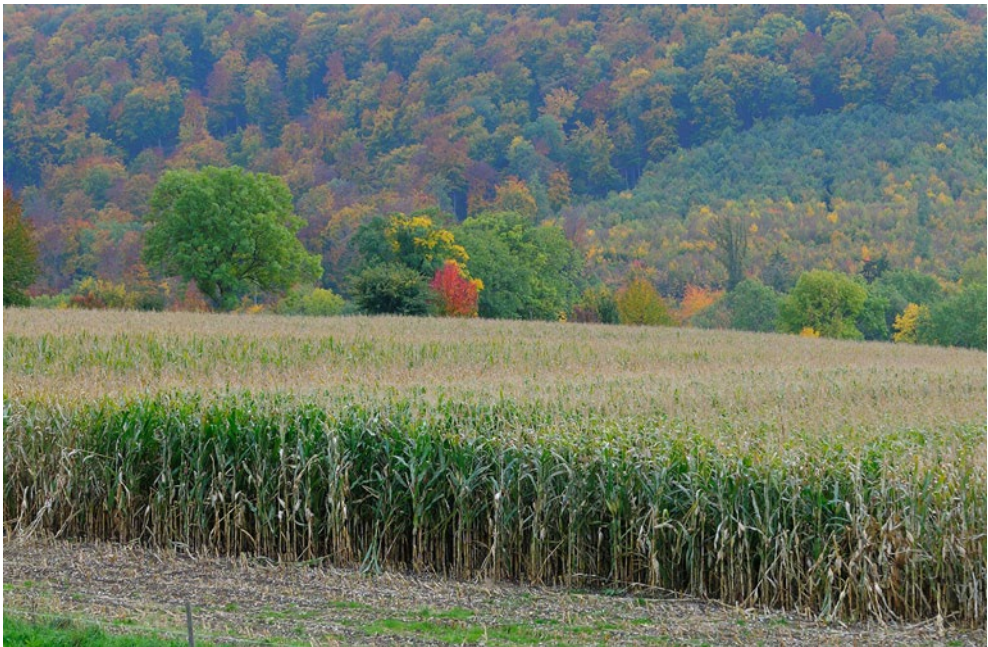


# Die Herkunft der Biomasse

# 2

Melvin Lippe, Iris Lewandowski, Rüdiger Unseld, Johannes Pucher,  
Klaus-Rainer Bräutigam



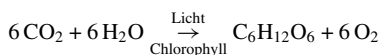
Anbauflächen von Mais kurz vor der Ernte zur Verwendung in einer Biogasanlage am Versuchsstandort „Unterer Lindenhof“ der Universität Hohenheim, Eningen, Baden-Württemberg. (© Oskar Eyb, Bildarchiv der Universität Hohenheim)

2.1	Biomasse aus der Agrarwirtschaft . . . . .	12
2.2	Biomasse aus der Forstwirtschaft . . . . .	32
2.3	Biomasse aus der Fischereiwirtschaft und Aquakultur . . . . .	48
2.4	Biomasse aus der Abfallwirtschaft. . . . .	54
	Literatur . . . . .	62

Bei der Herkunft der Biomasse unterscheidet man primäre und sekundäre Biomasseströme. Primäre Biomasse wird von autotrophen Organismen gebildet. Sie sind in der Lage, ihre Masse durch die Nutzung von Sonnenenergie im Prozess der Photosynthese aufzubauen. Das sind Pflanzen, Algen und bestimmte Bakterien. Sekundärbiomassen entstehen auf Grundlage des Verbrauchs von primärer Biomasse, z. B. in der Tierproduktion oder als organische Rest- und Abfallströme.

Frisch- und Trockenbiomasse unterscheiden sich dadurch, wie hoch ihr Wassergehalt ist. Pflanzen bestehen aus Kohlenstoff, Stickstoff, verschiedenen Makroelementen, Spurenelementen und Wasser, das in den meisten Organen einer Pflanze einen Anteil von 75 bis 85 % hat. Eine Ausnahme sind oftmals Organe, in denen Kohlenstoff oder Stickstoff in hoher Konzentration gespeichert wird, sodass ihr Wassergehalt deutlich geringer ist. Dazu gehören z. B. Körner, aber auch Früchte und unterirdische Speicherorgane wie Kartoffeln und Rüben. Auch dauerhafte Stützstrukturen von Pflanzen wie Holz weisen einen geringen Wassergehalt auf. Sie sind oft aus toten Zellen und Zellwänden aufgebaut. Lebende Gewebe erhalten hingegen ihre Form weitgehend durch einen hohen Innendruck in ihren Zellen. Wenn dort das vorhandene Wasser nicht mehr ausreicht, um die Form zu halten, welkt die Pflanze. Biomasse zeichnet sich also durch eine große Heterogenität ihrer Zusammensetzung aus. Dafür werden Wasser, Kohlenstoff und Nährstoffe aus der Umwelt aufgenommen.

Eine besondere Bedeutung bei der Bildung von Biomasse kommt der Photosynthese zu. Sie ist (nahezu) der einzige Prozess, wie Organismen Energie gewinnen können. Dieser für alles Leben auf der Erde essenzielle Vorgang produziert gleichzeitig den Sauerstoff, den Tiere und aerobe Mikroorganismen zum Leben brauchen. Während der Photosynthese nehmen autotrophe Organismen mithilfe von Lichtenergie Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) auf und arbeiten Kohlenstoff (C) in ihre Substanz ein (Assimilation), wodurch sie Lichtenergie in chemische Energie umwandeln. Das Endprodukt der Photosynthese sind C6-Zucker (Hexosen). Die Summenformel für den Gesamtprozess beschreibt folgende Gleichung:



Die Umwandlung von Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) und Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ) zu Zuckern und Sauerstoff findet in den Chloroplasten statt, die das grüne, lichtabsorbierende Pigment Chlorophyll enthalten. Das durch die Spaltöffnungen und Zellzwischenräume der Pflanzen an die photosynthetisch aktiven Zellen herandiffundierende  $\text{CO}_2$  wird dort in Kohlenhydrate umgewandelt. Diese Kohlenhydrate dienen den Pflanzen sowohl als Energie- und Kohlenstoffquelle für ihre Stoffwechselprozesse wie auch als Bausteine ihrer Biomasse. Die Photosynthese findet ausschließlich in den Blättern statt. Die Kohlenhydrate werden von den Blättern in nichtphotosynthetisch aktive Bereiche der Wurzel transportiert, wo sie für den Aufbau von pflanzlichen Strukturen, zur Bereitstellung von Energie (Atmung) eingesetzt oder als Kohlenhydrate, Fette oder Eiweiße (zusammen mit dem Makronährstoff Stickstoff) gespeichert werden.

## 2.1 Biomasse aus der Agrarwirtschaft

*Melvin Lippe, Iris Lewandowski*

Unter Land- oder Agrarwirtschaft wird die Produktion von Biomasse im Rahmen der Landbewirtschaftung durch Menschen verstanden. Die Art und Weise dieser Landbewirtschaftung sowie die Menge und Beschaffenheit der dabei erzeugten Produkte hängen von standortspezifischen (biophysikalischen und klimatischen), sozioökonomischen und politischen Rahmenbedingungen ab. Landwirtschaftliche Produktionssysteme werden in die Betriebszweige Pflanzen- und Tierproduktion unterteilt. Die Biomasse wird dann in weiteren Schritten als Nahrungs- oder Futtermittel, stofflich (Materialien, Chemikalien) oder für energetische Zwecke (Biogas, Biokraftstoffe, feste Brennstoffe) weiterverwendet.

