



© Bradley Deen – iStockphoto

4.10 Nutzpflanzen für aride und semi-aride Gebiete

SIEGMAR-W. BRECKLE & MANFRED KÜPPERS

Commercial plants for arid and semi-arid areas: Nutrition of mankind relies on very few major domestic plant species conventionally grown in moderate climates. In hot and dry areas or at low water availability such species or varieties become essential that show higher drought and heat resistance. Since their productivity always depends on a combination of highly variable abiotic (environmental, technical) as well as biotic factors, it is the search for the best combination of all of these factors that leads to optimum yield: High water-use efficiency (WUE) and carbon partitioning are species-specific key characters. For the latter it must be taken into account that commercially useful yield may constitute only a small fraction of overall plant-specific biological productivity despite a high WUE. Use of irrigation water in arid areas is unavoidable, therefore irrigation techniques keeping salinity low (by applying leaching and drainage systems) and minimizing evapotranspiration are the other pre-requisite for sustaining productivity. An adequate combination of special land use techniques (minimizing waste of water) with the cultivation of drought and heat resistant genotypes can potentially result in more productive and yet sustainable agriculture even in hot and dry regions.

Die Ernährung der Menschheit basiert auf erstaunlich wenig verschiedenen Nutzpflanzen. Vor allem die Gräser haben im Verlaufe der Jahrtausende durch Züchtung wichtige Nahrungspflanzen hervorgebracht: Reis, Weizen, Mais, Gerste, Roggen, Hafer, Hirse, Zuckerrohr. Nimmt man die wesentlichen Gemüse- und Obstsorten dazu, dann kommt man auf etwa 100–150 verschiedene Nutzarten; dies ist im Vergleich mit den über 300.000 beschriebenen Blütenpflanzen auf der Erde ein äußerst geringer Prozentsatz. Nur wenige dieser Nutzpflanzenarten stammen aus Trockengebieten, obwohl große Teile der Erdoberfläche (semi-) arid sind. Zwar hat die steinzeitliche Landwirtschaft unter den semi-ariden Bedingungen des »Fruchtbaren Halbmondes« begonnen, größere Ernteerträge werden aber heutzutage vor allem in den Ländern der gemäßigten Breiten erwirtschaftet, in erster Linie deshalb, weil hier Wasser lokal und verlässlich verfügbar ist, wohl aber auch, weil bislang nur wenige Nutzpflanzen für Trockengebiete selektiert worden sind. Die steigende Zahl der Menschen, vor allem in Regionen mit Wasser-

knappeheit und mit langen sommerlichen Hitzeperioden, stellt neue Anforderungen an die Landwirtschaft, d.h. an neue Nutzpflanzensorten und verbesserte Anbautechniken. Hochproduktive hitze- und dürreresistente Pflanzen mit möglichst geringem Wasserverbrauch sind eine Notwendigkeit für die zukünftige Landwirtschaft dieser Gebiete.

Biologische Grundlagen der Biomasse-Produktion und des Ertrags bei Nutzpflanzen

Die Produktivität von Pflanzen hängt einerseits von verschiedenen Umweltfaktoren ab: gute Wasserversorgung, optimale Temperaturbereiche, ausreichende und ausgewogene Nährstoffversorgung, genügend Sonnenlicht (Lichtenergie), Schutz vor Parasiten und Herbivoren. Die Produktivität ist aber auch eine art-spezifische Eigenschaft der Pflanzen selbst und wird wesentlich von der pflanzlichen Lebensform mitbestimmt: So entsteht trotz gleicher Startbedingungen

Aus: WARNSIGNAL KLIMA: Genug Wasser für alle? 3.Auflage (2011)
- Hrsg. Lozán, J. L. H., Graßl, P. Hupfer, L. Karbe & C.-D. Schönwiese

(Abb. 4.10-1) aus einer etwa 0,5 g schweren Buchecker (*Fagus*) nach 4 Monaten ein 3–5 g schwerer Buchenkeimling mit einer 80 cm langen Pfahlwurzel und aus einem kaum 0,5 g schweren Sonnenblumenkern (*Helianthus*) aber eine 3 m hohe Sonnenblume mit 6 kg Gesamtgewicht. Andererseits stirbt eine Sonnenblume im Herbst ab, hingegen wächst eine Buche über Jahrzehnte und erreicht mehrere Tonnen Gewicht. Dies weist auf die große Bedeutung der artspezifischen pflanzlichen Investition der durch Photosynthese erzeugten Assimilate und ihrer möglichen Akkumulation über längere Zeiträume hin. Daher ist der »Ertrag pro Individuum« bei der Buche vielfach höher, jedoch auf Hektarbasis pro Jahr deutlich kleiner als bei der Sonnenblume.

Von entscheidender ökonomischer Bedeutung ist demnach nicht die Gesamtproduktion einer Pflanze im Laufe eines Jahres, sondern, je nach Ertragsziel, die Erzeugung speziell nutzbarer Teile: Samen, Früchte, Wurzeln, Blätter, Stammholz (bei Bäumen). Dies ist stets und unvermeidlich nur ein Bruchteil der Gesamtproduktion. Werden die Assimilate zunächst besonders zum Aufbau neuer, zusätzlicher Blätter, also neuer Produktionsorgane, verwendet, so entsteht durch den Zinseszins-Effekt ein exponentieller und damit erheblicher Zuwachs in kurzer Zeit, selbst bei niedrigen Photosyntheseraten pro Einzelblattfläche. Ist – wie bei der Sonnenblume – die Photosyntheserate außerdem noch hoch, wird das Wachstum zusätzlich beschleunigt. Davon profitiert in der Regel der Kornertag – er muss es aber nicht!

