



1 Einleitung

1.1 Aktuelle Rahmenbedingungen der EU-Klima- und Energiepolitik

Aufgrund einer weltweit steigenden Energienachfrage nach den auf längere Sicht nur begrenzt zur Verfügung stehenden fossilen Energieträgern und der damit verbundenen Preissteigerung stieg der Bedarf an alternativen Energiequellen in den vergangenen Jahren stark an (Röhle et al. 2006, Liesebach et al. 2012).

Zusätzlich unterstützt und fördert die Europäische Union mittels aktueller Förderprogramme und -maßnahmen zur Klima- und Energiepolitik (Energiepolitik für Europa COM(2007)1) eine immer größere Nachfrage nach nachwachsenden sowie ressourcenschonenden Rohstoffen. Bis zum Jahr 2020 wird eine europaweite Durchsetzung der „20-20-20-Ziele“ angestrebt (Janßen et al. 2012, AG Energiebilanzen 2014). Hierbei handelt es sich um

- die Senkung der Treibhausgasemission um mind. 20 % gegenüber dem Jahr 1990,
- eine Energieeffizienzsteigerung um 20 %,
- die Steigerung des Anteils der erneuerbaren Energien am Gesamtenergieverbrauch auf 20 %.

Die weiteren Planungen der Europäischen Kommission für den Zeitraum 2020 bis 2030 sehen bereits eine europaweite Senkung der Treibhausgasemission um 40 % (gegenüber dem Basisjahr 1990) bei gleichzeitigem Anstieg des Anteils der erneuerbaren Energien am Gesamtenergieverbrauch auf 27 % vor (Mitteilung zu „Rahmen für die Klima- und Energiepolitik im Zeitraum 2020-2030“).

Zu den wichtigsten erneuerbaren Energiequellen mit den höchsten Wachstumspotentialen zählen in Deutschland Wind, Wasser, Sonne, Geothermie und Biomasse (Hartmann 2010). Im Jahr 2014 wurden 25,8 % der Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energien gewonnen, größtenteils hergestellt aus Biomasse (7,0 %) und Windenergie (8,6 %) (AG Energiebilanzen, Stand: Dezember 2014).



Die Vorteile der Biomassenutzung gegenüber anderen erneuerbaren Energieträgern sind nach Hartmann (2010) die folgenden:

- geringe Kosten und kaum vorhandene Schwankungen im Angebot,
- Förderung regionaler Wirtschaftsstrukturen,
- Erschließung alternativer Einkommensquellen und
- universelle Einsetzbarkeit.

Zu den klassischen landwirtschaftlichen Bioenergiepflanzen zählen Mais zur Biogasgewinnung, Raps zur Biodieselerzeugung und Getreide für die Bioethanolerzeugung (BMELV 2006, Hartmann 2010). Holz als erneuerbare Biomassequelle ist vor allem auf Grund seiner vielfältigen Verwendbarkeit (Verstromung, Wärmeerzeugung, flüssiger Energieträger) interessant (Hartmann 2010). Die damit verbundene steigende stoffliche und energetische Nachfrage nach Holz als nachwachsende Biomassequelle kann in Deutschland alleine durch die Waldholzproduktion langfristig nicht gesättigt werden (Hartmann 2010, Mantau et al. 2010, DBFZ 2011). Eine Alternative zur begrenzten Holzerzeugung im Wald bietet die extensive Erzeugung von „Feldhackschnitzeln“ unter Ausnutzung des landwirtschaftlichen Flächenpotenzials in so genannten Kurzumtriebsplantagen (KUP) (Bärwolff et al. 2012).

1.2 Kurzumtriebsplantagen (KUP)

Unter dem Begriff Kurzumtriebsplantage (KUP), Synonym Energiewälder, Kurzumtriebskulturen oder Kurzumtriebsbestand, wird der Anbau schnellwachsender, teils stockausschlagfähiger Baumarten, vor allem von Weide, Pappel und Robinie auf landwirtschaftlichen Acker- und Grünflächen in kurzen Rotationszeiträumen mit dem Ziel der Biomasseerzeugung für stoffliche- und energetische Nutzung verstanden (Thrän 2004, Hartmann 2010, Stoll 2011).