### 2.1.1 Grundlagen der Pflanzenproduktion

#### 2.1.1.1 Ertragsbildung und Qualität

Das Pflanzenwachstum und damit auch die Ertragsbildung in der Landwirtschaft werden im Wesentlichen durch die (genetischen) Eigenschaften der Pflanzen und die Standortfaktoren Boden, Nährstoffe, Temperatur, Wasser und Solarstrahlung sowie durch das pflanzenbauliche Management beeinflusst (Abb. 2.1).

Die in einer Vegetationsperiode ablaufenden physiologischen Vorgänge innerhalb einer Pflanze sind von ihrer genetischen Information und den regulativen Umweltbedingungen abhängig. Sie bestimmen den Ertrag als flächenbezogene Produktionsleistung eines Pflanzenbestandes. Im Idealfall sind die Auswahl und die Anbauverfahren von Kulturpflanzen darauf ausgerichtet, das Produktionspotenzial des Standortes so gut wie möglich auszunutzen (Diepenbrock et al. 2012). Die Wachstums- und Entwicklungsprozesse einer Pflanze beanspruchen dabei den größten Teil von deren Stoffwechselaktivität. Die Produktion und Verteilung der Trockenmasse sind die entscheidenden innerpflanzlichen Vorgänge der Ertragsbildung. In den meisten Fällen wird der Ertrag eines Pflanzenbestandes durch bestimmte Organe erbracht, die im Entwicklungsverlauf angelegt und durch pflanzenbauliche Eingriffe und Maßnahmen in ihrem Wachstum gefördert werden können. Dazu gehören Früchte und Samen, Stängel, Blätter, unterirdische Speicherorgane (Knollen, Rüben) und Wurzeln. Ihr Anteil an der Ernte wird als **Ernteindex** bezeichnet. Dieser Ernteindex erreicht nur dann den Maximalwert 1, wenn der Aufwuchs einer Pflanze vollständig verwertet wird – wobei oft nur der oberirdische Anteil der Pflanze als Basis genommen wird. Das ist bei den meisten Futterpflanzen und einigen Energiepflanzen der Fall (z. B. Biogasmais, schnellwachsende Baumarten, *Miscanthus*). In allen anderen Fällen ergibt sich ein geringerer Wert. Pflanzenbauliche Maßnahmen sind generell darauf ausgerichtet, den Ernteindex zu optimieren (Diepenbrock 2014).

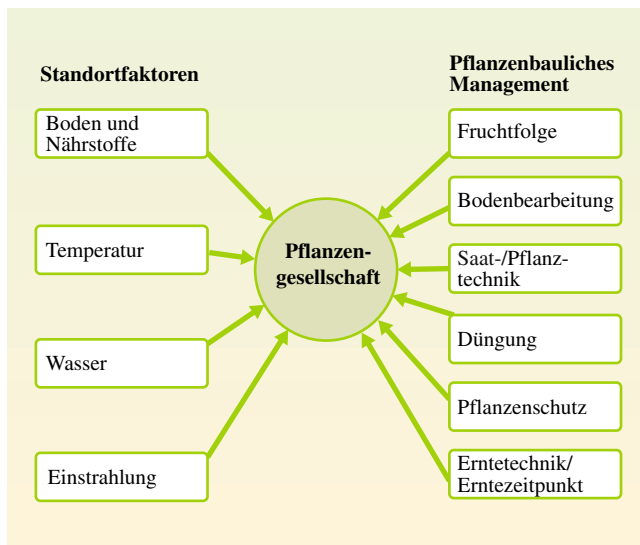


Abb. 2.1 Einflussfaktoren der Pflanzenproduktion

Neben dem Ertrag ist die Qualität der Biomasse eine zentrale Zielgröße der Pflanzenproduktion. Der Begriff Qualität umfasst dabei ein breites Spektrum unterschiedlicher Parameter, die vom Verwertungspfad der jeweiligen Biomasse abhängen. Beispiele für Qualitätsparameter sind der Nährstoffgehalt von Obst und Gemüse, ein geringer Wassergehalt bei Getreiden, die Proteinzusammensetzung in der Braugerste, Farbe und Geschmack, aber auch die Zusammensetzung der Lignocellulose, wenn die ganze Pflanze energetisch oder stofflich genutzt werden soll.

### 2.1.1.2 Boden und Nährstoffe

Boden entsteht durch Verwitterung der Erdkruste unter Mitwirkung von Bodenorganismen (Mikroorganismen und Bodentiere). Er besteht aus Mineralien unterschiedlicher Art und Größe sowie dem aus organischen Stoffen gebildeten Humus. Weiterhin enthält er Wasser, Luft und verschiedene lebende Organismen, wie Bakterien, Regenwürmer oder Insekten. Den Pflanzen bietet der Boden Wurzelraum für ihre Verankerung und Versorgung mit Wasser, Nährstoffen und Sauerstoff.

Das Wachstum und die Ertragsbildung der Pflanzen werden stark von den physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften des Bodens beeinflusst. Zu seinen physikalischen Eigenschaften zählt seine Mächtigkeit, also die Tiefe der oberen, für die Wurzeln der Pflanzen erschließbaren Schicht. Weitere physikalische Eigenschaften des Bodens sind seine Textur oder Körnungsgröße, sein Anteil luftführender Poren und seine Fähigkeit, Wasser zu halten sowie Wärme zu speichern oder abzugeben. Für ein optimales Pflanzenwachstum ist ein genügend großer Wurzelraum wichtig. Zu den chemischen Eigenschaften des Bodens gehören unter anderem sein Nährstoffgehalt und sein pH-Wert. Die biologischen Eigenschaften des Bodens werden durch das Vorkommen und die Aktivität von Bodenmikroorganismen bestimmt. Diese Organismen leben zum Großteil von der organischen Substanz, die dem Boden über abgestorbene

Pflanzen zugeführt wird. Durch mikrobielle Aktivität und auch physikalisch-chemische Prozesse werden wiederum Nährstoffe frei, die die Pflanzen über ihre Wurzeln aufnehmen.

Zum Wachsen benötigen alle Pflanzen mineralische und nicht-mineralische Nährstoffe. Die nichtmineralischen Nährelemente Kohlenstoff (C) und Sauerstoff (O<sub>2</sub>) werden von den Blättern der Pflanze aus der Luft aufgenommen. Im Gegensatz zum reichlich vorhandenen Sauerstoff ist Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) mit nur 0,03 Vol.-% in einer sehr geringen Konzentration in der Luft vorhanden. Deshalb kann die CO<sub>2</sub>-Versorgung der Chloroplasten die Produktionsrate eines Pflanzenbestands begrenzen, wenn starke Sonneneinstrahlung herrscht. Die mineralischen Hauptnährelemente Stickstoff, Phosphor, Kalium, Calcium, Magnesium und Schwefel sowie die Spurenelemente Eisen, Mangan, Zink, Kupfer, Molybdän, Chlor und Bor müssen die Pflanzen weitgehend über die Wurzel aus dem Boden aufnehmen. Die Pflanze kann umso mehr Nährstoffe und Wasser aus dem Boden aufnehmen, je besser sich die Wurzel entwickeln kann, um eine möglichst große Wurzeloberfläche auszubilden. Die Durchwurzelbarkeit eines Bodens sinkt mit zunehmender Dichtelagerung seiner Bestandteile sowie mit dem Auftreten von Verdichtungszone, die z. B. durch falsche Bodenbearbeitung verursacht worden sind.