Für die Trocken- und Temperaturreistenz ist das ökophysiologische Verhalten der Pflanzen ausschlaggebend. Eine besonders wichtige Kenngröße ist dabei ihre Wassernutzungseffizienz (»water-use efficiency«

WUE), das ist die Photosyntheseleistung in Relation zum gleichzeitigen Wasserverbrauch. Die WUE gibt an, wieviele Moleküle Wasser durch die Transpiration verloren gehen, wenn ein Molekül CO_2 durch Photosynthese assimiliert wird. Die WUE kann auf verschiedenen Komplexitätsebenen betrachtet werden, auf der molekularen, der zellulären, auf der Ebene der ganzen Pflanze oder gar auf der Ebene eines Bestands (BACON 2004), also bezogen auf Spaltöffnung, Blatt, Gesamtpflanze, 1 ha Acker- oder Waldfläche. Diese Größe genau zu bestimmen, ist für sich genommen schwierig, denn sie ist skalenabhängig völlig unterschiedlich, je nachdem welchen Zeitraum (ob Stunde, Tag, Vegetationsperiode oder Jahr) man betrachtet; außerdem kann sich mit der Skala ihre Bedeutung für Optimierungsfragen verändern. Die Skalenübergänge (Blatt, Gesamtpflanze, Anbaufläche) werden somit bei Optimierungsfragen enorm wichtig. Sie sind abhängig von dem Pflanzentyp, sind aber auch landbautechnologisch beeinflussbar, oft mehr als durch manche molekularbiologischen Züchtungs- und Optimierungsmethoden. Um dies modellartig zu erläutern, haben wir aus Literaturquellen Mittel- und Schätzwerte abgeleitet.

Die molare Wassernutzungseffizienz der Blatt-Photosynthese im Augenblick des Tagesgeschehens (»instantaneous WUE«, in $\text{mol CO}_2/\text{kmol H}_2\text{O}$) beträgt für die Buche etwa 5 und für die Sonnenblume etwa 2. Die Sonnenblume geht also tagsüber auf Blattebene viel verschwenderischer mit Wasser um als die Buche (nach Daten von FREDEEN et al. 1991 und STICKAN et al. 1991).

Auch Blätter verbrauchen durch Atmung Assimilate. Die WUE, auf Blattebene, über den gesamten Tag (Buche 4, Sonnenblume 1,5) oder über die ganze



Abb. 4.10-1: Buche (*Fagus sylvatica*) und Sonnenblume (*Helianthus annuus*), ihre Samen bzw. Früchte weisen eine ähnliche Größe und Gewicht auf. Vier Monate nach der Keimung allerdings werden sich Pflanzen entwickelt haben, die in ihrem Aussehen und ihrer Größe sehr unterschiedlich sind (Photo SWBr).

Vegetationsperiode (»annual WUE«) integriert (Buche 3,4 Sonnenblume ca. 1), ist über den längeren Zeitraum hinweg niedriger (nach FREEDEN et al. 1991 und SCHULZE et al. 1986), da sich Zeiten ungünstiger Witterung (z.B. Bewölkung) stärker auswirken.

Bezieht man in einem nächsten Schritt die Gesamtpflanze mit ein, dann wirken sich die Atmungsverluste nichtgrüner Organe (z.B. Zweige, Stamm, Wurzeln) zusätzlich effizienzmindernd aus. Diese molare Wassernutzungseffizienz, die (jährliche) Biomasseproduktion pro Wasserverbrauch der Einzelpflanze, wird auch Transpirations-Effizienz (»transpiration efficiency« W) genannt. Sie bezieht sich auf die Gesamtpflanze und beträgt bei einer 8-jährigen Buche (LYR et al. 1992) etwa 3,6 mol CO₂/kmol H₂O (Trockenmasse in CO₂-Äquivalente umgerechnet) und bei der Sonnenblume 2,4 (Jungpflanzen) bzw. 1,0 (blühende Pflanzen; nach LARCHER 2001).

Natürlich sollte eine leistungsfähige Nutzpflanze eine besonders hohe WUE und W aufweisen; außerdem sollte sie einen besonders großen Prozentsatz der erzeugten Assimilate in die nutzbaren Pflanzenteile einbauen. Der Anteil der Blätter, der Sprossachsen und der Wurzeln an der gesamten Trockenmasse ist jedoch art- und standortspezifisch unterschiedlich und gibt die zu einem bestimmten Zeitpunkt »stehende« Biomasse wieder. Die schwer bestimmbare (daher in der Literatur selten angegebene) echte Assimilat-Investition (»carbon partitioning«, CP; siehe hierzu KÜPPERS 1994, TIMM et al. 2004 für Wildpflanzen) – also die Bilanz der jährlichen Assimilatflüsse in bestimmte Organe – ausgedrückt als % der Jahresbilanz der CO₂-Assimilation, ergibt wesentlich andere Werte als die jeweils vorhandene Biomasse der einzelnen Organe, da diverse Atmungsverluste auftreten, Akkumulation von Biomasse bei gleicher Investition (z.B. Stammbildung) oder aber durch erhöhten Organumsatz (also z.B. Laubfall, Feinwurzel-Umsatz) Biomasseverluste auftreten.

Die tatsächliche Investition an Assimilaten in die

Blätter beträgt bei laubwerfenden Holzgewächsen etwa 10–20% (KÜPPERS 1985), ihr Anteil an der stehenden Biomasse aber nur etwa 1–2%. Im Holz der Bäume ist bis zu 70% der Biomasse gespeichert, bei Kräutern hingegen enthält die Sprossachse oft wesentlich weniger Biomasse als Blätter und Wurzeln.

Pflanzen in Trockengebieten müssen in aller Regel einen wesentlich größeren Anteil ihrer Produktion zur Aufrechterhaltung eines weitreichenden, leistungsfähigen Wurzelsystems einsetzen, um die Wasserversorgung abzusichern. Das Verhältnis von ober- zu unterirdischer Biomasse verschiebt sich daher bei Steppen- und Wüstenpflanzen stark zugunsten des Wurzelsystems. Sie wachsen langsamer, da der nur über die Blätter erzielbare Zinseszinsseffekt viel geringer ausfällt.

