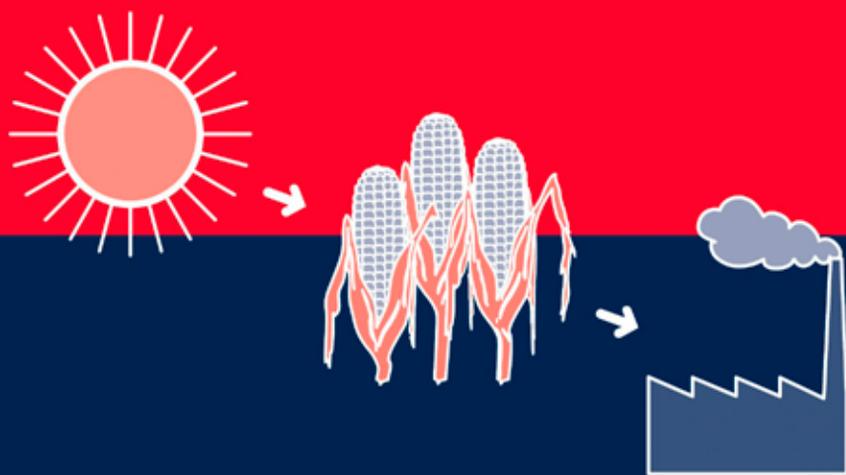


Wulf Diepenbrock

Nachwachsende Rohstoffe



Ulmer

UTB



Eine Arbeitsgemeinschaft der Verlage

Böhlau Verlag · Wien · Köln · Weimar

Verlag Barbara Budrich · Opladen · Toronto

facultas.wuv · Wien

Wilhelm Fink · Paderborn

A. Francke Verlag · Tübingen

Haupt Verlag · Bern

Verlag Julius Klinkhardt · Bad Heilbrunn

Mohr Siebeck · Tübingen

Nomos Verlagsgesellschaft · Baden-Baden

Ernst Reinhardt Verlag · München · Basel

Ferdinand Schöningh · Paderborn

Eugen Ulmer Verlag · Stuttgart

UVK Verlagsgesellschaft · Konstanz, mit UVK/Lucius · München

Vandenhoeck & Ruprecht · Göttingen · Bristol

vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich

Wulf Diepenbrock

Nachwachsende Rohstoffe

43 Abbildungen

44 Tabellen

Verlag Eugen Ulmer Stuttgart

Der Autor: **Prof. Dr. Dr. h. c. Wulf Diepenbrock** war von 1994 bis 2012 Professor für Speziellen Pflanzenbau an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, von 1996 bis 2000 dort Dekan der Landwirtschaftlichen Fakultät und von 2006 bis 2010 Rektor der Universität. Zu seinen Forschungsschwerpunkten gehörten Arbeiten über die Ertragsphysiologie landwirtschaftlicher Kulturpflanzen, Energiebilanzen im Landwirtschaftsbetrieb und Eigenschaften von Pflanzenfasern zur Verarbeitung in Verbundwerkstoffen. 2009 verlieh ihm die Gregor-Mendel-Universität Brunn (Brno) die Ehrendoktorwürde.

Die in diesem Buch enthaltenen Empfehlungen und Angaben sind vom Autor mit größter Sorgfalt zusammengestellt und geprüft worden. Eine Garantie für die Richtigkeit der Angaben kann aber nicht gegeben werden. Autor und Verlag übernehmen keinerlei Haftung für Schäden und Unfälle.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

© 2014 Eugen Ulmer KG
Wollgrasweg 41, 70599 Stuttgart (Hohenheim)
E-Mail: info@ulmer.de
Internet: www.ulmer.de
Lektorat: Werner Baumeister
Herstellung: Jürgen Sprengel
Umschlagentwurf: Atelier Reichert, Stuttgart
Satz: primustype Hurler GmbH, Notzingen
Druck und Bindung: Graphischer Großbetrieb Friedr. Pustet, Regensburg
Printed in Germany

UTB Band-Nr. 4189
ISBN 978-3-8252-4189-6 (Print)
ISBN 978-3-8385-4189-1 (E-Book)

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	9
1 Einführung	11
2 Photosynthese und Stoffwechsel	15
2.1 Photosynthese	15
2.2 Stoffwechsel	24
3 Ertragsbildung und Anbau der Kulturpflanzen	28
3.1 Ertragsbildung	28
3.2 Anbau der Kulturpflanzen	41
3.2.1 Anbauverfahren landwirtschaftlicher Kulturpflanzen	41
3.2.2 Anbausysteme und Fruchtfolgen	51
3.2.3 Anbau und Nutzungsverfahren in der Forstwirtschaft	55
4 Die Energie- und Industriepflanzen	60
4.1 Getreidepflanzen und Gräser	60
4.1.1 Mais (<i>Zea mays</i> L.)	62
4.1.2 <i>Sorghum</i> hirsen	67
4.1.3 Winterweichweizen (<i>Triticum aestivum</i> L.)	69
4.1.4 Winterroggen (<i>Secale cereale</i> L.)	72
4.1.5 Triticale (<i>Triticosecale</i> Wittm.)	75
4.1.6 <i>Miscanthus</i> (<i>Miscanthus</i> spp.)	77
4.1.7 Weitere Gräser	80
4.2 Öl- und Faserpflanzen	82
4.2.1 Winterraps (<i>Brassica napus</i> L.)	84
4.2.2 Sonnenblume (<i>Helianthus annuus</i> L.)	87
4.2.3 Lein (<i>Linum usitatissimum</i> L.)	91
4.2.4 Hanf (<i>Cannabis sativa</i> L.)	93
4.2.5 Sonstige Ölfrüchte	96
4.3 Wurzel- und Knollenfrüchte	99
4.3.1 Zuckerrübe (<i>Beta vulgaris</i> L. <i>altissima</i> Döll)	100
4.3.2 Kartoffel (<i>Solanum tuberosum</i> L.)	103
4.3.3 Topinambur (<i>Helianthus tuberosus</i> L.)	107
4.4 Körnerleguminosen	110
4.4.1 Erbsen (<i>Pisum sativum</i> L.) Ackerbohne (<i>Vicia faba</i> L.) Lupinen (<i>Lupinus</i> spp.)	110
4.5 Heil-, Gewürz- und Färberpflanzen	115
4.6 Holzpflanzen	125
4.6.1 Holzpflanzen des Waldes	126
4.6.2 Holzpflanzen in Kurzumtriebsplantagen	131
4.7 Sonstige Energiepflanzen	134

5	Energie aus Biomasse	139
5.1	Festbrennstoffe	150
5.1.1	Qualität der Festbrennstoffe	150
5.1.2	Energiebereitstellung durch Festbrennstoffe	158
5.2	Biotreibstoffe	163
5.2.1	Bioethanol	163
5.2.2	Pflanzenölkraftstoff und Biodiesel	171
5.2.3	Biokraftstoffe der zweiten Generation	180
5.3	Biogas	185
5.3.1	Arbeitsweise landwirtschaftlicher Biogasanlagen	187
5.3.2	Die Entstehung von Biogas	189
5.3.3	Biogasausbeute	200
5.3.4	Aufbereitung und Verwendung von Biogas	205
5.3.5	Nutzung der Gärreste	210
6	Die Öko- und Energiebilanz	217
6.1	Die Ökobilanz	217
6.2	Beispiel „Treibhauseffekt und klimarelevante Gase“	219
6.3	Das Treibhausgasminderungspotenzial	222
6.4	Die Bilanzierung im Landwirtschaftsbetrieb	224
7	Stoffliche Nutzung von Biomasse	230
7.1	Lignocellulose und Pflanzenfasern	235
7.1.1	Lignocellulose	236
7.1.2	Pflanzenfasern	240
7.2	Öle und Fette	248
7.2.1	Fettsäuren und Modifikationen	248
7.2.2	Verarbeitung und Produkte	252
7.3	Kohlenhydrate	256
7.3.1	Stärke	256
7.3.2	Zucker	268
7.4	Proteine	270
8	Das Konzept der Bioraffinerie	276
9	Die Flächenkonkurrenz - oder dürfen wir nachwachsende Rohstoffe erzeugen, wenn Menschen hungern?	285
	Literaturverzeichnis	291
	Bildquellen	297
	Sachregister	298

„Wir sollten das Öl verlassen, bevor das Öl uns verlässt“

FATIH BIROL, Chefökonom der Internationalen Energieagentur
(IEA), 2008

„Wird derhalben die größte Kunst/Wissenschaft/Fleiß und Einrichtung hiesiger Lande darinnen beruhen / wie eine sothane Conservation und Anbau des Holtzes anzustellen / daß es eine continuiertliche beständige und nachhaltende Nutzung gebe / weilm es eine unentberliche Sache ist / ohne welche das Land in seinem Esse nicht bleiben mag.“

HANS CARL VON CARLOWITZ, eigentlich Johann „Hannß“ Carl von Carlowitz, (* 14. Dezember 1645 in Oberrabenstein bei Chemnitz; † 3. März 1714 in Freiberg, Sachsen) prägte den forstlichen Nachhaltigkeitsbegriff.