### 2.1.1.3 Temperatur

Die Temperatur beeinflusst alle Wachstumsvorgänge der Pflanzen. Das gilt insbesondere für die Photosynthese, die Atmung und die Transpiration. Die Pflanzen zeigen in ihrer Aktivität ein artspezifisches Optimum. C<sub>4</sub>-Pflanzen zeichnen sich durch ein höheres Temperaturoptimum (über 30 °C) als C<sub>3</sub>-Pflanzen (ungefähr 20 °C) aus (Exkurs 2.1). Die untere Grenze für eine Photosyntheseaktivität – das Temperaturminimum – liegt bei den Pflanzen der kalten und gemäßigten Klimazonen bei wenigen Grad unter null.

Wenn die durchschnittliche Jahrestemperatur ansteigt (auf bis zu 30 °C), dann wächst bei ausreichender Wasserversorgung auch das Ertragspotenzial eines Standorts. Die Temperaturobergrenze liegt ja nach Pflanzenart zwischen 38 bis 60 °C. Höhere Temperaturen zerstören die Proteine, was eine verminderte Enzymaktivität bedingt und eine Beschädigung der Zellmembranen nach sich zieht. Das führt zum Erliegen der Stoffwechselprozesse.

### 2.1.1.4 Wasser

Grüne Pflanzen bestehen zu 70 bis 90 % aus Wasser, wobei der Wassergehalt je nach Art und Alter eines Pflanzenorgans variiert. Das Wasser nimmt vielfältige Funktionen in der Pflanze wahr. Es transportiert z. B. gelöste Stoffe und sorgt für die Aufrechterhaltung des hydrostatischen Drucks in den Pflanzenzellen, der das Gewebe straff hält. Für Stoffwechselvorgänge wie die Photosynthese ist Wasser ein wichtiger Ausgangsstoff. Außerdem spielen sich fast alle biochemischen Reaktionen in wässriger Lösung ab.

Wasseraufnahme und Wasserabgabe bestimmen den Wasserhaushalt einer Pflanze. Die Wasseraufnahme erfolgt hauptsächlich über die Wurzeln. Die Wasserabgabe findet hauptsächlich durch Trans-



### Exkurs 2.1: C<sub>3</sub>- und C<sub>4</sub>-Pflanzen

**C<sub>3</sub>-Pflanzen** arbeiten mit dem Grundtypus der Photosynthese. Da sich ihre Spaltöffnungen bei heißem und trockenem Wetter schließen, um einer zu hohen Verdunstung von Wasser vorzubeugen, zeigen sie im Vergleich zu C<sub>4</sub>-Pflanzen unter diesen Bedingungen eine verringerte Photosyntheseleistung. Sie sind jedoch unter gemäßigten Temperatur- und Lichtverhältnissen effizienter. Die meisten Pflanzen der mittleren und hohen Breiten gehören zu den C<sub>3</sub>-Pflanzen. Beispiele sind Weizen, Roggen, Hafer oder Reis. Die Fixierung von Kohlendioxid erfolgt im Calvin-Zyklus bei der RuBisCO-Reaktion an Ribulose-1,5-bisphosphat.

**C<sub>4</sub>-Pflanzen** nutzen einen anderen Stoffwechselweg, auf dem sie Kohlendioxid für die Photosynthese zunächst räumlich vorfixieren und erst dann wie C<sub>3</sub>-Pflanzen im Calvin-Zyklus zu Kohlenhydraten aufzubauen. Der Name C<sub>4</sub> leitet sich vom ersten Fixierungsprodukt ab, das durch die Assimilation von Kohlendioxid entsteht. Während dies bei C<sub>3</sub>-Pflanzen eine Kohlenstoffverbindung mit drei C-Atomen ist (D-3-Phosphoglycerat), produzieren C<sub>4</sub>-Pflanzen zuerst Oxa-

lacetat, eine Verbindung mit vier C-Atomen. Die Kohlendioxidassimilation und der Calvin-Zyklus verlaufen in C<sub>4</sub>-Pflanzen räumlich voneinander getrennt. Unter Aufbringung von Energie wird dadurch Kohlendioxid aktiv angereichert, was zu einer höheren Photosyntheserate führt – besonders unter Wassermangel und der daraus resultierenden Verengung der Spaltöffnungen. Daher sind C<sub>4</sub>-Pflanzen unter ariden Bedingungen den C<sub>3</sub>-Pflanzen ökophysiologisch überlegen. Durch die aktive Anreicherung findet deutlich seltener Photorespiration statt, also die Fixierung von O<sub>2</sub> anstelle von CO<sub>2</sub>. Typische C<sub>4</sub>-Pflanzen sind insbesondere Gräser, darunter auch bekannte Nutzpflanzen wie Mais, Zuckerrohr und Hirse, aber auch andere Arten wie Amarant.

In der Erdgeschichte entstanden zunächst die C<sub>3</sub>-Pflanzen. Ihr Schlüsselenzym RuBisCO trat zu einem Zeitpunkt auf, zu dem die Atmosphäre reich an Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und arm an Sauerstoff (O<sub>2</sub>) war. In diesem Umfeld bereitete die Assimilation keine Probleme, da es keine Verluste aufgrund von Photorespiration gab.

piration der Blätter statt. Wenn die Wasserabgabe größer ist als die Wasseraufnahme, entsteht ein Wasserdefizit. Das kann bei starker Transpiration, geringer Wasserverfügbarkeit im Boden oder gehemmter Wasserversorgung durch die Wurzel vorkommen. Die Wurzel nimmt das Wasser aus dem Boden über die Saugkraft ihrer Zellen auf. Deren Wasseraufnahmefähigkeit endet aber am Welkepunkt. Dort wird der Wassergehalt des Bodens so gering, dass seine Wasserhaltefähigkeit die Saugkraft der Wurzel übersteigt.

Die Biomasseproduktion der Pflanzen hängt maßgeblich von ihrer Wasserversorgung ab. Jede Pflanzenart hat einen für die Massebildung spezifischen Wasserverbrauch. Der **Transpirationskoeffizient** beschreibt die Wassermenge, die von einer Pflanze für die Produktion von 1 kg Trockenmasse benötigt wird. C<sub>4</sub>-Pflanzen wie Mais (*Zea mays*) und Miscanthus (*Miscanthus spp.*) (Abb. 2.2) haben mit 220 bis 350 l/kg den niedrigsten Transpirationskoeffizienten und damit die effizienteste Wasserausnutzung von Nutzpflanzen. Das ist unter anderem auf die dichte Anordnung ihrer photosynthetisch aktiven Zellen und den damit verbundenen geringeren Transpirationsverlust zurückzuführen. C<sub>3</sub>-Pflanzen wie Getreide und die zu den schnellwachsenden Baumarten zählenden Weiden (*Salix*) benötigen 500 bis 700 l Wasser für die Produktion von 1 kg Biomasse. Die Biomasseproduktivität eines Standorts ist potenziell umso höher, je besser dort das Wasserangebot ist. Diese Zahlen belegen eindrucksvoll, dass die transpirierte Wassermenge ein Vielfaches der Wassermenge ist, die in der Biomasse selbst als Wasser verbleibt.