Für die Produktion an Phytomasse, abzüglich der Atmungsverluste (Netto-Primärproduktion NPP) gibt Tab. 4.10-1 einige Beispiele. Bei Nutzpflanzen wird ein bestimmtes Organ, also nur ein kleiner Teil der Gesamtproduktion der Pflanze geerntet und genutzt. Dieser prozentuale Anteil wird oft mit dem Harvest-Index (HI) quantifiziert. Er besagt, wieviel gewünschtes Erntegut, bezogen auf die NPP, erzeugt wird. Dies kann bei ein und derselben Pflanze sehr unterschiedlich sein, je nachdem, welches Ernteziel angestrebt ist: Will man Sonnenblumenkerne ernten, dann sind dies vielleicht 5–10% der Gesamtproduktivität der Sonnenblume, will man davon Sonnenblumenöl gewinnen, dann sind dies 1–2%. Will man die Biomasse über Silage verwerten, dann können dies über 90% nutzbare Biomasse sein. Der HI muss also genau definiert werden. Bei der Buche ist der HI bezüglich Buchenholz natürlich viel höher als wenn man Bucheckern ernten möchte. Ersteres kann man allerdings nur einmal, letzteres in jedem Mastjahr. Bei der Sonnenblume - eine einjährige Kultur - muss jedes Jahr neu ausgesät werden.

Ein wichtiger Aspekt kann in Zukunft die Nutzung großer Anbauflächen für Biotreibstoff sein (VORHOLZ

Tab. 4.10-1: Jahres-Netto-Primärproduktion (nach JONES 1992, LARCHER 2001) auf Bodenfläche bezogen in t/(ha×Jahr) und Spross-/Wurzelverhältnisse (kg/kg »stehende Trockenmasse«, nach diversen Quellen).

	Jahres-Netto-Primärproduktion	Spross-/Wurzelverhältnisse
in 360 Tagen = 1 Jahr (Vegetationsperiode)		
Wüste	0,03-0,2	0,02-2
Wiese (gemäßigte Zone)	5-20	2-5
Zuckerrohr-Plantage	25-75	5-20
Gemäßigter sommergrüner Wald	4-25	5-20
in 120 Tagen (Vegetationsperiode)		
Kartoffel	15	2-5
Reis	30	15-30
Getreide (gemäßigte Zone)	20	5-20

2004), da in diesem Falle die gesamte Biomasse als Nutzmasse verfügbar wird und nicht nur ein einzelnes Ertragsorgan wie beim Rapsöl. Ob sich dies auch bei einer kritischen Energie-Bilanzrechnung bestätigt, ist noch umstritten. Wird nicht nur ein bestimmter Teil eines Pflanzenorgans genutzt (wie das Öl beim Raps), sondern die gesamte Pflanzenbiomasse gerntet, dann ist $HI = 100\%$.

Die bisher betrachteten Kenngrößen (WUE, CP und HI) sind zwar ökophysiologisch wichtig, sagen aber noch wenig über die auf einer bestimmten landwirtschaftlichen Nutzfläche mögliche Erzeugung aus. Dafür sind Hektar-Erträge die geeignete Größe. Der Kornertrag von Sonnenblumen liegt zwischen 0,4 und 3,2 t/(ha×Jahr), für Weizen bei 3,5, für Reis bei 4,9 und für Mais bei 6,3 t/(ha×Jahr). Diese Angaben von LOOMIS (1983) und SCHUSTER (1993) gelten jedoch für gute Anbaubedingungen.

Geht es aber um wassersparenden Anbau in Trockengebieten, dann wird sofort die verfügbare Wassermenge (und deren Preis) zum limitierenden Faktor. Letztendlich bestimmt also die Produktion pro Landfläche, bezogen auf die dort eingesetzte Wassermenge, die Möglichkeiten, in Trockengebieten überhaupt Landwirtschaft zu betreiben. Die entscheidende Größe ist daher der Bezug der Ertragsdaten auf den jeweiligen Wasserverbrauch. Dabei kann unter Umständen das Paradox auftreten, dass eine Nutzpflanze oder Anbaurasse mit besserem WUE sich bezüglich des Wasserverbrauchs und der damit erzielbaren gesamten Ernteerträge schlechter stellt als eine andere mit geringerem WUE. Der Wasserverbrauch lässt sich dabei unterteilen in Evaporations- (ohne direkte pflanzliche Beteiligung) und in Transpirationsverluste (direkte pflanzliche Wasserabgabe).

Aus dem Gesagten wird sofort klar, dass mit einer ausgeklügelten Landtechnik, die die Evaporationsverluste minimiert, in der Landwirtschaft bezüglich der Wassereffizienz besonders große Erfolge erzielt werden können. Solche Techniken, etwa durch unterirdische Tröpfchenbewässerung, durch Abdeckung der Feldflächen mit Plastikfolie, oder mit Lavagrus (Teneriffa) oder Sand führten lokal zu zusätzlichen Erfolgen. Steht Brauchwasser aus nahegelegenen Siedlungen und Städten zur Verfügung, so kann dies über den Wasserpreis zu ganz anderen Optimierungsmöglichkeiten (unter Beachtung von »trade offs«, Kosten-Nutzen-Analysen, Arbeitskosten, Fruchtqualität etc.) führen (BRECKLE et al. 2003) als nur die landtechnische Betrachtung. Auch optimierte Bestandsstrukturen (Schattenbäume, optimierte Selbstbeschattung) tragen ganz erheblich zur Senkung von Evapotranspiration (Beschattung des Bodens, dadurch geringere Bodentemperatur) und Transpiration (geringere Blatttempe-

ratur in dynamischem Licht (RODEN & PEARCY 1993) bei gleicher Photosyntheseleistung (KIRSCHBAUM et al. 1998) bei. Somit muss auch die Züchtung von Nutzpflanzen dringend weiter verfolgt werden, die bei geringerer Transpiration auch bei hohen Temperaturen mehr Ertrag bringen, eine bessere WUE einerseits und einen besseren HI andererseits aufweisen.