Vorwort

Nachwachsende Rohstoffe sind ein Schlüsselthema des 21. Jahrhunderts. Sie sollen unsere Energieversorgung sicherstellen, den Klimawandel aufhalten und unsere Luxusartikel wie Kleidung und Autos ökologisch vertretbar machen. Kurz: Von ihnen wird nicht weniger verlangt, als die Ursehnsucht der Menschheit nach dem Perpetuum mobile zu erfüllen. Die Suche nach dem Perpetuum mobile ist aber ebenso sinnlos wie diejenige nach dem Stein der Weisen oder nach der Quadratur des Kreises.

Was sind also die wahren Hintergründe dieses spannenden Themas? Dieses Buch möchte einen Beitrag zur Beantwortung dieser Frage leisten.

Ausgehend von der Photosynthese, dem Ursprung allen Lebens, erfährt der Leser etwas über das Wachstum und den Anbau der Energie- und Industriepflanzen. Dann werden die Verwendungsmöglichkeiten der Energie aus Biomasse und die überraschend vielseitigen Produkte des „Reaktors Pflanze“ behandelt, welche die breite stoffliche Nutzungspalette von Biomasse erst ausmachen. Die Methodik der Energie- und Ökobilanzierung sowie die ethischen Fragen, welche die Erzeugung nachwachsender Rohstoffe berühren, sind in gesonderten Kapiteln zusammengefasst.

Bei einer solchen inhaltlichen Breite des Stoffes war die Beratung und kritische Durchsicht einzelner Kapitel während der Entstehung des Buches sehr hilfreich. Besonderer Dank gilt - in der Reihenfolge der Gliederung - Dr. B. Kettner, Dr. J. Müller (Photosynthese und Stoffwechsel), Prof. Dr. Iris Lewandowski (Getreidepflanzen und Gräser), Dr. G. Leefken (Holzpflanzen des Waldes), Prof. Dr. M. Pietzsch (Energie aus Biomasse), Dr. M. Effenberger (Biogas), R. Thywissen (Biodiesel), Dr. Bärbel Friedel (stoffliche Nutzung von Biomasse) sowie Prof. Dr. O. Christen und Prof. Dr. D. Rost (Flächenkonkurrenz).

Sehr herzlich danken möchte ich auch den Mitarbeitern des Eugen Ulmer Verlages, namentlich Herrn Werner Baumeister, der meine Gestaltungswünsche mit großem Einsatz aufgenommen und umgesetzt hat.

Halle, im Winter 2013/2014

W. Diepenbrock

1 Einführung

Wer heute über die Sinnhaftigkeit der Erzeugung nachwachsender Rohstoffe streitet, übersieht häufig, dass in präindustriellen Gesellschaften Pflanzen und Tiere die bedeutendste Quelle für die Gewinnung der lebensnotwendigen Mengen an Energie und für die Herstellung von Kleidung, Behausung, Werkzeugen sowie Materialien des täglichen Bedarfs waren.

Nachwachsende Rohstoffe sind organische Stoffe aus der Land- und Forstwirtschaft, die energetisch oder stofflich genutzt werden.

Erst mit der industriellen Revolution wurden diese Rohstoffe durch die Erschließung billiger fossiler Ressourcen ersetzt bzw. verdrängt. Diese waren leichter verfügbar, hatten eine standardisierte Zusammensetzung und waren für den globalen Transport von den Fundstätten zum Ort des Verbrauchs sehr gut geeignet.

Rückbesinnung auf NaWaRos

Seit der ersten weltweiten Ölkrise im Jahre 1973 hatte sich die Sicht auf die Nutzung nachwachsender Rohstoffe aber gewandelt, das Thema plötzlich wieder Konjunktur. Folgende Argumente und Begründungen führten zu einer Rückbesinnung:

- Fossile Ressourcen sind nicht unendlich vorhanden und werden in absehbarer Zeit erschöpft sein. Fest steht heute, dass die statische Reichweite unserer fossilen Rohstoffe auf die nächsten zwei bis drei Generationen beschränkt ist. So dürften Erdöl noch 41 Jahre, Gas 67 Jahre und Kohle 164 Jahre reichen (BUSCH et al. 2006).
- Der schnell fortschreitende Verbrauch fossiler Kohlenstoffvorkommen und deren Verwendung zur Energiegewinnung reichert die Atmosphäre mit CO₂ an. Dies führt über den „Treibhauseffekt“ zu klimatischen Veränderungen, die sich besonders auf die Landnutzung auswirken.
- Nicht wieder verwertbare und biologisch nicht abbaubare Kunststoffe vergrößern das Abfallaufkommen. Deshalb wird die Verwendung von recycelbaren Naturstoffen angestrebt.
- Umwelt- und gesundheitsgefährdende Produkte wie Mineralöle, synthetische Pflanzenschutzmittel oder Asbest können durch Bioprodukte ersetzt werden, die keine Auswirkungen auf das Ökosystem haben und sich in die natürlichen Stoffkreisläufe einpassen.
- Durch den Anbau von Rohstoff- und Energiepflanzen können einseitige Fruchtfolgen aufgelockert werden, was zu einer Bereicherung der Kulturlandschaft sowie zum Klima- und Ressourcenschutz beiträgt.

- Mehrjährige Nutzpflanzen, die bisher nicht im Anbau waren, verbessern den Boden, weil dieser weniger bearbeitet werden muss. Dadurch kann sich mehr wertvoller Humus aufbauen. Außerdem bieten sie für zahlreiche Nützlinge im Winter Unterschlupf; eine ökologische Aufwertung landwirtschaftlich genutzter Räume ist die Folge.

Widerstreitende Gutachten

In letzter Zeit hat sich ein Spannungsfeld divergierender Interessen und Auffassungen zur energetischen Nutzung von Biomasse aufgetan.

Die Studien des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), in Deutschland auch Weltklimarat genannt, weisen auf den anthropogenen Klimawandel hin und entwickelten Szenarien zu Treibhausgas-Emissionen mit entsprechenden Warnstufen. Auf dieser Grundlage und insbesondere motiviert durch die „Energiewende“ hat die deutsche Bundesregierung ambitionierte Ausbaupläne für die Nutzung von Bioenergie entwickelt (Bundesregierung 2011). So könnten im Jahre 2050 bis zu 23 % des Primärenergiebedarfs aus Biomasse gedeckt werden.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

Der Weltklimarat ist eine zwischenstaatliche Institution, die es sich zur Aufgabe gemacht hat, die Risiken der globalen Klimaerwärmung einzuschätzen sowie Vermeidungs- und Anpassungsstrategien zu evaluieren. Forscher der weltweiten wissenschaftlichen Gemeinschaft erstellen Sachstandsberichte, die politischen Entscheidungsträgern den aktuellen Stand des Wissens zugänglich machen.

Im Gegensatz dazu kamen 20 Wissenschaftler der Leopoldina (Nationale Akademie der Wissenschaften) in ihrem neuesten Gutachten zu der Auffassung, dass die Reduzierung des Verbrauchs von fossilen Brennstoffen und der Emissionen von Treibhausgasen wie Kohlendioxid – CO₂, Methan – CH₄ oder Distickstoffoxid – N₂O durch den Ausbau von Bioenergie nicht gelingen wird (Leopoldina 2012). Als Gründe wurden benannt die geringe Flächeneffizienz, Treibhausgas-Emissionen im Produktionsverfahren und andere Umweltbeeinträchtigungen. Immerhin wurde aber konstatiert, dass ein signifikantes Biomassepotenzial zu Verfügung stehe, wenn Nahrungsmittel- und Bioenergieproduktion kombiniert und dadurch optimiert würden.

Hinter diesem naturwissenschaftlichen Disput verbirgt sich aber auch die Frage, ob die Erzeugung nachwachsender Rohstoffe ethisch überhaupt vertretbar ist. Schließlich stehen ihre Anbauflächen nicht mehr für die Nahrungsmittelproduktion zur Verfügung und das während die Bevölkerung auf vielen Kontinenten hungert. Damit erreicht das Thema *Nachwachsende Rohstoffe* auch eine gesellschaftliche Dimension.

Viele Möglichkeiten

Unter den nachwachsenden Rohstoffen haben **Rohstoffe pflanzlicher Herkunft** und **biogene Abfallprodukte** die größte Bedeutung. Sie werden sowohl energetisch als auch stofflich genutzt.

Die biogenen Energieträger haben zwar nur wenige Verwendungsfelder, in ihrem Absatzvolumen sind sie aber nicht begrenzt. Sie kommen flüssig als Biokraftstoff, fest als biogener Brennstoff oder gasförmig als Biogas (evtl. Biomassevergasung) vor.