#### 2.1.1.5 Strahlung

Die Nettophotosyntheserate steigt mit zunehmender Strahlungsintensität bis zu einem Sättigungspunkt an. Wird die Strahlung

aber sehr gering, dann übersteigt die Veratmung von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) dessen Assimilation. Die Strahlungsintensität, bei der die veratmete CO<sub>2</sub>-Menge gleich der assimilierten ist, wird **Lichtkompensationspunkt** genannt. Eine Pflanze absorbiert nur einen Teil der einfallenden Strahlung; der Rest wird reflektiert oder durchgelassen. Die Absorption von Strahlung im pflanzlichen Gewebe erfolgt selektiv in Abhängigkeit von ihrer Wellenlänge. Besonders im Bereich der Infrarotstrahlung von 0,7 bis 1,1 µm durchdringt sehr viel Strahlungsenergie den Pflanzenbestand, ohne absorbiert zu werden. Die Nettoeinstrahlung ergibt sich aus der nicht reflektierten Gesamtstrahlung und der langwelligen Rückstrahlung. Hierbei stellt der **Reflexionskoeffizient** das Verhältnis von reflektierter zu absorbierter Strahlung dar. Er hängt vor allem von dem Einstrahlungswinkel des Lichtes sowie der Oberflächenbeschaffenheit und der Farbe der Pflanze ab. Bei einem grünen Pflanzenbestand liegt der Reflexionskoeffizient zwischen 0,1 und 0,4. Die CO<sub>2</sub>-Assimilation steigt in Abhängigkeit von der Einstrahlung und vom Photosynthesetyp. Bei gleicher Einstrahlung ist dabei die Assimilation von C<sub>4</sub>-Pflanzen höher als die von C<sub>3</sub>-Pflanzen.

#### 2.1.1.6 Managementmaßnahmen

Neben den durch den natürlichen Standort vorgegebenen Faktoren kommt der anthropogenen Beeinflussung des Pflanzenwachstums durch pflanzenbauliche Maßnahmen eine wichtige Rolle zu. Darunter fallen die Wahl der geeigneten Kulturpflanze für den jeweiligen Standort, die Bodenbearbeitung, das Aussaatverfahren, die Düngung, der Pflanzenschutz und die Erntemaßnahmen. Die wichtigste Voraussetzung des Erfolgs pflanzenbaulicher Maßnahmen ist die Auswahl einer Pflanzenart, die an die ökologischen Bedingungen des Produktionsstandorts angepasst



**Abb. 2.2** Miscanthus gehört zu den Nutzpflanzen, die Wasser am besten für ihr Wachstum ausnutzen. (© Kiesel, Bildarchiv der Universität Hohenheim)

ist. Das betrifft sowohl die Ansprüche an die Bodenbeschaffenheit als auch an die Niederschlagsmenge und deren Verteilung sowie an die Temperatur und deren Verlauf.

Bodenbearbeitungsmaßnahmen werden durchgeführt, um den Boden zu lockern, Ernterückstände sowie organische und mineralische Dünger einzuarbeiten, Unkraut zu bekämpfen und den Boden für die Saat vorzubereiten bzw. die Saat oder Jungpflanzen auszubringen. Zeitpunkt und Verfahren der Bodenbearbeitung müssen dem Zustand des Bodens sowie den Ansprüchen der Pflanzen angepasst werden.

Fruchtfolge bezeichnet die zeitliche Aufeinanderfolge von Kulturpflanzen auf einem Feld. Einzelne Arten von Kulturpflanzen sind üblicherweise stets Bestandteile einer Fruchtfolge. Auch wenn die Gestaltung von Fruchtfolgen oftmals durch ökonomische Zwänge eingeschränkt ist, sollten die positiven und/oder negativen Effekte von Fruchtfolgen beachtet werden. Diese Effekte beruhen darauf, dass die jeweilige Vorfrucht ebenso einen Einfluss auf das Vorkommen von Unkraut und Schaderregern wie auf den Bodenwasser- und Nährstoffvorrat einer Anbaufläche hat. Ihre stofflichen Reste und deren Umsetzung können sich auf die Nachfrucht auswirken, auch in Form von chemischen Wechselwirkungen (Allelopathie), die sowohl zwischen Arten als auch innerhalb der gleichen Art auftreten (Diepenbrock 2014). Der Fruchtfolgegestaltung sind biologische Grenzen gesetzt, weil der Anbau derselben oder verwandter Kulturarten in aufeinanderfolgenden Jahren den Ausbruch von Pflanzenerkrankungen begünstigt und oft zu sogenannter Bodenmüdigkeit und damit schlechteren Erträgen führt. Trotzdem sind vor allem in subtropischen und tropischen Regionen Kultursysteme verbreitet, die auf eine Rotation verzichten. So wird etwa Reis überwiegend ohne Rotation mit anderen Kulturpflanzen produziert, was durch die intensive Bodenvorbereitung und die submerse Wachstumsweise begünstigt wird, die eine starke Unterdrückung von Unkräutern und Pflanzenkrankheiten erzielt. Zeitlich muss die Fruchtfolge von Kulturpflanzen so geplant werden, dass zwischen der Ernte

der einen und der Aussaat der anderen Frucht genügend Zeit für eine Bodenvorbereitung liegt. Kulturarten mit frühen Saatterminen wie z. B. Winterraps und -gerste können daher nicht nach späträumenden Früchten wie Mais oder Zuckerrüben angebaut werden.

Düngung bezeichnet Managementmaßnahmen im Feld, die das Ziel haben, die Nährstoffzufuhr der Pflanzen (z. B. durch mineralischen oder organischen Stickstoffdünger) und die Eigenschaften des Bodens zu verbessern (z. B. durch Kalkung oder die Zufuhr von organischer Substanz). Das Ausmaß der Düngung orientiert sich an der dem Boden durch die Pflanzen entzogenen Nährstoffmenge. Die stärkste Ertragsbeeinflussung wird durch eine Stickstoffdüngung erreicht, weil Stickstoff das Wachstum stark fördert und sein Angebot im Boden oft ein ertragsbegrenzender Faktor ist. Stickstoff wird dem Boden entweder in Form von mineralischer oder organischer Düngung, über die Stickstofffixierung der Leguminosen oder über Regen als Eintrag aus der Luft zugeführt. Neben Stickstoff wird im Allgemeinen noch regelmäßig mit Phosphor und Kalium gedüngt. Kalzium ist neben seiner Funktion als Pflanzennährstoff auch wichtig für die Bodenfruchtbarkeit. Es beeinflusst den pH-Wert des Bodens, die chemischen Reaktionen und damit die Verfügbarkeit verschiedener Nährstoffe und stabilisiert über seine brückenbildende Funktion das Bodengefüge. Abgesehen von Magnesium, das häufig in Kaliumdüngern enthalten ist, sind alle weiteren Nährstoffe meist ausreichend im Boden vorhanden und werden nur bei offensichtlichem Mangel appliziert.