Im Gegensatz zu fossilen Energieträgern verstärken die weitgehend CO₂-neutral nachwachsenden Rohstoffe den Treibhauseffekt dabei nicht, sondern ermöglichen eine dezentrale, umweltfreundliche Energieversorgung (Hofmann 2010, Janßen et al. 2012). Zudem kommt es insbesondere durch den Anbau von KUP mit schnellwachsenden Baumarten zu einer erhöhten Bindung von CO₂ im Boden (Janßen et al. 2012).

Zur Verwirklichung optimaler Biomasseerträge in Form einer KUP sind zusammengefasst fünf unterschiedliche Faktoren von Bedeutung (Röhle et al. 2006):

1. Verwendetes Pflanzgut (Baumart; Klon - Steckling bzw. bewurzelte Pflanze)
2. Rotationszeitraum/Rotationsperiode (Zeitspanne zwischen Pflanzung und Ernte)
3. Pflanzdesign (Pflanzenzahl pro Hektar)
4. Standort (Boden, Exposition)
5. Klimavariablen (Niederschlag, Temperatur)

In der vorliegenden Arbeit wurden insbesondere die Variablen Witterung und das genetische Potenzial (Herkunft) des verwendeten Pflanzguts der Zitterpappel (*Populus tremula*, *P. tremuloides*) in Hinblick auf möglichen Biomassezuwachs eines marginalen Grenzertragsstandorts näher untersucht.

1.2.1 Förderungsmöglichkeiten und Flächenverfügbarkeit für KUP

Durch EU-Betriebsprämien wird der Anbau von Holz im Kurzumtrieb ähnlich wie einjährige landwirtschaftliche Bioenergiepflanzen wie beispielsweise Mais zur Biogasgewinnung, Raps zur Biodieselerzeugung und Getreide für Bioethanolherstellung finanziell unterstützt (BMELV 2015, Hofmann 2010). Der Anbau von KUP ist heute grundsätzlich nur noch auf Ackerland möglich, da laut EU-Agrarreform ein Umwandlungsverbot für Dauergrünland besteht (BMELV 2015).

Eine solche Flächennutzungsform wird landwirtschaftlich als Dauerkulturfläche geführt (Hofmann 2010). Aufgrund der langfristigen Flächenbindung (ca. 10-20 Jahre) und der dauernden Konkurrenz mit finanziellen Erlösen (Deckungsbeiträgen) traditioneller landwirtschaftlicher Nutzpflanzen befindet sich die Akzeptanz im Agrarsektor gegenüber dieser Nutzungsform nicht auf dem Niveau wie bei einjährig angebauten Bioenergiepflanzen (Mais, Raps, Getreide) (Röhle et al. 2006, Wirkner 2011).

Führende Bioenergiepflanzen auf 2,1 Mio. Hektar deutschem Agrarland sind weiterhin Raps für die Produktion von Biodiesel und Mais für die Produktion von Biogas (Kollas et al. 2009, FNR 2013). Für das Jahr 2010 wurde die fast hauptsächlich mit Pappeln und Weiden bestellte KUP-Fläche in Deutschland auf ca. 3.000 ha geschätzt (Schirmer 2010). Die nach Kollas et al. (2009) auf längere Sicht möglichen 4-12,9 Mio. Hektar Fläche zur Bioenergieproduktion in Deutschland sind abhängig von der Flächenkonkurrenz mit traditionellen



landwirtschaftlichen Pflanzen sowie der ökologischen Standortbeschaffenheit. Zur Vermeidung eines direkten Konkurrenzverhältnisses mit der Landwirtschaft empfiehlt sich ein Ausweichen auf für die intensive landwirtschaftliche Nutzung unbedeutende Flächen mit ökologischen Standortbeschränkungen hinsichtlich Bodengüte, Wasserverfügbarkeit und Bearbeitbarkeit im industriellen Maßstab.

1.2.2 Einfluss von Klimaänderungen auf KUP

Die angestrebten, möglichst kurzen Rotationsperioden sowie die oftmals geringe Wüchsigkeit der für KUP zur Verfügung stehenden Standorte führte zur Wiederentdeckung schnellwachsender, relativ anspruchsloser Baumarten mit hohem Regenerationsvermögen zur nachhaltigen Biomassegewinnung (Hofmann 2010). Nach Hofmann (2010) sind auf Grund ihres schnellen Jugendwachstums sowie der Möglichkeit des Stockausschlags zurzeit bestimmte Weiden- und Pappelarten anderen Baumarten in ihren Zuwachseleistungen deutlich überlegen.