Die stoffliche Nutzung von Biomasse zeichnet sich dagegen durch ein viel weiteres Spektrum an Verwendungsmöglichkeiten in zahlreichen Wirtschaftsbranchen aus. Hauptabnehmer für die biogenen Rohstoffe sind die chemische Industrie sowie die Oleo-, Papier-/Zellstoff-, Textil-, Pharma- und Kosmetikindustrie.

Mengenmäßig nimmt die Biomasse aus **Waldholz** die überragende Stellung ein. Für die energetische Nutzung stehen vor allem Derb- und Waldrestholz, Landschaftspflegeholz und Altholz zur Verfügung, während bei der stofflichen Nutzung auf das Stammholzaufkommen (Sägeindustrie) sowie auf Sägenebenprodukte und sonstiges Industrierestholz zurückgegriffen wird. Sägenebenprodukte entfallen auf beide Nutzungsrichtungen. Stofflich werden sie in der Holzwerkstoffindustrie sowie in der Papier- und Zellstoffindustrie verarbeitet. Für die energetische Nutzung werden daraus Holzpellets als Brennstoff hergestellt.

Die **Agrarrohstoffe** (Biomasse ohne Holz) machen den weitaus kleineren Anteil am gesamten Aufkommen der nachwachsenden Rohstoffe aus. In der Landwirtschaft wird die angebaute Kulturpflanzenart als Rohstoff- oder Energiepflanze bezeichnet, wenn deren Hauptprodukt (mehr als 50% der Wertschöpfung) im Non-Food-Bereich verwertet wird. Die Untergliederung in Energie- und Industriepflanzen resultiert aus der unterschiedlichen Verwertung der Biomasse in der Konsumtions-sphäre.

Im Jahre 2013 waren von den 2,4 Mio. Hektar Anbaufläche für nachwachsende Rohstoffe 88% (2,1 Mio. Hektar) dem Energiepflanzenanbau und 12% (< 0,3 Mio. Hektar) dem Industriepflanzenanbau gewidmet. Damit wurden auf einem Fünftel der deutschen Ackerfläche nachwachsende Rohstoffe erzeugt.

Bei den **Energiepflanzen** steht die kostengünstige Erzeugung eines hohen Biomasseertrages je Flächeneinheit im Vordergrund, bei dessen Nutzung möglichst keine oder geringe (im Vergleich zu fossilen Energieträgern) Emissionen an Schadstoffen verursacht werden.

Energiepflanzen müssen in ihrer Wettbewerbsfähigkeit zu anderen regenerativen Energiequellen wie Wind, Wasserkraft, Erdwärme oder Solarenergie vergleichend beurteilt werden.

Die in Biomasse gespeicherte Energie ist kontinuierlich verfügbar und daher für die Grundlastabsicherung in den Stromnetzen gut geeignet.

Die durch die Syntheseverleistungen im Stoffwechsel der **Industriepflanzen** gebildeten Substanzen können für nachfolgende chemische Synthesen vielfältig genutzt werden. Die heimische Anbaufläche für Industriepflanzen hängt in den Grenzen der agrarpolitischen Rahmenbedingungen hauptsächlich von der Produktion konkurrenzfähiger pflanzlicher Inhaltsstoffe, dem Ausbau der Verarbeitungskapazitäten und der Entwicklung von internationalen Absatzmärkten ab. Grundsätzlich muss der nachwachsende Rohstoff den von der Industrie geforderten Inhaltsstoff in möglichst fertiger und homogener Form sowie hohem Reinheitsgrad enthalten.

War vor 40 Jahren der Nutzen nachwachsender Rohstoffe noch grundsätzlich umstritten, so ranken sich die aktuellen Diskussionen in der Öffentlichkeit um Potenziale und Begrenzungen der Biomasseerzeugung sowie ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Implikationen im Zusammenhang mit Verwertung und Verarbeitung der Rohstoffe. Ein abschließendes Bild kann heute noch nicht gezeichnet werden, wohl aber der Versuch unternommen werden, das Wesen der nachwachsenden Rohstoffe auf natur-, pflanzenbau- und technikwissenschaftlicher Grundlage darzustellen.

2 Photosynthese und Stoffwechsel

Die **Photosynthese** war erdgeschichtlich die Voraussetzung zur Entwicklung höher strukturierter Lebens. Sie ist die wichtigste Form der autotrophen Assimilation und ein Vorgang, bei dem die Energie des Sonnenlichtes schrittweise in chemische Energie umgewandelt wird. Die Photosynthese der grünen Pflanzen ist Voraussetzung für die Existenz der meisten heterotrophen Formen des Lebens. Darüber hinaus lieferte sie in geologischer Vorzeit das Ausgangsmaterial zu Entstehung fossiler Energieträger wie Kohle, Erdgas und Erdöl.

Im System Pflanze ist für die **Aktivität und Lenkung des Stoffwechsels** vor allem die gewebespezifische Aktivierung vorhandener Erbinformationen im Zusammenspiel mit den Umweltfaktoren verantwortlich. Die daraus entstehende Vielfalt der Inhaltsstoffe liefert ein breites Sortiment an nachwachsenden Rohstoffen.

2.1 Photosynthese

Die Sonne treibt das Leben über den Prozess der Photosynthese an. Insofern ist der oft verwendete Werbeslogan zur Förderung regenerativer Energien „Die Sonne treibt uns an“ zutreffend und auch auf den Bereich der nachwachsenden Rohstoffe anwendbar.

Die **Sonnenstrahlung** als elektromagnetische Strahlung umfasst den Wellenbereich von 10^{-16} m bis 10^6 m. Die Stärke dieser Strahlung beträgt 1366 W m^{-2} (+/- $5,3 \text{ W m}^{-2}$) und wird als Solarkonstante bezeichnet. Davon erreicht nur etwa die Hälfte als Globalstrahlung die Erdoberfläche (Abb. 2.1).

Der Rest wird in der Atmosphäre absorbiert oder in den Weltraum reflektiert. Die auf die Erdoberfläche treffende Strahlungsmenge ist weder quantitativ noch qualitativ eine konstante Größe. So wirken sich neben Jahreszeit und Bewölkung auch geographische Breite, Tageszeit, Höhenlage sowie Hangneigung und -richtung auf die Höhe der Globalstrahlung aus. Im Jahresgang unterliegen die hohen Strahlungswerte im Sommer stärkeren Schwankungen als die niedrigen Werte in den Wintermonaten.

Von dem gesamten Spektrum der elektromagnetischen Wellen ist für die Photosynthese nur ein Teil des sichtbaren Lichtes wirksam, nämlich der Wellenlängenbereich von 380 nm (blau) bis 780 nm (rot).

Auf **zellulärer bzw. molekularer Ebene** findet die Photosynthese in den Chloroplasten chlorophyllhaltiger Zellen statt. Sie sind der Reaktionsraum für die biochemischen Prozesse, bei denen energiereiche orga-

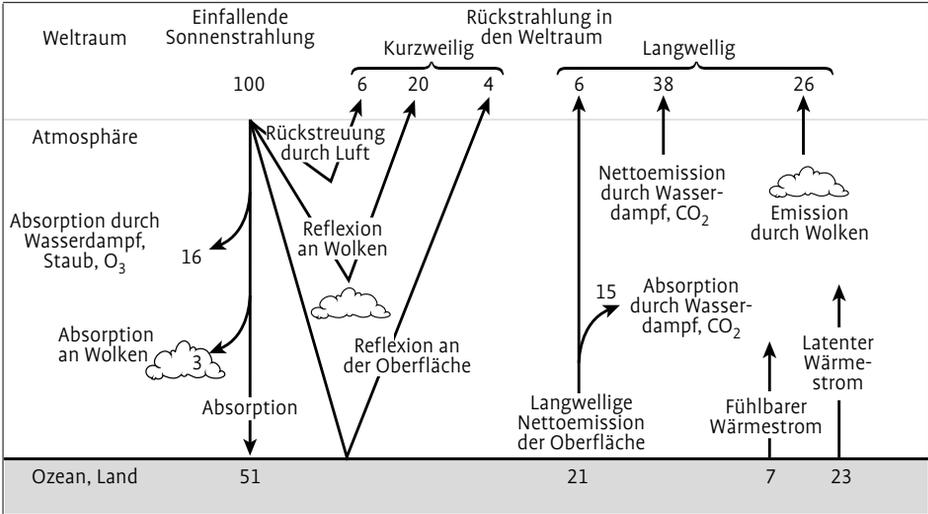
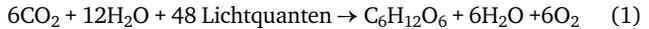


Abb. 2.1 Strahlungsgleichgewicht im System Atmosphäre/Erde (verändert nach MASON 1976, aus GEISLER 1988)

nische Stoffe aus energiearmen Molekülen synthetisiert werden. Aus den energiearmen Molekülen CO₂ und H₂O wird das energiereiche Kohlenhydrat Glucose.