Hitzeresistenz von Nutzpflanzen und Pflanzenzüchtung

Bei hohen Temperaturen (oberhalb 42–45° C) wird das Wachstum von Pflanzen und damit die NPP durch disharmonische Verschiebungen in den Stoffwechselprozessen, durch beginnende Denaturierungen von Proteinen (dazu gehören auch die Enzyme, die den Stoffwechsel steuern) und insbesondere durch die überproportionale Zunahme der Atmungsverluste an CO₂ im Vergleich zur abnehmenden Assimilationsleistung eingeschränkt. Hitze verursacht zudem erhöhte Wasserverluste von Pflanze und Boden und verstärkt damit die Dürreeffekte.

Natürlicherweise spielt die Transpirationskühlung eine gewisse Rolle, setzt aber ausreichende Wasserverfügbarkeit im Boden voraus. Man muss auch berücksichtigen, dass nicht die umgebende Lufttemperatur (von beispielsweise 42°C) entscheidend ist, sondern die Temperatur im Blatt, die durchaus bei Windstille um 10–15°C höher liegen kann. Und dann sind die Resistenzgrenzen (Tab. 4.10-2) sehr schnell erreicht. Man kann daraus schließen, dass es artspezifische unterschiedlich hohe Optimal- und Maximaltemperaturen für Stoffwechselprozesse und das Wachstum der Pflanzen gibt. Dies hängt eng damit zusammen, dass sich auch die thermische Stabilität von Zellstrukturen (Membranen, Organelle) von Art zu Art unterscheidet.

Besonderes Interesse hat sich auf die Hitzeschockproteine gerichtet (auch als Chaperone bezeichnet). Sie

Tab. 4.10-2: Hitzeresistenz der Blätter einiger Sprosspflanzen aus verschiedenen Klimaten (50% Schädigung nach halbstündiger Hitzebehandlung) (aus LARCHER 2001).

<i>Tropische Bäume</i>	45–55°C
<i>Krautige Mesophyten</i>	40–52°C
<i>Subtropische Palmen</i>	55–60°C
<i>Steppengräser</i>	60–65°C
<i>Sukkulente</i>	58–67°C
<i>Wasserpflanzen</i>	38–44°C
<i>C4-Gräser</i>	60–64°C
<i>Boreale Laubbäume</i>	42–45°C
<i>Sommergrüne Bäume</i>	um 50°C
<i>Nadelhölzer der Taiga</i>	44–50°C

bilden sich bei besonders schnellem Temperaturanstieg im bereits über-optimalen Temperaturbereich. Sie bewirken eine Toleranz gegen höhere Temperaturen und besitzen wohl eine gewisse Schutzfunktion für Enzyme und Membranen. In Pflanzen findet man fast stets etwa 20 Erbanlagen für Chaperone, die fein abgestuft gesteuert werden (WANDTNER 2002). Eine solche erworbene Thermo-Toleranz könnte für Nutzpflanzen in Zukunft durch Einführung bestimmter Gene züchterisch bedeutsam werden. Allerdings lässt sich die physikalisch bedingte Transpiration hierdurch nicht beeinflussen, weshalb optimierte (Selbst-)Beschattungseffekte ein ebenso wichtiges (züchterisches) Ziel zur Senkung von Blatttemperaturen sein müssen, was erreicht werden kann durch veränderte Blattanordnungen.

Dürre-resistenz von Nutzpflanzen und Pflanzenzüchtung

Neben der Hitze- muss auch an die züchterische Möglichkeit der Erhöhung der Dürre-resistenz gedacht werden. Durch klassische Züchtungen sind in den vergangenen Jahrzehnten eine Fülle neuer Kultivare von Reis entstanden (SMIL 2000), die die sehr unterschiedlichen Standortsanforderungen in den verschiedenen Ländern besser erfüllen. Allerdings hat sich auch hier gezeigt, dass nicht nur neue Sorten, sondern auch eine an verkürzte Vegetationszeiten angepasste Landtechnik und damit bessere Rotationssysteme (bis zu 3 Ernten im Jahr) zusätzliche Erfolge in der Produktivitätssteigerung ermöglichen. Eine breitere Palette angepasster Nutzpflanzenrassen wird in Zukunft erforderlich sein.

Im 20. Jahrhundert hat sich in den gemäßigten

Klimaten das Kornertragspotenzial des Weizens trotz konstanter Biomasse-Gesamtproduktion (bzw. konstantem NPP) vor allem durch Züchtung neuer Rassen mit größerem HI (geringere Investition in den Spross, d.h. geringere Sprosshöhe) wesentlich steigern lassen. Dabei ist zu hoffen, dass die Züchtung dürre-resistenterer Sorten weitere Erfolge bringt, obwohl dadurch der Kornertrag niedriger wird, aber Ernten unter Dürrebedingungen eben überhaupt erst ermöglicht.

Im Gegensatz hierzu steht der Mais (*Zea mays*), mit dem in den USA durch neue Sorten mit einer stark erhöhten Produktivität bei höheren Aussaatdichten sehr hohe Erträge erzielt werden (GREFE 2004). Jedoch setzt in Trockenregionen der Wassermangel noch immer enge Grenzen. Unabhängig von den bisherigen Züchtungserfolgen liegt im Bereich des CP noch immer ein hohes züchterisches Potenzial. Beim Mais ist der HI für die meisten Sorten seit etwa 1930 nicht höher als ca. 0,5 (Zuckerrohr: 0,85). Der HI ist offensichtlich eine sehr konstante vererbare Größe, die jedoch unter Stressbedingungen enorm absinkt.