Aufgrund starker Flächenkonkurrenz mit einjährigen Bioenergie- und traditionellen landwirtschaftlichen Nutzpflanzen verbleibt für die Bioenergieproduktion in Form von KUP nur ein begrenzter Flächenanteil. Dieser Flächenanteil verschiebt sich schon jetzt auf die landwirtschaftlich schwächeren Standorte, mit eingeschränkter Nährstoff- sowie Wasserversorgung (Hofmann 2010).

Zukünftige Klimaszenarien prognostizieren für Deutschland und Mitteleuropa bei steigenden Temperaturen gleichbleibende bzw. zurückgehende Niederschläge (IPCC 2007). Im Hinblick auf die Entwicklung der Flächenverfügbarkeit in Deutschland bedeutet dies bei steigenden Temperaturen eine Verschiebung bisher ausreichend mit Niederschlag versorgter Standorten hin zu trockenen Grenzertragsstandorten (Röckner et al. 2006, Grundmann 2009).

Bedingt durch ihre Trockenempfindlichkeit sind Weiden sowie Balsampappelhybriden für den Anbau auf trockenen Grenzertragsstandorten als ungeeignet einzustufen. Daher gewinnt vor allem die hinsichtlich der Wasser- und Nährstoffversorgung sehr anspruchslose Zitterpappel für den Anbau auf KUP-Flächen stark an wirtschaftlicher Bedeutung (Hofmann 2010, Liesebach et al. 2012).



1.3 Die Pappel (*Populus spp.*)

Die Pappel (*Populus spp.*), aus der Familie der Salicaceae ist seit Jahrhunderten eine in Mitteleuropa wirtschaftlich genutzte Baumart. Aus den insgesamt sechs Sektionen mit ca. 35 Arten sind die Sektionen *Aigeiros* mit der Baumart „Schwarzpappel“ (*P. nigra*) und die Sektion *Populus* mit den Baumarten „Weiß- oder Silberpappel und Zitterpappel“ (*P. alba* und *P. tremula*) in Deutschland bzw. Mitteleuropa heimisch (Aas et al. 2007). Des Weiteren ist die Graupappel (*Populus × canescens*) ein in Deutschland vorkommender natürlicher Hybrid aus Zitter- und Weißpappel (Grosser 2006). Die wirtschaftliche Nutzung dieser schnellwachsenden, anspruchslosen Baumart war im Laufe der vergangenen Jahrhunderte starken Schwankungen ausgesetzt (Grosser 2006, Aas et al. 2007).

1.3.1 Die Zitterpappel (*P. tremula* L. und *P. tremuloides* Michx.)

Die Pionierbaumart Zitterpappel oder auch Aspe (*P. tremula* L. (Abb. 1), *P. tremuloides* Michx.) gehört zu den am weitesten verbreiteten Baumarten der Welt. Ihre besondere Anspruchslosigkeit gegenüber geographischen und klimatischen Gegebenheiten sowie ihre Stressresistenz und geringe Krankheitsanfälligkeit machen die Zitterpappel zu einer der leistungsstärksten Baumarten für die Energieholzproduktion auf marginalen Standorten. Bei ihrem Anbau auf marginalen Standorten steht die Zitterpappel somit in keiner direkten Konkurrenz mit den ausreichend mit Wasser und Nährstoffen versorgten landwirtschaftlichen Flächen der Lebensmittelproduktion (Dimpfelmeier 1963, Hofmann 1998, Müller 2008, Kollas et al. 2009, Hofmann 2010, Kleemann 2010, Stoll 2011, Liesebach et al. 2012).



Abb. 1: Botanische Zeichnung von Zitterpappeltrieben (*Populus tremula* L.) inklusive Blättern, Blüten und Fruchtsansätzen (Thomé 1885)

Ihre im Vergleich mit anderen Pappelarten größere Standortamplitude lässt sie auf den unterschiedlichsten Böden wachsen (Hofmann 2010, Liesebach et al. 2012). Jedoch können Zitterpappeln durch ihre Genügsamkeit im Hinblick auf den Nährstoffbedarf das Nährstoffpotenzial besser versorgter Standorte nicht voll ausnutzen (Hofmann 2010). Auch kumuliert das Wachstum der Zitterpappel im direkten Vergleich mit anderen Pappelarten später (Liesebach et al. 2012). Für die erfolgreiche Kultur von Aspen empfehlen Traupmann (2004) und Weisgerber (1980) bei ausreichender Wasserversorgung eine Mindestbodenpunktzahl von 30.