Mit der Bruttoformel lässt sich der Vorgang einfach veranschaulichen:



Die Reaktion ist endotherm (energieverbrauchend, $\Delta G^0 = -2\,880 \text{ kJ/mol}$ Glucose), d. h. zur Bildung von 1 mol Glucose ist eine Energiemenge von 2 880 kJ erforderlichlich.

In den Chloroplasten befinden sich die photosynthetisch aktiven Pigmente, Chlorophyll a und b sowie Carotinoide. Die Zellorganellen sind aus einem vesikulären Membransystem, den Thylakoiden (sack- oder beutelförmige Biomembran), und aus einer wässrig-gelartigen Phase, dem Stroma, aufgebaut. Die Thylakoide sind geldrollenartig übereinander gestapelt und werden in dieser Form als Grana bezeichnet. Die Farbstoffe sind in eben diesen Thylakoiden gebunden und stellen die funktionale Grundlage der Lichtabsorption dar. Hier wird Lichtenergie aufgenommen, gesammelt und weitergeleitet.

Mittels der Energie des Lichtes wird H₂O dissoziiert (Photolyse oder Zerfall des Wassers in seine Bestandteile) und ein Elektronentransport auf ein höheres Energieniveau in Gang gesetzt. Über den nachfolgenden Elektronentransport wird im Stoffwechsel das aus dem energiearmen Adenosindiphosphat (ADP) entstandene energiereiche Adenosintriphosphat (ATP) gebildet. In einem zweiten Schritt, den wiederum energiereiche Elektronen antreiben, wird NADP (Nicotinamid-adenin-dinucleotid-phosphat) in seine reduzierte Form, NADPH₂, überführt.

Im Ergebnis liefern die lichtabhängigen Prozesse organisch gebundene Energie (ATP) und Reduktionsäquivalente (NADPH₂), die in den Folgeprozessen verbraucht werden.

Bis hierher sprechen wir von den Primärprozessen der Photosynthese.

Für die anschließenden Sekundärprozesse, die Dunkelreaktion der CO₂-Bindung, ist Lichteinwirkung nicht mehr erforderlich. In dem sog. CALVIN-Zyklus wird in einer zyklischen Folge von chemischen Umsetzungen CO₂ reduziert und Kohlenstoff über die Bildung von energiereichen Kohlenhydraten in dem pflanzlichen System assimiliert. Die so durch die Photosynthese chemisch gebundene Energie steht der Pflanze für weitere Synthesen zur Verfügung.

Die **Photosyntheseleistung eines Einzelblattes** kann mit modernen Geräten - selbst unter Freilandbedingungen - quantitativ präzise erfasst werden. Sie verändert sich in nicht-linearer Funktion mit der Intensität der photosynthetisch aktiven Lichteinstrahlung (PAR), d. h. die Ausnutzung des Wachstumsfaktors „Licht“ lässt sich mit einer Sättigungskurve beschreiben. PAR steht dabei für photosynthetisch aktive Strahlung (engl. radiation), die im Wellenlängenbereich von 400–700 nm gemessen wird. Der maximale Wert für die Photosynthese ist die Lichtsättigung.

Neben der Lichteinstrahlung hängt die Photosyntheseleistung auch von der internen CO₂-Konzentration der belichteten Blätter ab. Bei Pflanzen des gemäßigten Klimas, den C3-Pflanzen, die im Stoffwechsel ein Molekül mit drei C-Atomen als erstes Photosyntheseprodukt bilden, ist sie allein von der CO₂-Zufuhr über die Spaltöffnungen abhängig. Bei hoher Lichteinstrahlung und hohen Temperaturen zeigen einige tropische Pflanzen, die C4-Pflanzen, welche im Stoffwechsel ein Molekül mit vier C-Atomen als erstes Photosyntheseprodukt bilden, eine den C3-Pflanzen deutlich überlegene Photosyntheseleistung (Tab. 2.1).

Von pflanzenbaulicher Bedeutung ergibt sich daraus die Konsequenz, dass die Netto-Photosyntheseraten bei C3-Pflanzen nur bis zu einem arttypischen Niveau der Lichtsättigung ansteigen können, bei dem die unzureichende CO₂-Sättigung zum begrenzenden Faktor wird. C4-Pflanzen hingegen können auch auf höhere Lichtintensitäten noch mit weiter ansteigenden Photosyntheseraten reagieren. Es kommt noch hinzu, dass der Assimilationsgewinn an Kohlenhydraten bei C3-Pflanzen durch eine mit ihrer Belichtung einsetzende Lichtatmung geschmälert wird, die für C4-Pflanzen ohne Bedeutung ist.

Bei C3-Pflanzen beträgt der Wert der PAR bei Lichtsättigung 1500 $\mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{Blattfläche s}^{-1}$, bei C4-Pflanzen $\geq 1600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Unter den Kulturpflanzen finden sich überwiegend C3-Arten. Einige bedeutende Vertreter sind aber mit dem C4-Typ der Photosynthese ausgestattet, wie Hirsen, Mais oder Zuckerrohr.

Insgesamt ist die **Energieausbeute** durch Photosynthese im pflanzlichen System jedoch sehr gering (Abb. 2.2).

Die Lichtenergie wird zur Bildung chemischer Substanzen nur zu 2% ausgenutzt. Dieser Wert steigt bei einigen C4-Pflanzen auf 3–6% an. In

Tab. 2.1 Ökophysiologische Anpassung von C3- und C4-Pflanzen (nach BUSCHMANN und GRUMBACH 1985, erweitert, aus DIEPENBROCK et al. 2012)

Merkmal und Erläuterungen	C3-Pflanzen	C4-Pflanzen
Wachstumsbedingungen am natürlichen Standort	Gemäßigtes Klima; z. B. 15 bis 20 °C, 60% rel. Luftfeuchte, hoher N-Vorrat im Boden	Trockenes Klima, hohe Lichtintensität, geringe Luftfeuchte, niedriger N-Vorrat im Boden
Photosynthese begrenzende Faktoren	CO ₂	Licht
Maximale Netto-Photosyntheserate (krautige Blütenpflanzen, Nutzpflanzen; m ² einseitige Blattfläche) Die Werte von Schattenpflanzen, von C3-Pflanzen spezieller Habitats (z. B. Gebirge u. a.) und von Holzpflanzen sind geringer	20-40 μmol (CO ₂) m ⁻² s ⁻¹	30-60 μmol (CO ₂) m ⁻² s ⁻¹
Wert der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) (oder exakter der „Photonenflussdichte der photosynthetisch aktiven Strahlung“) bei der die maximale Netto-Photosyntheserate (Lichtsättigung) erreicht wird (Werte für Schattenpflanzen und Holzpflanzen sind geringer) Zum Vergleich: Maximale PAR im Sommer gegen Mittag in Mitteleuropa: 2000 μmol m ⁻² s ⁻¹ (ausführlich: μmol (Photonen) m ⁻² s ⁻¹)	1300-1600 μmol m ⁻² s ⁻¹	≥ 1600 μmol m ⁻² s ⁻¹ häufig wird Lichtsättigung nicht erreicht
CO ₂ -Konzentration, bei der maximale Netto-Photosyntheserate („CO ₂ -Sättigung“) erreicht wird	500-700 ppm = 0,05-0,07 Vol.-%	100-200 ppm = 0,01-0,02 Vol.-%
CO ₂ -Kompensationspunkt bei ≈25 °C (temperaturabhängig)	30-60 ppm = 0,003-0,006 Vol.-%	≤ 10 ppm; ≤ 0,001 Vol.-%
Kältengrenze der Netto-Photosyntheserate	-2 °C bis 0 °C	5 °C bis 10 °C
Temperaturoptimum der Netto-Photosyntheserate	10 °C bis 30 °C vorrangig bei 15 °C bis 25 °C	30 °C bis 40 °C
Hitzegrenze der Netto-Photosyntheserate	30 °C bis 50 °C	40 °C bis 60 °C
Transpirationskoeffizient (Wasserverbrauch pro Einheit gebildeter Trockenmasse)	500–700 l kg ⁻¹	200–400 l kg ⁻¹
Anmerkung zu den Konzentrationsangaben: der aktuelle CO ₂ -Gehalt der Atmosphäre liegt bei 0,038 Vol.-%. Dies entspricht 380 ppm („parts per million“). Die Abkürzung ppm ist gebräuchlich, aber keine SI-Einheit. In neuerer physiologischer Literatur (bei gleichem Zahlenwert): μmol (CO ₂)/mol (Luft), dies ist aber für allgemeinen Gebrauch wenig anschaulich. Vol.-% ist korrekt, aber wegen der Vorkomma-Nullen unhandlich.		