Als Beispiel einer dürre-resistenten Art gilt das als Mohrenhirse oder Kaffernkorn (*Sorghum bicolor*) bezeichnete C4-Gras, welches als die wichtigste Hirseart eine bedeutende Weltwirtschaftspflanze ist (Abb. 4.10-2). Es stammt aus Äquatorialafrika und wird heute in allen warmen Ländern angebaut. In den Südstaaten der USA hat sich seine Anbaufläche während der letzten 45 Jahre verdoppelt und der Ertrag vervierfacht. Dieses Gras transpiriert nur wenig und vermag bei Wassermangel unter Wachstumsstillstand in eine Art Trockenstarre überzugehen, aus der es nach Regenfällen rasch zu neuem Wachstum erwacht. In Afrika und Asien liefert



Abb. 4.10-2: *Sorghum bicolor* in einem Feld in China (Photo: SWBr).

es im Mittel 0,98 t Körner/ha, während in den USA vor allem dank der Züchtung von Hybridformen 4,2 t/ha, bei guter Düngung und Bewässerung sogar schon bis zu 10,0 t/ha erreicht wurden.

Es mag zwar sehr nützlich sein in der Natur neue Nutzpflanzen in Wüsten und Trockengebieten ausfindig zu machen und für züchterische Zwecke zu nutzen, aber man muss bedenken, dass Wüstenpflanzen keine Wachstumsstrategien für hohe Produktivität sondern vielmehr für ein Überleben unter widrigen Bedingungen evoluiert haben. Der Mensch wird in Zukunft gezwungen sein, die Ernte-Erträge der bereits genutzten kommerziellen Pflanzenarten nicht nur durch die konsequente Anwendung der traditionellen Anbauweisen, sondern auch durch Anwendung moderner Züchtungstechniken zu verbessern.

Eine der wichtigsten traditionellen Getreidearten und Nahrungspflanzen ist Reis (*Oryza sativa*, Abb. 4.10-3), dessen Beetbewässerung (Nassreis) jedoch noch immer viel Wasser verbraucht und unter den anaeroben Bedingungen Methan in die Atmosphäre abgibt, ein unerwünschter Verlust an organischem Material und noch schlimmer, es ist dies ein sehr effektives Treibhausgas in der Atmosphäre. Hier sind in letzter Zeit große Fortschritte in einer verbesserten Anbauweise erzielt, aber noch kaum großflächig in die Praxis umgesetzt worden. Bei einer Jahres-Weltproduktion von 600 Mio. t nimmt Reis für die Ernährung der Menschheit den ersten Platz unter den Getreiden ein. Reis wird primär für den menschlichen Konsum gebraucht, und nur wenig wird als Futtermittel verwendet. Da man aus Reis kein Brot backen kann, wird er in Form gekochter Körner oder als Brei konsumiert. Reis ist leicht verdau-

lich und gut haltbar.

Grundsätzlich unterscheidet man im Anbau zwischen Nassreis und Trockenreis. Beim Nassreis wird oft mit Saatbeeten und Umpflanzen gearbeitet oder aber mit Direktsaat in einerseits durch Regenwasser gefüllte Felder oder durch künstliche Bewässerung gefüllte Felder. Beim Trockenfeldreis wendet man meist Direktsaat oder Umpflanzen in der Regenzeit in nicht mit Wasser überstaubare, meist geneigte Äcker an (SCHMID-SANDHERR: www.swisseduc.ch, 2010). Die Erträge bei Anbau von Nassreis sind bedeutend größer als bei Trockenreis. Auch kann man je nach Klimazone und Wasserverfügbarkeit bei künstlicher Bewässerung bis zu drei Ernten im gleichen Jahr einbringen. Das Internationale Reiserforschungsinstitut auf den Philippinen (IRRI) verfolgt das Ziel, durch Entwicklung von Hohertrags- und umwelttoleranten Sorten die Reisproduktion in Asien so zu steigern, dass sie schneller wächst als die Bevölkerung. In einer Saatgutbank werden über 100.000 Reissorten gelagert und für Kreuzungszwecke gebraucht. Nach guten Erfolgen wird das Erreichen des Züchtungs-Zieles zunehmend schwieriger, da kaum mehr neue bewässerbare Felder geschaffen werden können und eine flächenmäßige Expansion nur im Bereich des Trockenreis noch möglich ist. Der durchschnittliche Hektarertrag liegt heute bei 3,9 t, in ärmeren Ländern oft nur bei 2 t, in hoch entwickelten, wie etwa Japan, bei 8 t. Verschiedene Schädlinge und Pflanzenkrankheiten bedrohen die Reiskulturen. Da man nicht immer mehr Insektizide und Pestizide spritzen sollte, ist die Züchtung von resistenten Sorten wichtiger geworden als die von wassersparenden Sorten und entsprechender Techniken.

Ein interessanter Nutzbau in Trockenregionen



Abb. 4.10-3: Reis (*Oryza sativa*) verbraucht sehr viel Wasser. Das Wachstum ist sehr groß, die Ernteerträge sind hoch wie auch die Erträge pro Hektar (Photo: SWBR, Uzbekistan 2008).

ist *Elaeagnus oxycarpa* (Ölweide oder russische Oliven) (Abb. 4.10-4). Sie ist eine kleine Baumart, die in Zentralasien oft gepflanzt wird (so wie andere Arten von Ölweiden). Sie fixiert Stickstoff durch Frankia-Wurzelknöllchen und ist ziemlich frost-, hitze-, dürre- und auch etwas salzresistent. Die Früchte sind reich

an Kohlenhydraten und werden wie Stärke aber auch wie Zucker genutzt. Sie ist ein Baum für Regionen, in denen Ackerbau aus edaphischen oder klimatischen Gründen kaum mehr möglich ist.

Der Anbau anderer Baumarten aus den Tropen, wie etwa *Mango mangifera*, Abb. 4.10-5, hat den Nach-



Abb. 4.10-4: Ölweide oder Russische Oliven (*Elaeagnus angustifolia*, *E. oxycarpa*) werden in vielen Regionen Zentral-Asiens wegen ihrer Früchte kultiviert (Photo: SWBr, Uzbekistan).



Abb. 4.10-5: Mango (*Mangifera indica*). Junge Bäume auf einer neuangelegten Plantage in der Sinai-Wüste (Ägypten) zeigen starke Schäden durch Hitze-, Dürre- und Salzstress (Photo: SWBr).

teil, dass gelegentliche Fröste den Anbau unmöglich machen und auch Schäden durch zu große Hitze und Salinität durch überschüssige Bewässerung kaum gemildert werden können.