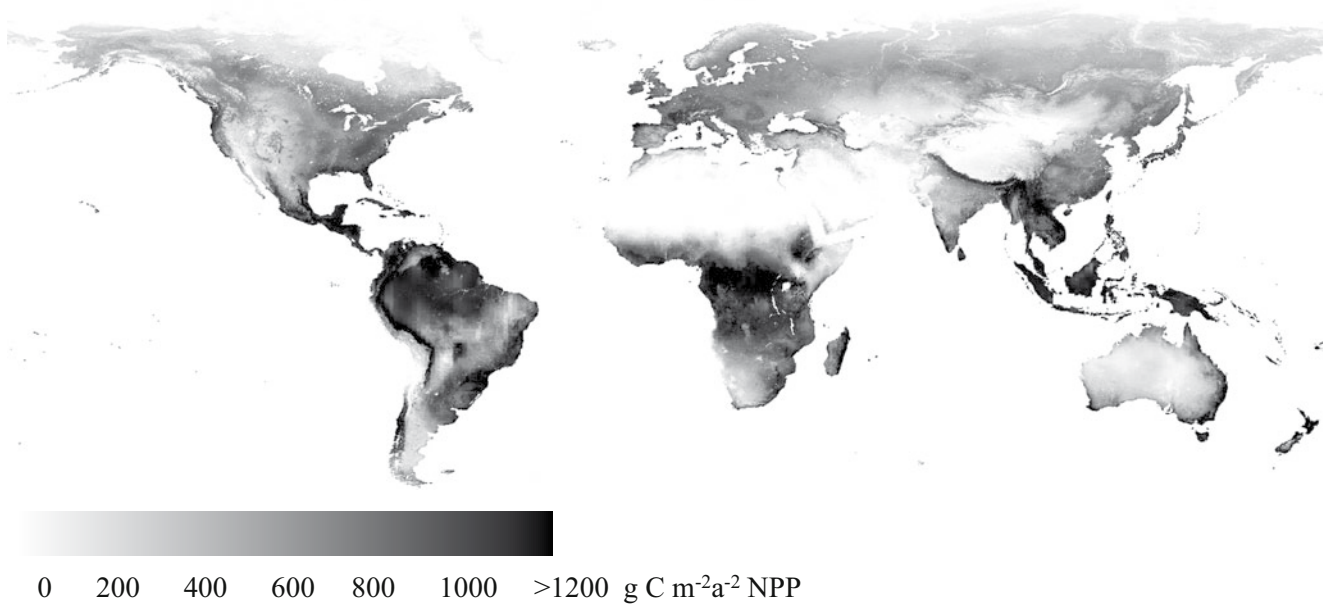
Pflanzenschutzmaßnahmen während der Vegetationsperiode dienen der Verhinderung oder Bekämpfung von Unkraut, Krankheiten und Schädlingsbefall. Unkräuter konkurrieren mit den Kulturpflanzen um die Wachstumsfaktoren. Sie hemmen somit deren Wachstum oder drängen die Kulturpflanzen ganz zurück. Hierdurch kommt es meist nicht nur zu einem verminderten Ertrag, sondern auch zu einer geringeren Qualität oder unerwünschten Beschaffenheit der geernteten Biomasse. Dieselben Auswirkungen werden durch den Befall mit Krankheiten und Schädlingen verursacht, die von den Photosyntheseprodukten und Reservestoffen der Pflanze leben.

Vom Ernteverfahren hängt ab, in welchem Anteil und mit welcher Qualität der Biomasseaufwuchs der späteren Nutzung zur Verfügung steht. Für eine verlustarme Ernte ist besonders auf den richtigen Erntezeitpunkt und die richtige Erntetechnik zu achten.

### 2.1.1.7 Klimazonen und Schwerpunkte globaler landwirtschaftlicher Produktion

Die räumliche Angebotscharakteristik von Biomasse wird durch die Kombination aus Bodengüte, Niederschlagshöhe und -verteilung sowie den Temperaturverlauf und das Lichtangebot bestimmt. Abb. 2.3 zeigt die Menge an Biomassezuwachs, ausgedrückt in jährlichem Zuwachs an Kohlenstoff je Quadratmeter.

Das Spektrum reicht von 0 bis über 1200 g jährlich, wobei diese 1200 g einer Menge von 12 t Kohlenstoff (C) oder rund 24 t Biomasse (Trockenmasse) pro ha jährlich entsprechen. Tropische



**Abb. 2.3** Nettoprimärproduktion (NPP) an Biomasse, in g jährlichem Zuwachs an Kohlenstoff (C) je m<sup>2</sup>. (© Imhoff et al. 2004)

Gebiete um den Äquator, in denen hohe Niederschlagsmengen mit hohen Temperaturen und einer ganzjährigen Vegetationsperiode zusammentreffen, weisen diese höchste Biomasseproduktivität auf.

Die Darstellungen in Abb. 2.4 zeigen die aktuellen Schwerpunkte der globalen Acker-, Gras- bzw. Weideland- sowie Waldflächen (Foley et al. 2005).

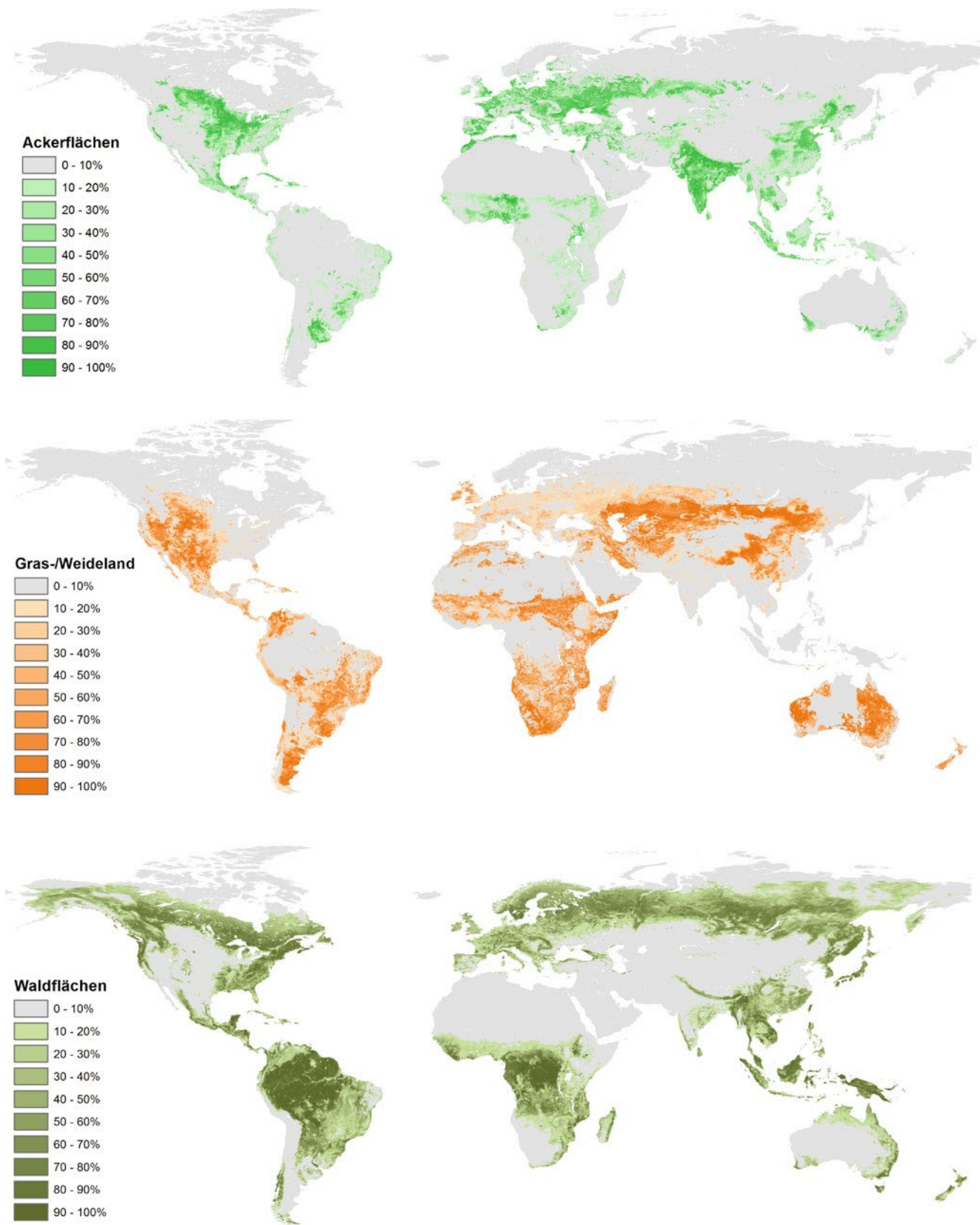
In vielen Regionen der Erde wird die Biomasseproduktion durch mangelnde Wasserversorgung limitiert. Durch den Klimawandel wird eine Ausweitung des Wassermangels in agrarischen Produktionssystemen und als Konsequenz eine verstärkte Ausweitung der Bewässerungslandwirtschaft erwartet. Dabei muss man darauf achten, dass Wasser nachhaltig genutzt und aus durch Regen oder Schnee wieder vollständig aufzufüllenden Wasservorkommen bezogen wird. In Richtung Norden sinkt die Produktivität vor allem durch eine Kombination aus niedrigen Temperaturen und kurzen Vegetationsperioden. Entsprechend sind hier eher Tundren und Savannengebiete anzutreffen. Infolgedessen konzentrieren sich die globalen landwirtschaftlichen Anbauflächen in Gebieten der gemäßigten Breiten, zum Beispiel in Europa, dem mittleren Westen der USA, großen Bereichen des indischen Subkontinents sowie China. Im Gegensatz dazu finden sich Weide- und Graslandgebiete, die vor allem der Viehhaltung dienen, bevorzugt in Zentralasien, dem subsaharischen Afrika, dem Westen der USA und Südamerikas (Teile Brasiliens, Chiles und Argentiniens).