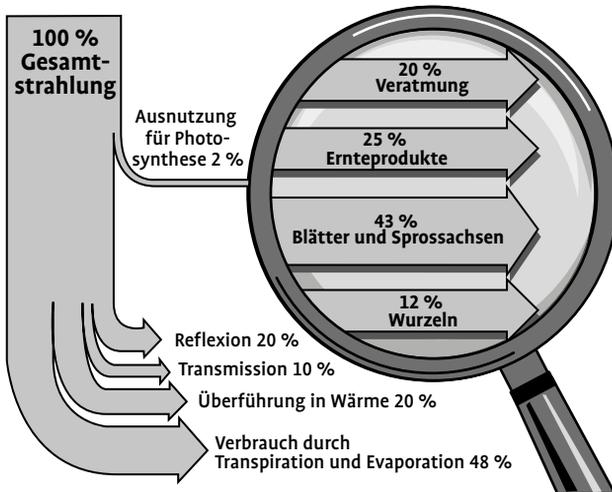


Abb. 2.2 Aufteilung der auf die Blätter treffenden Gesamtstrahlung sowie die Verteilung des über die Photosynthese gebildeten Materials in der Pflanze (nach Hoffmann 1975, aus Diepenbrock 1997).

den gemäßigten Breiten kann ein Durchschnittswert für die Energieausbeute von 0,8–1,2% angenommen werden.

Der größte Teil der auf das Blatt auftreffenden Strahlung geht durch Transpiration, Reflexion, Transmission und Wärmeflüsse verloren. Im Vergleich dazu erreichen Solarzellen, die das ganze Spektrum der eingestrahlten Sonnenenergie nutzen, einen Wirkungsgrad von 15–20%.

In einem **Pflanzenbestand** ist die CO_2 -Fixierung durch eine komplexe Serie der Interaktion von physiologischen Faktoren und Umweltbedingungen begrenzt.

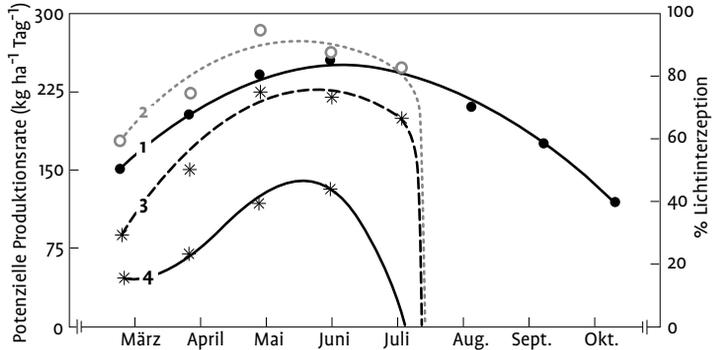
Die Bestandesphotosynthese entscheidet über die flächenbezogene Ertragsleistung an Biomasse.

Der Strahlungshaushalt (Licht, Temperatur), die CO_2 -Konzentration der Umgebungsluft, die relative Luftfeuchtigkeit sowie die Wasser- und Nährstoffversorgung im Wurzelraum sind die entscheidenden Umweltgrößen, die die Photosyntheseleistung des Bestandes bestimmen. Das Zusammenwirken dieser Faktoren wirkt auf die Gasdifffusion und die biochemischen Prozessen der Kohlenstoff-Fixierung im pflanzlichen Stoffwechsel.

Für die Photosyntheseleistung eines Pflanzenbestandes sind Anlage, Entwicklung und Aufbau des Blattwerkes darauf ausgerichtet, das Lichtangebot vollständig auszunutzen. Dies gelingt allerdings nur in der Hauptwachstumsphase (Abb. 2.3).

Jegliche Biomasseproduktion hängt von der Lichtausnutzung in wachsenden Pflanzenbeständen ab.

Abb. 2.3 Potenzial der Pflanzenproduktion (1), Ausnutzung des Angebotes an photosynthetisch wirksamer Belichtung durch einen Winterrapsbestand (2), Berechnung täglicher Zuwachsraten für Winterraps (3) und berechnete Wachstumsraten aus Raps-Parzellenversuchen im mitteldeutschen Trockengebiet (4) (DIEPENBROCK 2000).



Da die Pflanzenbestände durch Ansaat oder Wiederaustrieb nach Winter erst langsam aufgebaut werden müssen bzw. durch die Ernte das Feld regelmäßig räumen, ergeben sich für die Ausnutzung des Lichtangebotes am Standort ungünstige Bedingungen. Etwa 80% der Biomassebildung wird in der kurzen Zeitspanne erbracht, in der ein Bestand voll entwickelt ist und dann erst eine effiziente Nutzung der Lichtenergie erlaubt.

Die Lichtabsorption des Pflanzenbestandes wird durch die spezifische Lichtabsorption der einzelnen Blätter, deren räumliche Verteilung und den Neigungswinkel der Blattoberfläche zum Lichteinfall bestimmt. Aufgrund der arttypischen Bestandesarchitektur können Pflanzenbestände etwa doppelt so hohe Netto-Photosyntheseraten wie die Einzelblätter erreichen.

Vorteilhaft für die Beteiligung tieferer Blattschichten ist dabei eine eher aufrechte (erectophile) als waagerechte (planophile) Blatthaltung sowie ein größerer räumlicher Abstand zwischen den übereinander gestellten Blättern.

Die **photosynthetische Effizienz**, mit der Strahlungsenergie in chemische Energie umgewandelt wird, ist ein Maß für die Produktivität von Pflanzenbeständen.

Die Höhe der Energieausnutzung lässt sich durch den energetischen Wirkungsgrad (η) ausdrücken:

$$\eta = \frac{\text{in Biomasse gebundene Energie [MJ]}}{\text{eingestrahelte Energie (PAR) [MJ]}} \quad (2)$$

Die Kenngröße η gibt Auskunft über das Energiebindungsvermögen eines Pflanzenbestandes bezogen auf die im Vegetationsverlauf verfügbare photosynthetisch aktive Strahlung (PAR).

Weiterhin geläufig ist die Strahlungsnutzungseffizienz (RUE, radiation use efficiency), die angibt, wie viel pflanzliche Biomasse pro eingestrahelter Energie (PAR) gebildet wird:

$$\text{RUE} = \frac{\text{Biomasse [g m}^{-2} \text{ d}^{-1}\text{]}}{\text{eingestrahelte Energie (PAR) [MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}\text{]}} \quad (3)$$

Experimentell kann die PAR über die Photonenflussdichte ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) mittels eines Quantumsensors permanent gemessen und bei einer angenommenen durchschnittlichen Wellenlänge der PAR von 575 nm in einen energetischen Wert ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) überführt werden:

$$E = h \nu = h c \alpha^{-1} [\text{J}] \quad (4)$$

Dabei stellt E die Energie eines Photons in [J], h das Plancksche Wirkungsquantum ($6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$), ν die Frequenz in [s^{-1}], c die Lichtgeschwindigkeit ($3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$) sowie α die Wellenlänge in [m] dar.

Die Energie von einem mol Photonen (Loschmidtsche Zahl, $N = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$) ist dann:

$$E = N h c \alpha^{-1} = 0,12 \alpha^{-1} [\text{J mol}^{-1}] \quad (5)$$

Beide Maßzahlen (η , RUE) sind für die Einschätzung genotypischer Leistungsunterschiede oder energetischer Umsetzungsprozesse im Vegetationsverlauf aber nur bedingt brauchbar, weil sie zu stark aggregiert sind.

Für Modellierungszwecke sind daher für die Auflösung dieser Prozesse eine Reihe weiterer Parameter entwickelt worden.

Zur Beurteilung der Lichtausnutzung in Pflanzenbeständen eignet sich der **Blattflächenindex (BFI)**. Er gibt die Relation zwischen Blattfläche und überdeckter Bodenfläche an. In voll entwickelten Pflanzenbeständen werden Werte von 3–4 (viele krautige Pflanzen) bis 7–8 (Gräser und Getreide) erreicht.

Soll die Leistungsfähigkeit eines Pflanzenbestandes abgeschätzt werden, so müssen der während der Vegetationszeit durchschnittlich erreichte Blattflächenindex und die Vegetationsdauer herangezogen werden. Als Bemessungsgrundlage dient die Blattflächenindexdauer ($\text{BFI} \times D$), die schließlich das Leistungsvermögen eines Pflanzenbestandes zur Erzeugung von Biomasse in der Vegetationsperiode anzeigt.

Darüber hinaus werden die Prozesse der Lichtaufnahme in den verschiedenen phänologischen Entwicklungsstadien meist unter Berücksichtigung der Bestandesarchitektur, des Blattflächenindex sowie des Schwächungskoeffizienten (Lichtauslöschungsfaktor) k weiter differenziert. Die Höhe der Lichtabschwächung ist dabei nicht nur abhängig von der Blattanzahl und -größe, sondern auch von der Blattinsertion und -stellung an der Pflanze sowie dem Chlorophyllgehalt der Blätter.

Die vertikale Strahlungsverteilung in Pflanzenbeständen übt einen signifikanten Einfluss auf die Bildung von Biomasse aus, d. h. die Wachstumsrate wird nicht nur durch die Lichtnutzungseffizienz (RUE), sondern auch durch die Lichtabschwächung infolge der Absorption der auf den Bestand auftreffenden Strahlung bestimmt.