In allen diesen Beispielen werden nur die Früchte oder Samen, also ein bestimmtes Organ der Pflanze bei der Ernte genutzt (Abb. 4.10-3, -5, -8 und -9). In anderen kommerziellen Nutzpflanzen, wie Baumwolle (*Gossypium*), nutzt man das Öl der Samen; aber insbesondere die Samenhaare sind es hier, die die große wirtschaftliche Bedeutung als Fasern für Textilien haben (Abb. 4.10-6) und ebenfalls nur wenige % der NPP ausmachen.

Grundlagen der Landwirtschaft in Trockengebieten, des Bewässerungslandbaus und die Versalzungsfahr

Große Regionen der Trockengebiete auf der Erde weisen hohe Temperaturen und ein sehr niedriges Bodenwasserangebot auf. Aufgrund der geringen Niederschläge und der hohen Verdunstungsrate ist ständig die Gefahr der Versalzung gegeben. Nur die hohe Einstrahlung ist eine gute Voraussetzung für eine mögliche hohe Produktivität. Landwirtschaft ist aber nur dort möglich, wo regelmäßige Regenzeiten auftreten. Man kann in Trockengebieten mit einer solchen definierten Regenzeit (z.B. in Zentral-, Süd- und Südost-Asien, im Mittelmeergebiet, in Kalifornien) auch Regenfeldbau betreiben, wie er schon vor Jahrhunderten mit ausgeklügelten Methoden erfolgte (»runoff farming«, z.B. für die Nabatäer-Stadt Avdat im Negev, 300 v. Chr. – 100 n. Chr.) (EVENARI et al. 1982). Der Regenfeldbau ist jedoch arbeitsintensiv, und seine Flächenerträge sind sehr niedrig, obwohl die Effizienz des Wasserverbrauchs sehr hoch sein kann (»lalmi«-Anbau in Afghanistan, Tadjikistan). Für die Intensivlandwirtschaft ist man in Trockengebieten daher stets völlig auf künstliche Bewässerung angewiesen.

Heutige Bewässerungssysteme haben oft einen Wirkungsgrad von weit unter 50%, d.h. kaum die Hälfte des eingesetzten Bewässerungswassers erreicht die Feldfläche bzw. den Wurzelbereich der Nutzpflanzen. Würden China, Indien und Pakistan, die etwa die Hälfte der bewässerten Landwirtschaftsfläche der Erde aufweisen, die Becken- und Furchen-Bewässerung (Abb. 4.10-7) auf Beregnung (Abb. 4.10-8) oder gar Tröpfchenbewässerung (Abb. 4.10-9) umstellen, würde dies den Wassermangel dieser Länder weitgehend beheben. Vergleichszahlen der erforderlichen Wassermengen unter den extrem ariden Bedingungen in Ägypten (Tab. 4.10-3) bestätigen dies.

Tab. 4.10-3: Die in einem Monat für Bewässerung erforderlichen Wassermengen (m^3 pro ha = 0,1mm) verschiedener Feldfrüchte in Ägypten bei verschiedenen Bewässerungsmethoden (nach SPRINGUEL 2003).

Feldfrucht	Furchenbewässerung	Beregnung	Tröpfchenbewässerung
Weizen	1850	1060	
Ackerbohne	1240		810
Mais	1790		950
Sonnenblumen	2380		1980
Tomaten	1190		950
Weintrauben	500		380
Citrus	790		400

In ariden Klimaten, geomorphologisch erkennbar an der Ausbildung endorrheischer Becken ohne Ozeananschluss (z.B. Totes Meer, Aralsee, Großer Salzsee, Tschadsee, Lago Enriquillo, Salar de Uyuni, etc.) überwiegt die potentielle Evaporation den Niederschlag. Alle gelösten Salze, die in das Gebiet gelangen (über den Regen, durch Oberflächenabfluss, Auslaugung der Gesteine) verbleiben im Gebiet und bedingen im Laufe der Zeit durch Akkumulation eine natürliche Versalzung.

Bewässerungsflächen unterliegen dieser Gesetzmäßigkeit gleichermaßen. Wird jährlich etwa $1m^3$ pro m^2 bewässert, also 1.000 mm, so führt dies bei einem Gehalt von 300 ppm NaCl im Wasser (ein relativ niedriger Wert; Euphrat: 300–900, Nil: 200–400, Colorado: 600, Arkansas: 3.000 ppm) unweigerlich zur allmählichen Versalzung der Bewässerungsflächen (KREEB 1964).

Die Modellrechnung ergibt 3 kg NaCl pro m^2 nach 10 Jahren. Bei einem Bodengewicht von $1.500 kg/m^3$ und einer Anreicherung der Salze im oberen Bodenhorizont (0–20 cm) sind dies nach 10 Jahren 0,1% Salzgehalt, nach 30 Jahren bereits 0,3%. In der Landwirtschaft sind 0,3% Salz deutlich ertragsmindernd (wie viele große Entwicklungsprojekte nach 30 Jahren zeigen), wenn eben, um Geld zu sparen, die alte Regel »Keine Bewässerung, ohne Entwässerung« missachtet wird: Dies wird noch wichtiger, wenn in Zukunft neben Regenwasser auch Brauchwasser der Siedlungen mit höheren Feststoffgehalten für Bewässerung eingesetzt wird.

Schlussbetrachtung

Bisherige landtechnische Verfahren haben bereits gezeigt, dass ein sehr wassersparender Anbau möglich ist. Der Anbau angepasster Nutzpflanzen mit Technologien zur Verminderung der Evaporationsverluste sind wichtige Wege zur Minimierung des Wasserverbrauchs. Die wasserverbrauchsgesteuerte Tröpfchen-Bewässerung einiger israelischer Farmen, die Nutzung von Sandbeeten, in denen die kapillaren Wasserfäden durch eine Sandbedeckung von etwa 10cm Mächtigkeit unterbrochen sind und damit die Evaporationsverluste drastisch

sinken, ähnlich, wie in den mit Vulkanschlacke bedeckten Bananefeldern auf Teneriffa, sind landtechnische Methoden, die im Verein mit geeigneten Nutzpflanzen einen auf maximale Wassereinsparung optimierten Anbau ermöglichen.