### 2.1.2 Grundlagen der Tierproduktion

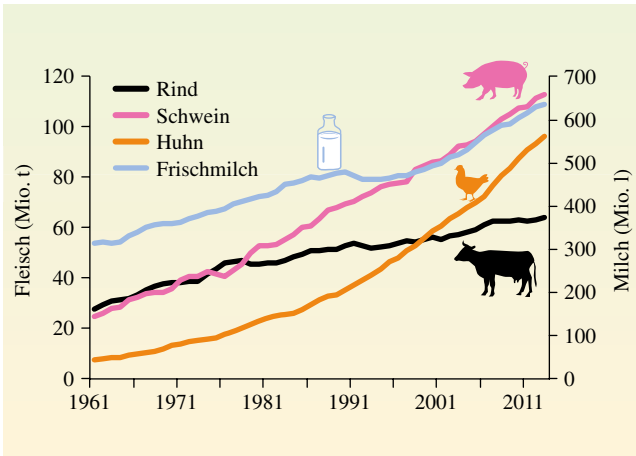
Unter dem Begriff Tierproduktion wird das Zusammenwirken von Züchtung, Ernährung und Haltung landwirtschaftlicher Nutztiere auf der Grundlage von anatomischen und physiologischen Gegebenheiten und unter Beachtung ökonomischer Rahmenbedingungen verstanden. Das Ziel der Tierproduktion ist in erster Linie die Erzeugung von Nahrungsmitteln (Fleisch, Milch, Eier, Honig und Fisch). Daneben dient sie auch der Gewinnung von Häuten zur Lederherstellung, von Wolle, von Daunen und Federn sowie von Rohstoffen (vor allem Fetten) für die chemische Industrie. Zu diesen Zwecken werden Rinder, Schweine, Geflügel, Schafe oder Kaninchen gehalten. Auch andere Leistungen wie die Landschaftspflege durch Schafe und Rinder und die Blütenbestäubung durch Bienen können Teil eines landwirtschaftlichen Tierproduktionssystems sein. Während früher oftmals die quantitative Ernährungssicherung als primäre Aufgabe der Tierproduktion galt, liegt ihr Hauptaugenmerk gegenwärtig auf der qualitativen Verbesserung des bestehenden Angebots, soweit das über Tierzucht, -haltung und -ernährung möglich ist (Weiß et al. 2011).

Global betrachtet sind die jährlichen Produktionsmengen im Zeitraum von 1961 bis 2013 stark angestiegen. So hat sich die Menge an erzeugtem Rindfleisch mehr als verdoppelt und die Schweinefleischproduktion mehr als vervierfacht. Die Hühnerfleischproduktion wurde sogar von etwa 7 auf mehr als 90 Mio. t gesteigert. Im gleichen Zeitraum stieg die jährliche Produktion von Kuhfrischmilch von etwa 360 auf über 640 Mio. l an (Abb. 2.5).





**Abb. 2.4** Schwerpunkte der globalen landwirtschaftlichen Produktionssysteme und verbliebene Waldflächen. (© Foley et al. 2005, mit Genehmigung der AAAS)



**Abb. 2.5** Trends der globalen Tierproduktion von 1961 bis 2013: Fleischmenge (in Mio. t) und Kuhfrischmilch (in Mio. l). (Nach FA-OSTAT 2014)

### 2.1.2.1 Extensive und intensive Tierhaltung

Die Tierproduktion ist eine wichtige Komponente der globalen Nahrungssicherung, weil sie wichtige Proteine, Aminosäuren und Vitamine liefert. Auf Seiten der Produktionsbetriebe dient die Viehhaltung entweder der Einkommensdiversifizierung mit dem Ziel der Risikominimierung (meist in kleinbäuerlichen Strukturen) oder der Gewinnmaximierung in marktorientierten Großbetrieben. Diesen unterschiedlichen Geschäftsmodellen entsprechen die unterschiedlichen Produktionssysteme der extensiven und der intensiven Tierhaltung. Der Flächennutzungsgrad, also die Anzahl der Tiere je Flächeneinheit, ist dabei das wichtigste Unterscheidungskriterium.

**Extensive Tierhaltung** ist charakterisiert durch große Weideflächen mit geringem Viehbesatz. Die Tiere werden meist ohne Zufüttern fast ausschließlich auf Naturweiden gehalten und selten oder nur zeitlich begrenzt in Ställen. Extensive Tierhaltungssysteme beziehen meist mehrere Tierarten ein. Sie setzen vielfach auf traditionelle Nutzungsformen mit hohem Selbstversorgungsanteil. Sie verknüpfen ihre Tierproduktion eng mit landwirtschaftlichen Anbausystemen, indem sie Mist und Gülle als organischen Dünger zur Aufrechterhaltung der Bodenfruchtbarkeit einsetzen und damit eine wichtige Komponente des lokalen Nährstoffkreislaufs darstellen. Extensiv sind oftmals auch die unterschiedlichen Formen moderner ökologischer Tierhaltung, bei denen die Erhaltung der Weiden im Vordergrund steht (Weiß et al. 2011).

**Intensive Tierhaltung** wird auf kleinen Weideflächen mit dichtem Viehbesatz oder in Stallungen mit Massentierhaltung mit einem zumeist hohen Technisierungsgrad betrieben. Sie ist auch durch Zufütterung mit gekauften Futtermitteln geprägt. Bestockungsraten von mehr als zehn Vieheinheiten pro Hektar sind die Regel (Exkurs 2.2). Intensive Tierhaltungssysteme beziehen meist nur eine Tierart ein, weil bei ihnen Produktionssicherheit und Gewinnerwirtschaftung im Vordergrund stehen (Doppler 1991).

### 2.1.2.2 Futtermittel

Futtermittel bezeichnen in Tierproduktionssystemen die Nahrung für landwirtschaftliche Nutztiere. Sie basieren meistens auf primärer Biomasse. Die Zusammensetzung des Futtermittels ist entscheidend für die Deckung des Nährstoffbedarfs und damit für die Gesundheit und Leistung der Tiere. Futtermittel sind vor allem in intensiven Tierhaltungsformen spezifisch auf die jeweilige Nutztierart und den Verwendungszweck zugeschnitten. Sie unterliegen oftmals staatlicher Zulassung und Kontrolle (Jeroch et al. 2008).