Die Abschwächung der PAR als Funktion des Blattflächenindex kann entsprechend dem „**BEER-LAMBERT-Gesetz**“ durch eine Exponentialfunktion beschrieben werden:

$$Q_b = Q_o e^{-k \text{ BFI}} \quad (6)$$

Q_b ,	Strahlungsintensität an der Bodenoberfläche [J m^{-2}]
Q_o ,	Strahlungsintensität an der Bestandesoberfläche (= einfallende PAR) [J m^{-2}]
k ,	Schwächungskonstante [dimensionslos]
BFI,	Blattflächenindex [dimensionslos]

Um die Lichtabschwächung quantitativ erfassen zu können, wird die Formel (6) nach k aufgelöst:

$$k = -\ln(Q_b/Q_o)/\text{BFI} \quad (7)$$

Da Q_b immer kleiner als oder gleich Q_o sein muss, nimmt Q_b/Q_o Werte zwischen 0 und 1 an und $-\ln(Q_b/Q_o)$ hat positive Werte. Für $Q_b=Q_o$ (das Licht wird vollständig transmittiert) nimmt k den Wert $\ln(1)=0$ an. Nähert sich Q_b dem Wert 0 (kein Licht wird durchgelassen) steigt k gegen unendlich an.

Genotypische Unterschiede des Schwächungskoeffizienten wurden u. a. für Reis, Mais, Sonnenblumen, Zuckerrüben und Weizen nachgewiesen. Bei diesen Kulturarten haben Sorten mit relativ geringen k -Werten (= hohe Lichtdurchlässigkeit) einen hohen Strahlungszufluss in die basalen Schichten des Blattwerkes.

Es kann daraus geschlossen werden, dass die vertikale Strahlungsverteilung einen signifikanten Einfluss auf die Produktivität, also die Wachstumsrate (G), von Pflanzenbeständen hat.

In Gleichung 8 ist die RUE als die Nutzungseffizienz für die **einfallende** Strahlung definiert. Wir verwenden daher für diese Größe nachfolgend das Symbol RUE_e . Die RUE_e ist von der Strahlungsabsorption der Blätter und der Bestandesgeometrie abhängig. Steigt die Lichtabschwächung auf Grund einer erhöhten Strahlungsabsorption durch den Bestand, so erhöht sich die Lichtnutzungseffizienz und *vice versa*.

Mit der so definierten RUE_e lässt sich die Wachstumsrate eines Pflanzenbestandes berechnen nach:

$$G = \text{RUE}_e * Q_o \quad (8)$$

G ,	Wachstumsrate [$\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$]
RUE_e ,	Lichtnutzungseffizienz [g J^{-1}] für die einfallende Strahlung
Q_o	[$\text{J m}^{-2} \text{ d}^{-1}$]

In Gleichung 9 ist RUE_a dagegen die Nutzungseffizienz für die **absorbierte** Strahlung (Q_a), welche bei grünen Pflanzenbeständen näherungsweise durch den Term $Q_o (1 - e^{-k \text{ BFI}})$ gegeben ist:

$$G = \text{RUE}_a * Q_a \quad (9)$$

G ,	Wachstumsrate [$\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$]
RUE_a ,	Lichtnutzungseffizienz [g J^{-1}] für die absorbierte Strahlung (Q_a)

Die so definierte RUE_a ist **nicht** von der Strahlungsabsorption der Blätter und der Bestandesgeometrie abhängig.

Die Wachstumsrate und der Strahlungshaushalt des Pflanzenbestandes sind in diesem Fall über Gleichung 10 miteinander verbunden:

$$G = RUE_a * Q_o * (1 - e^{-k \text{ BFI}}) \quad (10)$$

- G , Wachstumsrate [$\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$]
 RUE_a , Lichtnutzungseffizienz [g J^{-1}] für die absorbierte Strahlung (Q_a)
 Q_o , Strahlungsintensität an der Bestandesoberfläche (= einfallende PAR) [$\text{J m}^{-2} \text{d}^{-1}$]
 k , Schwächungskonstante für Q_o [dimensionslos]
 BFI , Blattflächenindex [dimensionslos]

Zur Vereinfachung werden bei der Modellierung BFI , k und/oder RUE in einem bestimmten Vegetationsabschnitt als konstant angesehen. Die Formeln gelten daher nur mit den für einen bestimmten Vegetationsabschnitt gültigen Werten dieser Kenngrößen.

Die Kenngrößen BFI , k und RUE sind vom Entwicklungszustand des Pflanzenbestandes abhängig.

Wenn die Effizienz des Photosyntheseprozesses auch gering ist, so wird global immerhin eine Energiemenge von ca. 3 200 Exajoule ($\text{EJ} = 10^{18} \text{ J}$) in $2 \times 10^{22} \text{ t}$ Biomasse jährlich gebunden. Davon sind etwa 100 EJ nachhaltig für Energiezwecke nutzbar (Key World Energie Statistics 2010).

Die energetische Effizienz der Photosynthese ist gering, die global in Biomasse gebundene Energie sehr hoch

Der Primärenergieverbrauch der Menschheit beläuft sich auf 508 EJ (Deutschland ca. 14 EJ) (Energiestatistik des BMWI 2009). Hieraus würde sich ergeben, dass weltweit etwa 20% des Energiebedarfs aus Biomasse gedeckt werden könnten.

An dieser Stelle wird deutlich, dass eine Strahlungs- und Energiebilanz auf verschiedenen Skalenebenen aufgemacht werden muss, um die energetische Effizienz von Einzelpflanzen, Pflanzenbeständen, aber auch ganzer Produktionssysteme innerhalb festgelegter Systemgrenzen, beurteilen zu können.

Neben höheren Pflanzen gibt es auch andere Lebensformen, mit denen Biomasse produziert werden kann.

Die Kultivierung von Mikroalgen zur Bildung von Biomasse erfolgt flächenungebunden

Hierzu gehören **Mikroalgen**, von denen die Grünalge *Chlorella vulgaris* bereits seit 50 Jahren kommerziell genutzt wird. In Abhängigkeit von den individuellen Artansprüchen können Mikroalgen photoautotroph, heterotroph oder mixotroph kultiviert werden. Photoautotrophe Algen betreiben Photosynthese und werden in Photobioreaktoren angezogen. Sie benötigen Licht mit besonderen Ansprüchen an Qualität, Quantität und Hell-Dunkelzyklen. Das Temperaturoptimum liegt zwischen 20 und 27 °C. Weitere wichtige Anzuchtfaktoren sind das Nährstoffangebot, die Kohlenstoffversorgung und der pH-Wert (Optimum zwischen 7 und 9).

Heterotrophe Algenarten benötigen organische Verbindungen als Energie- und Kohlenstoffquelle. Sie können unter Ausschluss von Licht kultiviert werden. Gegenüber der photoautotrophen Anzucht wird die Biomasseproduktivität (einschl. Lipidproduktion) im heterotrophen System durch den Einsatz organischer Kohlenstoffquellen wie Glucose deutlich gesteigert. Nachteile dieser Kultivierung sind aber das hohe Kontaminationsrisiko und die Kosten für die organischen Kohlenstoffquellen sowie die Beleuchtungsanlagen.

Mixotroph kultivierte Algen benötigen neben CO₂ auch organischen Kohlenstoff als Kohlenstoffquelle. Der für diese Algen erforderliche Reaktor muss auf jeden Fall eine CO₂- und Lichtversorgung gewährleisten. In großtechnischen Anlagen wird diese Kultivierungsart nur selten genutzt.

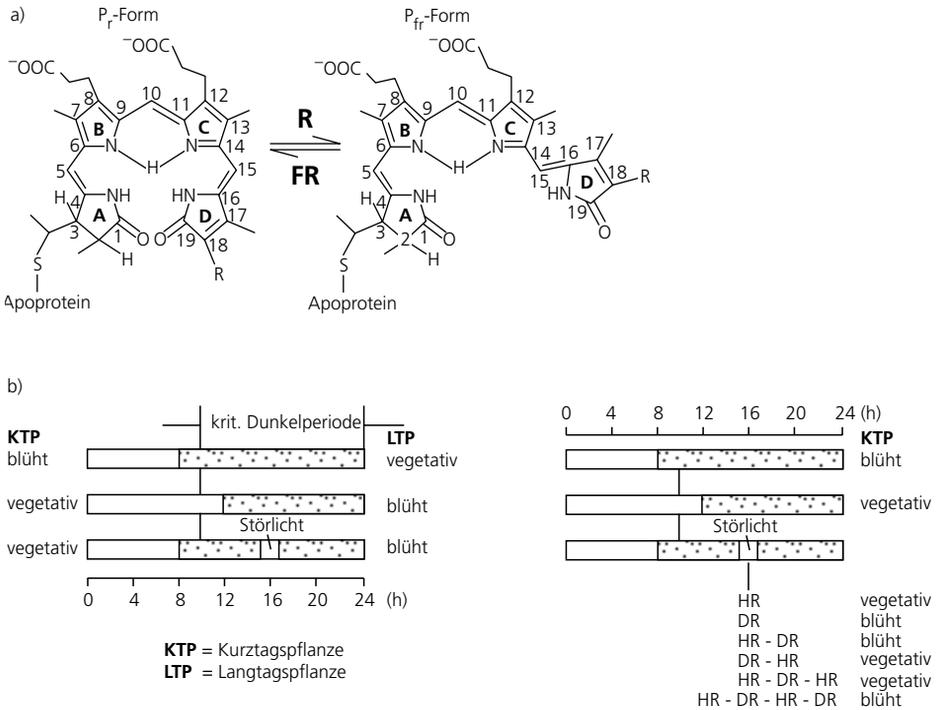
2.2 Stoffwechsel

Die messbare Stoffwechselaktivität einer Pflanze resultiert zu jedem Zeitpunkt aus der Wechselwirkung zwischen ihrer Erbinformation (Genotyp) und den herrschenden Wachstumsbedingungen (Umwelt).