Darüberhinaus ist auch an Techniken der Wasserrückführung zu denken, wie sie in speziellen Gewächshäusern, Pflanzentürmen und Folientunneln möglich ist, wo nahezu das gesamte Evaporations- und Transpirationswasser aufgesammelt und wieder verwendet werden kann. Bei diesen allerdings teuren Intensivkulturen ergeben sich aber sehr hohe Ausbeuten der nutzbaren Früchte oder Pflanzenorgane bezüglich des Wasserverbrauchs.

Die Techniken der Düngung mit CO_2 haben den Vorteil, dass die Nutzpflanzen ihre Stomata nur teilweise öffnen – sie nehmen damit noch genügend CO_2

auf, geben aber weniger Wasserdampf ab – sie erlauben damit den Anbau auch mit geringerem Wasserangebot. Dazu kommt, dass die Pflanzen unter erhöhtem CO_2 -Angebot auch weniger Stomata an den Blättern ausbilden. Beides führt dazu, dass solche Pflanzen geringere Transpirationsraten aufweisen, damit steigt der Kohlenstoffgewinn pro verbrauchter Wassermenge (WUE) an (WITTEW 1997, CONLEY et al. 2001), wie auch die Resistenz gegen Wassermangel.

Die Landwirtschaft steht in Zukunft zunehmend vor der Herausforderung, ihre Produktion zu steigern (SMIL 2000), jedoch jeweils fein angepasst an die unterschiedlichsten Standortverhältnisse und regionalen Gegebenheiten. Riesige Flächen der ariden Gebiete weisen Wassermangel, aber keinen Lichtmangel auf. Das züchterische Potential einer optimierten Lichtausbeute bei moderatem Wasserverbrauch ist für viele



Abb. 4.10-6: Baumwollfeld (*Gossypium*) und Baumwollernte in Uzbekistan. Baumwolle ist eine der wichtigsten kommerziellen Nutzpflanzen und ein gefragtes Handelsgut als Rohstoff für die Textilindustrie. Die Pflanzen sind ziemlich trocken- und hitzeresistent (Photo: SWBr).



Abb. 4.10-7: Kartoffeln (*Solanum tuberosum*) angebaut mit Furchenbewässerung in Tunesien. Die Wasserverluste sind sehr hoch, nur ein kleiner Teil des eingesetzten Wassers kommt den Pflanzen zugute. Demgemäß ist die Versalzungsgefahr sehr hoch (Photo: SWBr, Djerba).

Nutzpflanzen noch nicht ausgeschöpft. Zu große Erwartungen beim Einsatz neuer dürre- oder/und hitze-resistenter Nutzpflanzen sind aber fehl am Platze. Sowohl für die Nutzung hitze- als auch dürre-resistenter Kulturpflanzen werden auch in Zukunft entsprechende pflanzenbauliche Maßnahmen eine wichtige Voraussetzung sein. Dazu gehört natürlich die richtige Wahl der Kulturrasse, aber auch die optimale Pflanzdichte, die Strahlungsabschirmung im Bestand, Reihenausrichtung, Beschattung durch ergänzende Agroforstbepflanzung, Einsatz von Bodenbedeckung, die optimale Bewässerung unter Minimierung der Evaporationsverluste, die richtige Wahl der Vegetationszeiten (evtl. unter Einsatz von Genotypen mit kurzer Vegetationszeit, wie dies vom Mais seit einiger Zeit bekannt ist) und die richtige Wahl der Standorte bezüglich Hanglage, Wasserverfügbarkeit, Windrichtung usw. Aber nicht

nur wassersparende und hitzeangepasste Pflanzen, auch ein wassersparender Anbau, ein verbrauchsgesteuerter Düngereinsatz und eine optimale Landtechnik mit verbesserter Bewässerung führen zum Ziel.

Neben dem Bedarf an Wasser erfordert Intensivlandwirtschaft auch einen erhöhten Einsatz an Düngemitteln, insbesondere Stickstoff. Ohne das (energieverschlingende) Haber-Bosch-Verfahren zur Bindung von Luftstickstoff wäre die heutige Landwirtschaft weltweit nicht denkbar. Die N-Menge, die durch die Düngemittelindustrie umgesetzt wird, erreicht heute bereits die gesamte Menge der durch natürliche N-Bindungsprozesse (Knöllchenbakterien, Bodenbakterien, elektrische Entladungen wie Blitze etc.) festgelegten N-Mengen (SMIL 2001). Die zukünftige Landwirtschaft muss demgemäß nicht nur an eine Optimierung der Wassermengen, sondern auch an eine Optimierung bei



Abb. 4.10-8: Weintrauben (*Vitis vinifera*), hier mit Beregnung in Zentral-Spanien. Zwar sind die Wasserverluste durch Evaporation hoch, aber die Bewässerung kann dem Bedarf der Pflanzen gut angepaßt werden und ist damit meist sehr wirtschaftlich (Photo: SWBr, Spain)



Abb. 4.10-9: Tröpfchen-Bewässerung ist sicher eine der effizientesten Bewässerungsmethoden, um die Nutzpflanzen nur mit der Wassermenge zu versorgen, die diese für ein gutes Wachstum tatsächlich brauchen. Dies wird vielfach in Israel, aber auch anderswo angewandt, wie etwa hier bei Weintrauben in Südafrika (Photo: Maik Veste, S-Africa).

der Nutzung der Nährstoffe und der Mineralstoffeffizienz denken; darauf kann hier nicht näher eingegangen werden, beide Optimierungsprozesse sind jedoch nicht isoliert zu sehen.