Die Bodenpunktzahl (0-100) ergibt sich aus dem prozentualen Ertragsverhältnis zum besten Boden. Böden mit höchster Ertragsfähigkeit besitzen in Deutschland die Wertzahl 100. Die anhand dieses Schätzungsrahmens ermittelten Wertzahlen werden bei Acker als „Bodenzahl“ und bei Grünland als „Grünlandgrundzahl“ bezeichnet. Auf der Grundlage von Boden- und Grünlandgrundzahl werden durch ertragsmindernde Abschlüsse sowie ertragsfördernde Zuschläge für klimatische Verhältnisse, Geländegestaltung, Schädigung durch Waldschatten, Nassstellen usw. die endgültige Acker- und Grünlandzahl (0-100) bestimmt (Tab. 1) (Bayerisches Landesamt für Steuern 2009).

Tab. 1: Klassifikation des Ertragspotenzials nach Stackebrandt et al. (2010)

Potenzieller Ertrag	Acker-/Grünlandzahl	Relatives Ertragspotenzial (%)
Hoch	>50	68-100
Mittel	30-50	41-68
niedrig	<30	<41

Der Gehalt an Nährelementen (N, P, K, Ca und Mg) ist für den Pappelanbau auf einer ehemals landwirtschaftlich genutzten Fläche mit mäßiger Bodenpunktzahl (30-40) ausreichend (Hofmann 2010). Eine Stickstoffdüngung der Fläche zur Ertragssteigerung wird erst nach mehreren Rotationsperioden (ca. 10 Jahren) erforderlich, da Aspen in der Lage sind, über einen langen Zeitraum das natürliche Nährstoffpotential optimal zu nutzen (Hofmann 1998, Makeschin et al. 1999, Hofmann 2010). Zudem kommt es durch den Laubabfall im Herbst zu einer jährlichen Nährstoffrückführung in den Boden.

Vergleichsweise schnell wachsende Hochleistungsklone wie beispielsweise Max (*P. nigra* × *P. maximowiczii*) oder Muhle-Larsen (*P. trichocarpa*) können erst ab einer mittleren Bodenpunktzahl erfolgreich kultiviert werden (Liesebach et al. 2012). Unabhängig von der erreichten Bodenpunktzahl benötigt die Pappel im Anbau eine ausreichende Wasserversorgung und einen nicht zu sandigen, leichten Boden. Zudem ermöglicht eine tiefgründige Durchwurzelbarkeit des Bodens (mind. 60 cm) höhere Biomasserträge (Traupmann 2004).

Als eine besondere Eigenschaft in der Familie der Salicaceae gilt das Zittern (Flattern) der seitlich abgeflachten Blattstiele im Wind und das daraus entstehende typisch rauschende Geräusch, welches charakteristisch und namensgebend für diese Baumart ist. Die Blattbewegung, auch als „flutter syndrome“ bekannt (Cronk et al. 2005), ermöglicht dem isobilateral aufgebauten Blatt abwechselnd mit beiden Blattseiten Licht aufzufangen. Zusammen mit der locker aufgebauten, lichtdurchlässigen Baumkrone sowie spiralg angeordneten Ästen und Blättern ermöglicht das „flutter syndrome“ eine deutlich höhere Photosyntheserate und daraus folgend höhere Wachstumsraten im Vergleich zu anderen Baumarten, die für KUP genutzt werden können (Cronk et al. 2005, Aas et al. 2007). Zusätzlich gilt es, die Wuchseigenschaften der gewählten Baumart zu berücksichtigen. Zitterpappeln neigen im Vergleich zu anderen Pappeln zur vermehrten Bildung von



Wurzelbrut und können nicht vegetativ über Steckhölzer vermehrt werden (Hofmann 2010, Liesebach et al. 2012).