Futtermittel werden wissenschaftlich nach ihren Bestandteilen beurteilt, die nach Futterttyp und Ernte in Futtertabellen geordnet werden. Solche Futtertabellen zeigen den ernährungsphysiologischen Wert des Futtermittels an. In der täglichen Fütterungspraxis können die Futtermittel nach verschiedenen Kriterien unterteilt werden. Dazu zählen unter anderem botanische Merkmale, betriebs- und marktwirtschaftliche Gesichtspunkte, Konsistenz und Wassergehalt, Inhalts- und Nährstoffe sowie der Verwendungszweck. Man unterscheidet Grob-, Kraft- und Saftfutter:

- **Grobfutter** bezeichnet Futtermittel aus ganzen Pflanzen, entweder als frisches Grünfutter, siliert bzw. getrocknet oder in Form von Kolben und Stroh. Diese Futtermittel weisen mittlere bis niedrige Energiegehalte in der Trockenmasse auf und zeichnen sich durch hohe Strukturwirksamkeit im tierischen Verdauungstrakt aus.
- **Kraftfutter** sind energie- und proteinreiche Einzel- und industriell hergestellte Mischfuttermittel. Dazu zählen alle einmischbaren Komponenten mit einem Wassergehalt von weniger als 45 % und einem Energiegehalt von mehr als 7 MJ/kg Trockenmasse. Neben den luftgetrockneten Kraftfuttermitteln mit weniger als 12 % Wassergehalt sind Feuchtgetreide, Sodagrain, Melasse, und Trockengrün typische Vertreter dieser Futtermittelart. Im Vergleich zu den Grobfuttern haben Kraftfutter praktisch keinen Strukturwert. Wegen ihrer hohen Energiekonzentration lohnt sich aber der Transport dieser Futtermittel auch über weite Strecken. Sie besitzen meist eine gute Lagerfähigkeit und sind für den Handel geeignet, zumal ihre Gabe notwendig ist, wenn einmal nicht genügend Grobfutter zur Verfügung steht.
- **Saftfutter** nehmen eine Zwischenstellung ein. Sie sind von der Energiekonzentration den Kraftfuttern ähnlich, weisen im Vergleich mit ihnen jedoch einen relativ hohen Wassergehalt von mehr als 45 % auf. Deshalb werden sie ähnlich wie Grobfutter gehandhabt. Werden sie nicht frisch verfüttert, dann müssen sie meistens in Form einer Silage konserviert werden. Als Saftfutter werden oftmals Rüben, Wurzeln, Knollen, Biertreber, Pressschnitzel, Schlempe oder Maisnebenprodukte eingesetzt. Der Strukturwert der Saftfutter liegt zwischen dem von Kraft- und Grobfutter (Weiß et al. 2011).

Nach der verwendeten Grünfuttermenge (als Trockensubstanz) werden Tierproduktionssysteme auch in folgende Kategorien unterteilt:

- **Graslandbasierte Weidewirtschaftungssysteme** mit weniger als zehn Vieheinheiten pro Hektar, in denen mehr

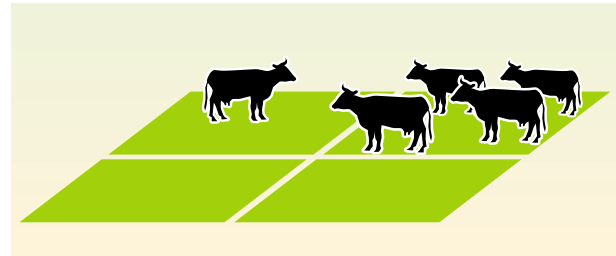


## Exkurs 2.2: Vieheinheit und Viehbesatz

Der Viehbestand eines Betriebes wird in Vieh- (VE) oder Großvieheinheiten (GV) beziffert. Während die Vergleichsgröße VE nach dem Futterbedarf berechnet wird, nimmt eine GV das Gewicht eines ausgewachsenen Rindes von 500 kg Lebendgewicht zum Maßstab. In tropischen Regionen gibt es die tropische Vieheinheit (engl. *tropical livestock unit, TLU*), die sich nach einem Lebendgewicht von nur 250 kg richtet. Vieheinheiten werden herangezogen, um die notwendige Fläche eines Betriebes mit Tierbestand zu berechnen. Damit lassen sich z. B. eine Überdüngung der Felder ausschließen und der Flächennutzungsgrad eines Betriebes bestimmen.

Der Begriff Viehbesatz bezeichnet das Verhältnis der Anzahl von Nutztieren zu einer Fläche, auf der ihr Futter erzeugt wird (Abb. 2.6). Der Viehbesatz kann sich auf Weiden und Almen beziehen, aber auch auf Wiesen und Äcker, sofern dort Futter für das Vieh gewonnen wird oder die Exkremente z. B. als Mist (Festmist) oder Gülle (Flüssigmist) ausgebracht

werden. Der Viehbesatz bemisst sich nach Großvieheinheiten je Hektar (GV/ha). Die Belastung der Fläche durch weidende Tiere wird dabei als Weidedruck bezeichnet (Chilonda und Otte 2006).



**Abb. 2.6** Exemplarische Darstellung eines niedrigen (*links*) und hohen Viehbesatzes (*rechts*) als Verhältnis der Anzahl Nutztiere pro Flächeneinheit

**Tab. 2.1** Futterkonversionseffizienz tierischer Produktionssysteme (dargestellt als Kehrwert von Kilogramm Futtermittel als Trockenmasse pro Kilogramm tierisches Produkt). (Nach Smeets et al. 2007)

Region	Rindfleisch	Schweinefleisch	Schafffleisch	Hühnerfleisch und Eier
Nordamerika	26	6,2	58	3,1
Westeuropa	24	6,2	71	3,1
Osteuropa	19	7,0	86	3,9
C.I.S./Baltische Staaten	21	7,4	69	3,9
Subsaharisches Afrika	99	6,6	108	4,1
Ostasien	62	6,9	66	3,6
Südasien	72	6,6	64	4,1
Welt	45	6,7	79	3,6

C.I.S – Commonwealth of Independent States, auch bekannt als „Russischer Commonwealth“

als 90 % der aufgenommenen Futtermenge von Weide- oder Graslandssystemen sowie über Grünfütterung zugeführt werden,

- **Industrielle oder stationäre Systeme**, die eine durchschnittliche Bestockungsrate von mehr als zehn Vieheinheiten pro Hektar aufweisen und in denen weniger als 10 % der Futtermenge aus eigener Produktion stammt,
- **Mischsysteme**, in denen mehr als 10 % der Futtermenge aus Neben- oder Reststoffen der landwirtschaftlichen Produktion stammen, z. B. aus Ernteresten.

effizienz variiert global teilweise sehr stark (Tab. 2.1). So ist die Rindfleischproduktion in den Industrieländern etwa viermal effizienter als im subsaharischen Afrika und dreimal effizienter als in Südasiens. Auch bei anderen Produktionsformen gibt es teilweise starke regionale Schwankungen. So liegt das subsaharische Afrika in allen Produktionssystemen über dem Weltdurchschnitt, was unter anderem durch die niedrige Verfügbarkeit von Biomasse zur Futtermittelnutzung sowie durch die klimatischen Bedingungen zu erklären ist.