Der Primärstoffwechsel verbraucht einen erheblichen Teil der durch Photosynthese gewonnenen Energie. Ihm werden alle Prozesse zugeordnet, die die Biogenese der für die Funktionsfähigkeit einer Zelle benötigten Strukturen ermöglicht, und läuft in allen Pflanzenarten in ähnlicher Weise ab.

Von zentraler Bedeutung für den Primärstoffwechsel sind die Interaktionen zwischen dem CALVIN-Zyklus, der glycolytischen Energiegewinnung in der Atmungskette sowie dem Pentosephosphat- und dem Citrat-Zyklus, die zusammen den Intermediärstoffwechsel der höheren Pflanzen betreiben. Insgesamt vermittelt er die Ansatzpunkte für die Biosynthesewege zu allen Endprodukten des Primärstoffwechsels.

Die jedem Genotyp eigenen Erbinformationen ermöglichen und lenken den Sekundärstoffwechsel. Dieser führt zu einer sehr großen Zahl von Inhaltsstoffen, welche meist nur in bestimmten Organen und geringen Mengen ausgebildet werden.



Die physiologischen Funktionen der Moleküle aus dem Sekundärstoffwechsel stellen oftmals den Kontakt einer Pflanze mit ihrer Umwelt her.

Sie gehören Chlorophylle als Photosynthesepigmente der Stoffklasse der Porphyrine an, die aus Intermediärprodukten des Citrat-Zyklus unter Beteiligung aliphatischer Aminosäuren hervorgehen.

Das Phytochromsystem steuert die Formbildungsprozesse wachsender Pflanzen, die zum Aufbau der artspezifischen Pflanzenarchitektur führen.

Über das Phytochromsystem entfaltet sich die **morphogenetische Wirkung des Lichtes** (Abb. 2.4).

Die aus dem Sekundärstoffwechsel stammenden Rezeptoren, die Phytochrome, ermöglichen der Pflanze, ihren Primärstoffwechsel auf Hell- und Dunkelphasen einzustellen. Wie das Chlorophyll sind auch sie lichtwellenempfindlich. Der in diesem Fall notwendige Lichtreiz wird von dem Phytochromsystem aufgenommen, welches unter (auch schon geringer) Energieaufnahme seine Molekülstruktur mittels Protonenübergängen ändert und damit jeweils Rezeptor für Wellenlängen mit Absorptionsmaxima um 660 nm (hellrot) oder um 730 nm (dunkelrot)

Abb. 2.4 Die morphogenetische Wirkung des Lichtes (nach WANG und DENG 2004, HESS 1976, aus DIEPENBROCK et al. 2012)

- a) Die beiden Zustandsformen des Phytochroms
 R = rotes Licht
 FR = dunkelrotes Licht
- b) Nachweis photoperiodischer Reaktionen

wird. Das Phytochromsystem reagiert unter natürlichen Bedingungen auf den Tag-Nacht-Wechsel mit Sensitivitäten, die einerseits die Morgendämmerung (hellrotes Licht), andererseits die Abenddämmerung (dunkelrotes Licht) erfassen.

Pflanzenbaulich relevante Reaktionen auf diesen Lichtreiz finden sich bei den Keimungs- und vegetativen Wachstums- (Etiolierungs-) Prozessen und der Blühinduktion.

Bei sogenannten Lichtkeimern (meist kleinsamige Kultur- und Unkrautarten) ist hellrotes Licht Voraussetzung für die Einleitung des Keimprozesses und bei allen Pflanzen ausschlaggebend für die Morphologie der Keimpflanze. Für Dunkelkeimer (meist großsamige Arten) ist die Keimung unter Lichtausschluss charakteristisch. Viele Kulturarten sind jedoch lichtneutral, d. h. die Keimung erfolgt unabhängig von der Lichtwirkung.

Dunkelrotes Licht hemmt die Blattentwicklung, veranlasst aber ein beschleunigtes Streckungs- und Längenwachstum (Etiolierung). So entwickeln Kartoffelkeime unter Lichtabschluss Sprosse, die extrem lange Internodien und zugleich sehr kleine, chlorophyllfreie Laubblätter ausbilden. Dies führt im Anbau zu einer schnellen Überbrückung der Distanz zwischen gepflanzter Knolle und der Erdoberfläche. Auch das angelegte Längenwachstum von Koleoptile und Halmheber von Getreidepflanzen und die beschleunigte Hypokotylstreckung zweikeimblättriger Arten lassen sich auf diese Weise erklären.

Die an die Vegetationsperiode angepassten Entwicklungsprozesse werden entscheidend durch den Übergang des Vegetationskegels von einer reinen Blattbildungsphase in die generative Phase der Entwicklung von Blütenständen bestimmt. Dieser Übergang ist eine erblich verankerte Reaktion auf Veränderungen der Tageslänge bzw. einer kritischen Nachtlänge (Photoperiodismus). Bei Langtagspflanzen liegt diesem Photoperiodismus die Erfassung der Dauer der Tageslänge, bei Kurztagspflanzen die Registrierung der Dauer der Dunkelphase zugrunde. Zur Förderung des Übergangs zur generativen Entwicklung ist für Langtagspflanzen eine Tageslänge von mehr als 14 Stunden, für Kurztagspflanzen eine Dunkelphase von mehr als 14 Stunden notwendig. Die tatsächlichen Längen der Nacht bzw. des Tages sind artspezifisch und können nicht mit einer allgemein gültigen Stundenzahl angegeben werden.

Die Tageslängenreaktion stellt für die Nutzpflanzen einen zuverlässigen Mechanismus dar, der wesentlich zur Anpassung des Entwicklungsverlaufes an die jahreszeitlichen (durch die Änderung der Tageslänge angezeigten) Veränderungen der Wachstumsverhältnisse unterschiedlicher Standorte dient.

Die Gruppe der **Phytohormone** ist in wechselseitiger Konzentrationsabhängigkeit maßgeblich an vielen Regulationsvorgängen beteiligt. So regeln sie etwa die Stoffverteilung in der Pflanze als Verhältnis aus Source (Assimilat produzierende Pflanzenteile) und Sink (Verbrauchsorte für Assimilate) oder das Pflanzenlängenwachstum über die Beeinflussung der Internodienlänge.

In großer Vielfalt werden Verbindungen aus der Stoffklasse der **Flavonoide** und ätherische Öle aus der Klasse der **Isoprenoide** gebildet. Sie sind die stoffliche Basis für befruchtungsbiologische aber auch allelopathische Wechselwirkungen. Extrem spezifische Erkennungs- und Abwehrreaktionen bestimmen über die Ausbildung von Wirt- und Parasitverhältnissen, die ein breites Spektrum potenzieller Schad- und Krankheitserreger jeder Kulturpflanzenart einschließen, aber auch über ihre Symbiosen.

An Abwehrreaktionen gegen spezialisierte biotrophe Krankheitserreger sind sehr häufig Produkte des **Phenolstoffwechsels** beteiligt.

Weiterführende Literatur

- HESS, H., 2004: Allgemeine Botanik. Verlag E. Ulmer, Stuttgart. ISBN 978-3825224875
- PESARAKLI, M. (Ed.), 1994: Handbook of Plant and Crop Physiology. Marcel Dekker, Inc., New York, Basel, Hong Kong
- WEILER, E. und L. NOVER 2008: Allgemeine und molekulare Botanik (begründet von W. NULTSCH). 1. Aufl., Thieme, Stuttgart. ISBN 978-3131476616

Fragen zu Kap. 2

Welche Energiemenge ist zur Bildung von 1 mol Glucose erforderlich?

Welche Unterschiede bestehen in der ökophysiologischen Anpassung von C3- und C4-Pflanzen?

Welche Größen bestimmen die Wachstumsrate von Pflanzenbeständen?

Wie hoch ist die Energieausbeute durch Photosynthese im pflanzlichen System?