Ein Hauptproblem sind die langen Transportwege und die Wasserzufuhr über große Entfernungen. Die Nutzung dürre- und hitzeresistenter Nutzpflanzen in ariden Gebieten der Erde wird in Zukunft immer wichtiger werden. Aber nicht nur ein, sondern mehrere Wege gemeinsam führen zum Ziel.

Literatur

- BACON M.A. (ed) (2004): Water Use Efficiency in Plants. 1st edition, Wiley. 344 pp.
- BRECKLE S.W., HAVERKAMP M., SCHEFFER A. & VESTE M. (eds.) (2003): Ökologische Optimierung der Wassernutzung bei Bewässerungsverfahren mit salzhaltigem Wasser in ariden Gebieten. Bielefelder Ökologische Beiträge 16, 108 pp.
- CONLEY M.M., KIMBALL B.A., BROOKS T.J., et al (2001): CO₂ enrichment increases water-use efficiency in sorghum. *New Phytologist* 151: 407-412.
- EVENARI M., SHANAN L. & TADMOR N. (1982): The Negev. The challenge of a desert. Cambridge, Mass. 2.ed. 437 pp.
- FREEDEN A.L., GAMON J.A. & FIELD C.B. (1991): Responses of photosynthesis and carbohydrate-partitioning to limitations in nitrogen and water availability in field-grown sunflower. *Plant Cell Environ* 14: 963-970.
- GREFE C. (2004): Mais für die Welt. *Die Zeit* (19. 08. 2004) 35: 11-14.
- JONES H.G. (1992): Plants and microclimate. Cambridge University Press, 2nd ed. 212 pp.
- KIRSCHBAUM M.U.F., KÜPPERS M., SCHNEIDER H, et al. (1998): Modelling photosynthesis in fluctuating light with inclusion of stomatal conductance, biochemical activation and pools of key photosynthetic intermediates. *Planta* 204, 16-26.
- KREEB K. (1964): Ökologische Grundlagen der Bewässerungskulturen in den Subtropen. Fischer, Stuttgart 157 pp.
- KÜPPERS M. (1985): Carbon relations and competition between woody species in a Central European hedgerow. IV. Growth form and partitioning. *Oecologia* 66: 343-352.
- KÜPPERS M. (1994): Canopy gaps: Competitive light interception and economic space filling – a matter of whole plant allocation. In: Caldwell MM, Pearcy RW (eds): Exploitation of environmental heterogeneity by plants: ecophysiological processes above and below ground. Acad Press, San Diego, New York. 111-144.
- LARCHER W. (2001): Ökophysiologie der Pflanzen. UTB Ulmer, Stuttgart, 6. Aufl., 408 pp.
- LOOMIS R.S. (1983): Productivity of agricultural systems. *Encyclopedia of plant physiology* NS, vol. 12D: 151-172.
- LYR H., FIEDLER H.-J. & TRANQUILLINI W. (1992): Physiologie und Ökologie der Gehölze. Fischer, Jena 620 pp.
- RODEN J.S. & PEARCY R.W. (1993): The effect of flutter on the temperature of poplar leaves and its implications for carbon gain. *Plant Cell and Environment* 16, 571-577.
- SCHULZE E.D., KÜPPERS M. & MATYSSEK R. (1986): The roles of carbon balance and branching pattern in the growth of woody species. In: Givnish TJ (ed): On the economy of plant form and function. Cambridge Univ Press, Cambridge UK. 585-602.
- SCHUSTER W.H. (1993): Die Züchtung der Sonnenblume (*Helianthus annuus* L.). Parey, Berlin und Hamburg, 188 pp.
- SMIL V. (2000): Feeding the world. A challenge for the twenty-first century. The MIT Press, Cambridge, MA, 360 pp.
- SMIL V. (2001): Enriching the earth: Fritz Haber, Carl Bosch, and the Transformation of World Food Production. The MIT Press, Cambridge, MA, 339 pp.
- SPRINGUEL I. (2003): Determination and growth model of *Tamarix nilotica shrub* and *balanites aegyptiaca* in Wadi Allaqi, Lake Nasser Area, Aswan, Egypt. In: Breckle et al. (eds): Ökologische Optimierung der Wassernutzung bei Bewässerungsverfahren mit salzhaltigem Wasser in ariden Gebieten. Bielefelder Ökologische Beiträge 16, 45-54.
- STICKEN W., SCHULTE M., KAKUBARI Y., NIEDERSTADT F., SCHENK J. & RUNGE M. (1991): Ökophysiologische und biometrische Untersuchungen in einem Buchenbestand (*Fagus sylvatica* L.) des Sollings als ein Beitrag zur Waldschadensforschung. *Ber. Forschungszentrum Waldökosysteme, Reihe B*, 18: 1-82.
- TIMM H.C., KÜPPERS M. & STEGEMANN J. (2004) Non-destructive analysis of architectural growth, dry matter increment and assimilate allocation in pioneer, mid- and late successional tropical tree saplings: consequences of using steady-state and dynamic photosynthesis models. *Ecotropica* 10/2: 101-121.
- VORHOLZ F. (2004): Revolution im Tank. *Die Zeit*, 08.07.2004.17-18.
- WANDTNER R. (2002): Streßbewältigung bei Tomaten. *FAZ*, 15.06.2002. 48 pp.
- WITTEW S.H. (1997): The global environment: It's good for food production. In: Michaels PJ (ed) State of the climate report: Essays on global climate change. New Hope Environmental Services, New Hope. 8-13.

Prof. Dr. S.-W. Breckle - Dr. Walter Wucherer
Universität Bielefeld - Fak. Biologie Abteilung Ökologie
Wasserfuhr 24/26 - 33619 Bielefeld
sbreckle@gmx.de

Prof. Dr. Manfred Küppers
Universität Hohenheim
Institute für Botanik und Botanischer Garten
Garbenstr. 30 - 70599 Stuttgart
koppers@uni-hohenheim.de