### 2.1.2.3 Futternutzungseffizienz

Die Futternutzungseffizienz oder auch Futterkonversionseffizienz gibt an, wieviel Kilogramm an Futtermittel man einsetzen muss, um 1 kg eines bestimmten tierischen Produktes zu erzeugen. Je kleiner ihr Wert innerhalb eines Produktionssystems ist, desto effizienter wird dort aus dem verwendeten Futtermittel tierisches Eiweiß oder Protein aufgebaut. Die Futternutzungs-

### 2.1.3 Charakterisierung landwirtschaftlicher Produktionssysteme

Es gibt eine Reihe unterschiedlicher Entwicklungspfade auf dem Weg in die Bioökonomie. Welchen davon eine Region oder ein Land einschlägt, hängt ganz entscheidend davon ab, welche land-

wirtschaftlichen Produktionssysteme dort vorhanden sind und welche Optionen landwirtschaftlichen Betrieben dort offenstehen.

Zur Charakterisierung eines landwirtschaftlichen Betriebs werden Faktoren wie die zur Verfügung stehenden Ressourcen, die lokal möglichen Anbau- und Viehhaltungssysteme, Hauseigenschaften des Betriebes und die zugrundeliegenden natürlichen Limitierungen des Ökosystems wie Klima oder Boden herangezogen (Ruthenberg 1980; Seré und Steinfeld 1996; Dixon et al. 2001).

Anhand klimatischer Rahmenbedingungen (z. B. Tageslänge, Temperaturverlauf, Niederschlagsmenge, relative Luftfeuchte) und sozioökonomischer Faktoren (z. B. Bevölkerungsdichte, Agrarpolitik, Organisation der zur Verfügung stehenden Markt- und Betriebsstrukturen) können landwirtschaftliche Produktionssysteme unterschieden werden (Diepenbrock 2014).

Global betrachtet ist immer noch etwa ein Fünftel der gesamten landwirtschaftlichen Produktion den traditionellen Subsistenzsystemen zuzuordnen. Sie haben ihren Schwerpunkt im ländlichen Raum vieler Entwicklungsländer. Dort bilden landwirtschaftlich geprägte, kleinbäuerliche Produktionssysteme das Rückgrat der lokalen Getreideproduktion und Viehhaltung. Sie dienen primär der Deckung des Nahrungsbedarfs der Kleinbauernfamilien. Traditionelle Subsistenzsysteme sind häufig durch extensive Bewirtschaftung, geringe Düngemittelgaben und einfache Formen der Bodenbearbeitung wie Hacken oder Pflügen mit Tieren geprägt. Allerdings ist auch hier ein oft schon weit fortgeschrittener Übergang zu marktorientierten Betriebssystemen zu beobachten. Schwellenländer wie Brasilien, Argentinien oder auch China haben ihre wirtschaftliche Entwicklung häufig aus ihrem Agrarsektor heraus gestartet. Sie nutzen dabei ihre naturräumlichen Vorteile (große Flächen für den Ackerbau) für die Industrialisierung dieses Sektors aus. Dort existieren aber parallel weiter subsistenzwirtschaftliche Systeme. In Mitteleuropa und den USA dominieren intensive Ackerbau- und Viehhaltungssysteme. Diese Systeme bauen oftmals auf wenigen Kulturpflanzen, Monokulturen und intensiver Viehhaltung auf. Marktorientierte Produktionssysteme wie in Mitteleuropa sind dabei immer mehr zum Bestandteil global vernetzter Wertschöpfungsketten geworden, die neben der Ertrags- oftmals auch primär auf Profitmaximierung ausgelegt sind. In unterschiedlichem Ausmaß werden dort über die reine Ertragsmaximierung hinaus aber auch andere Ziele wie Diversitätsgestaltung und die Pflege von Wald und Landschaft als Erholungsraum verfolgt.

### 2.1.3.1 Agrarökologische Zonen

Agrarökologische Zonen (AÖZ) sind geografisch begrenzte Gebiete mit ähnlichen klimatischen und ökologischen Eigenschaften, in denen nur bestimmte landwirtschaftliche Nutzungsformen vorkommen. AÖZ werden zur Ermittlung von regionalen Anbaupotenzialen und zur Landnutzungsplanung eingesetzt. Das Kernprinzip der AÖZ ist die Klassifizierung landwirtschaftlicher

Betriebsformen nach der Dauer der möglichen Wachstumsperiode von Kulturpflanzen im Jahresverlauf als Funktion des Bodenfeuchtegehalts und der potenziellen Evapotranspiration (Wasserverdunstung). Die Wachstumsperiode ist demnach die „Anzahl der Tage, an denen der Bodenfeuchtegehalt größer ist als die Hälfte der potenziellen Evapotranspiration“ (Fischer et al. 2002). Daraus leiten sich folgende AÖZ ab:

- Arid: Wachstumsperiode < 75 Tage pro Jahr,
- Semiarid: Wachstumsperiode > 75 < 180 Tage pro Jahr,
- Subhumid: Wachstumsperiode > 180 < 270 Tage pro Jahr,
- Humid: Wachstumsperiode > 270 Tage pro Jahr.

### 2.1.3.2 Landwirtschaftliche Betriebstypen

Eine weltweit sehr häufig verwandte Klassifizierung landwirtschaftlicher Betriebsformen wurde von der *Food and Agricultural Organization* (FAO) entwickelt, einer Unterorganisation der Vereinten Nationen. Dieser Klassifizierung zufolge wird ein landwirtschaftliches Betriebssystem als eine „Population von individuellen Betrieben angesehen, die im weitesten Sinne ähnliche oder gleiche natürliche Ausgangsbedingungen, Unternehmensstrukturen, Haushaltsbedingungen und Limitierungen (biophysikalisch und sozioökonomisch) teilen“ (Dixon et al. 2001). Im globalen Maßstab werden landwirtschaftliche Betriebe demnach folgenden Hauptklassen zugeordnet:

- Bewässerte landwirtschaftliche Betriebssysteme, die durch mechanische oder motorisierte Pumpen ganzjährig oder auch nur während der Trockenperioden betrieben werden,
- Reisbasierte Systeme in Feuchtgebieten, die vor allem in den tropischen Breiten des indischen Subkontinents oder Ostasiens anzutreffen sind,
- Regenbewässerte Systeme in humiden Gebieten mit hohem Ressourcenpotenzial, gekennzeichnet durch fruchtbare Böden und/oder ganzjährig gute Wasserversorgung,
- Regenbewässerte Systeme in Steillagen und Gebirgsregionen, die typisch sind für viele ländliche Regionen in Ostafrika oder den Gebirgsregionen Zentral- und Südasiens,
- Regenbewässerte Systeme in trockenen oder kühlen Regionen mit niedrigem Ressourcenpotenzial, beispielsweise bedingt durch flachgründige Böden,
- Dualistische Systeme (kommerzielle Großbetriebe und Kleinbauern),
- Urban geprägte Systeme, die oftmals in den Randzonen von Städten oder Metropolregionen anzutreffen sind, und primär der Versorgung der angrenzenden Stadtbevölkerung dienen.

### 2.1.3.3 Regionale Charakteristika

Anhand der beschriebenen natürlichen Vegetationszonen, agrarökologischen Zonen und Betriebsformen lassen sich regionale Charakteristika landwirtschaftlicher Produktionssysteme übersichtlich zusammenfassen (Tab. 2.2).

Bioökonomie für Einsteiger

Pietzsch, J. (Hrsg.)

2017, XIII, 217 S. 159 Abb. in Farbe., Hardcover

ISBN: 978-3-662-53762-6