Welches Pigmentsystem steuert die morphogenetischen Wirkungen des Lichtes?

3 Ertragsbildung und Anbau der Kulturpflanzen

Die in der Vegetationsperiode ablaufenden Ertragsbildungsprozesse sind von der genetischen Information in der Pflanze und den regulativen Umweltbedingungen abhängig und bestimmen den Ertrag als flächenbezogene Produktionsleistung des Pflanzenbestandes.

Die Anbauverfahren der Kulturpflanzen sind darauf ausgerichtet, das Produktionspotenzial des Standortes so gut wie möglich auszunutzen und ökonomischen Erfolg zu erzielen.

Landwirtschaftliche Produktionssysteme sind stets innerhalb der klimatischen Rahmenbedingungen wie Tageslänge, Einstrahlungsmenge, Temperaturverlauf und -extreme, Niederschlagsmenge und -verteilung, relative Luftfeuchtigkeit und Unwetterrisiko organisiert. Daneben sind sie auch in einen soziologischen (z. B. Bevölkerungsdichte, Anspruch der Bevölkerung an die Lebensqualität, insbesondere die Nahrungsqualität, Ansprüche an Landnutzung für andere als landwirtschaftliche Zwecke, wie Trinkwasserschöpfung, Verkehr oder Freizeit und spezielle Rechtsvorschriften) und ökonomischen Kontext (Organisation und Verfassung der allgemeinen Märkte, Agrarpolitik und Einkommenserwartung) eingebunden.

3.1 Ertragsbildung

Der Flächenertrag und die stoffliche Zusammensetzung der Biomasse sind die relevanten Parameter für die Erzeugung nachwachsender Rohstoffe. Für den Produktionserfolg ist neben der Ertragshöhe und -qualität auch die Ertragsicherheit entscheidend.

Die potenzielle **Ertragsleistung eines Pflanzenbestandes** ist in der genetischen Information verankert und stellt eine umweltunabhängige Größe dar, deren Ausschöpfung aber von der Konstellation der Umweltbedingungen beeinflusst wird.

Das aktuelle Ertragsniveau eines Pflanzenbestandes am jeweiligen Standort wird bestimmt durch die vollständige Ausnutzung der photosynthetisch wirksamen Lichtenergie in Verbindung mit dem Zeitraum, über den die Bestandesphotosynthese sich an der Grenze der physiologischen Leistungsfähigkeit bewegt (s. Kap. 2.1).

Pflanzenbauliche Eingriffe gestalten die Umweltbedingungen so, dass das Ertragspotenzial möglichst weit ausgeschöpft wird. Zu den Umweltfaktoren zählen abiotische Witterungs- und Bodenfaktoren, aber auch sämtliche parasitierenden, kooperierenden und konkurrierenden Lebewesen, wie Krankheitserreger, Symbionten, Schädlinge und Unkräuter.

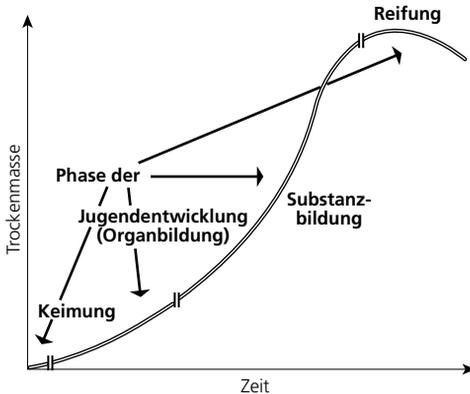


Abb. 3.1 Die Wachstumskurve (DIEPENBROCK et al. 2012).

Mit der Pflanzenzüchtung wird der pflanzliche Genotyp an Nutzungsziel und Produktionstechnik angepasst.

Die **Wachstums- und Entwicklungsvorgänge** beanspruchen den größten Teil der Stoffwechselaktivität einer Pflanze. Dabei wird das Wachstum als irreversible Substanzzunahme der Pflanze bzw. ihrer Einzelorgane bezeichnet, während die Entwicklung die Differenzierung zu funktional unterschiedlichen Geweben bzw. Organen beschreibt.

Der Wachstumsverlauf einjähriger Kulturen folgt einer s-förmigen Kurve (Abb. 3.1).

Der Ertrag eines Kulturpflanzenbestandes ist das Ergebnis der Wachstumsvorgänge innerhalb der Vegetationsperiode, in deren Verlauf die ertragsbildenden Prozesse von der Nettoassimilationsrate (und damit der Wachstumsrate) und der Wachstumsdauer abhängen. Die Wachstumsrate ist die je Zeiteinheit gebildete und eingelagerte Trockenmasse (TM), die Wachstumsdauer die für die Ertragsbildung benötigte Anzahl von Tagen.

Im gemäßigten Klima Mitteleuropas unterscheiden sich die anbauwürdigen Kulturarten kaum in ihrer nachhaltig erzielbaren Wachstumsrate, die mit etwa 250 kg TM pro ha und Tag angegeben werden kann. Folglich dürfte beim Anbau von Kulturpflanzen unter für sie günstigen Bedingungen meist die Wachstumsdauer die erreichbare Ertragsleistung stärker bestimmen als die Wachstumsrate.

Die Wachstumsdauer hat größeren Einfluss auf den Biomasseertrag als die Wachstumsrate

Wachstumsdauer und Wachstumsrate stehen unter dem Einfluss der Wachstumstemperatur. Grundsätzlich gilt, dass zunehmende Temperaturen die Wachstumsrate fördern, die Wachstumsdauer jedoch verkürzen. Mit der gesteigerten Wachstumsrate ist aber meist die Wirkung der verkürzten Wachstumsdauer mit Blick auf die Ertragsleistung nicht zu

kompensieren. Im Ergebnis sind wachstumsverzögernde Temperaturbereiche für die Ertragsleistung generell günstig zu beurteilen. Solche Modellvorstellungen erklären sehr gut, warum z. B. im Norden Deutschlands oder in den Niederlanden mit sommerkühlem Klima bei Getreide ein höheres Ertragsniveau erreicht wird, als in sommerwarmen Regionen.

Multiplikative Effekte entstehen, wenn mit der Anhebung der täglichen Zuwachsrate zugleich eine längere Wachstumsdauer erreicht wird, wie dies in der jüngeren Vergangenheit bei den Energiepflanzen Mais und Raps der Fall war. In den letzten Jahren wurde aber auch bei einigen Kulturarten eine Stagnation des statistischen Ertragstrends beobachtet. Dies ist auf den ertragsbegrenzenden Wasserhaushalt vieler Standorte zurückzuführen.

Produktion und Verteilung der Trockenmasse sind die entscheidenden **innerpflanzlichen Vorgänge** für die Ertragsbildung eines Kulturpflanzenbestandes. In diesen Eigenschaften lassen sich die Körnerfrüchte in drei Ertragsbildungstypen einteilen. Bei den in den Ertragsanlagen terminierten Arten (z. B. Gräser und Getreide) wird mit dem Eintritt in die reproduktive Phase die neu gebildete Trockenmasse überwiegend in die Ertragsorgane verlagert. Bei semi-terminierten Arten unterliegt die Stoffverteilung nach der Sink-Differenzierung (Sink = Verbrauchsorte für Assimilate) der innerpflanzlichen Konkurrenz zwischen vegetativen und reproduktiven Attraktionsorten mit einer leichten Dominanz der reproduktiven Organe (z. B. *Brassica napus* L.). Nicht-terminierte Arten (z. B. *Vicia faba* L.) verteilen die Assimilate im Nachblütezeitraum über weite Phasen gleichmäßig in vegetative und generative Strukturen.

In den meisten Fällen wird der Ertrag eines Kulturpflanzenbestandes durch bestimmte Pflanzenorgane erbracht, die im Entwicklungsverlauf angelegt und durch pflanzenbauliche Eingriffe in ihrem Wachstum gefördert werden. Dazu gehören Früchte bzw. Samen, Stängel, Blätter, Knollen und Wurzeln. Ihr Anteil an der Biomasse wird als Ernteindex bezeichnet. Nur mit einem vollständig verwertbaren Aufwuchs der meisten Futterpflanzen oder einigen Energiepflanzen (z. B. Biogasmais, schnellwachsende Baumarten, *Miscanthus*, Hirsen/Sudangras) ist ein Ernteindex von 1,0 zu erreichen. In allen anderen Fällen ergibt sich ein geringerer Wert.

Pflanzenbauliche Maßnahmen sind darauf ausgerichtet, den Ernteindex zu erhöhen.

Der Ernteindex ist das Verhältnis von Kornertrag zur gesamten oberirdischen Biomasse

Auch die Beiträge der Pflanzenzüchtung zu den Ertragssteigerungen der letzten Dekaden sind hier im Wesentlichen angesiedelt. So erreichen europäische Landsorten von Winterweizen unter gleichen Wachstumsbedingungen ähnlich hohe Biomasseerträge wie heutige Zuchtsorten.