Das Verbreitungsgebiet der Europäischen Zitterpappel (*Populus tremula*) reicht von Europa, Kleinasien, der Mongolei und China über Nordafrika bis nach Sibirien (Abb. 2) (Hemser 1951). Sie wächst von der Ebene bis in die montanen Gebirgslagen (2.000 m ü. NN.) (Pirc 2004). Die breite Standortamplitude ermöglicht gute Masseleistungen im Anbau von *P. tremula* auf frischen, mittelgründigen, nährstoffreichen, lockeren, lehmigen und sandigen Standorten (Hofmann 2010). *P. tremula* wächst ebenfalls auf feuchten, grundwassernahen Standorten sowie auf nährstoffärmeren und trockenen Sand-, Kies- und Lehmböden (Liesebach et al. 2012). Diese sind jedoch für die wirtschaftlich erfolgreiche Produktion von Hackgut mittels KUP hinsichtlich Erntevolumen sowie der maschinellen Bearbeitung als unzureichend einzustufen.

Die Amerikanische Zitterpappel (*Populus tremuloides*) gehört zu den am weitesteten verbreiteten Baumarten in Nordamerika (Liesebach et al. 2012). Ihr Verbreitungsgebiet reicht von Alaska bis Kanada über die Rocky Mountains bis in das Hochland New-Mexikos von montanen Bereichen mit feuchten bis trockenen Standorten (Abb. 2). Begrenzt wird das Verbreitungsareal bei passender Temperatur durch den vorhandenen Niederschlag (Dickmann & Kuzovkina 2008, Liesebach et al. 2012). Ähnlich wie *P. tremula* besitzt auch *P. tremuloides* eine große Standortamplitude und gilt hinsichtlich klimatischen sowie geographischen Bedingungen (Niederschlag, Temperatur, Exposition) als äußerst genügsam. Auf zu geringe Niederschläge reagiert *P. tremuloides* allerdings mit Wachstumseinbußen. Gute Masseleistungen im Anbau von *P. tremuloides* wurden bisher auf eher tiefgründigen lehmigen Böden mit guter Wasserverfügbarkeit erzielt (Liesebach et al. 2012).

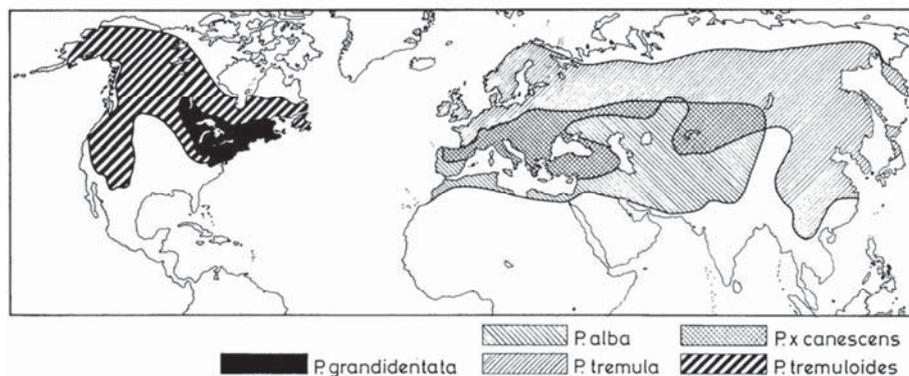


Abb. 2: Verbreitungsgebiet verschiedener Pappelarten inklusive der Europäischen Zitterpappel (*P. tremula*) und der Amerikanischen Zitterpappel (*P. tremuloides*) (Fröhlich & Grosscurth 1973).



1.4 Begriffserklärung Biodiversität und Ökosystem

Als umweltpolitisches Schlagwort gilt der Begriff der Biodiversität spätestens seit dem Jahr der Biodiversität 2010. Der Begriff der Biodiversität ist jedoch keinesfalls neu. Seine Einordnung in die Geschichte der Biologie ist fast als historisch anzusehen. Diversität wurde erstmals zum Ende der 40er Jahre des vergangenen Jahrhunderts von Simpson (1949) und Shannon und Weaver (1949) als „Artenvielfalt“ abgehandelt und wurde in den 80er Jahren um den Begriff Biodiversität als eine Zusammenfassung der gesamten biologischen Vielfalt von Lovejoy (1980) ergänzt (Beierkuhnlein 1998). Erst im Verlauf des „Convention on Biological Diversity – CBD“ (1992) in Rio de Janeiro als eines der bedeutendsten völkerrechtlichen Übereinkommen wurde dieser vormals eher unbekannte Begriff nachhaltig geprägt. Aktuell erklärten die Vereinten Nationen wegen des immer schneller voranschreitenden Artensterbens dieses Jahrzehnt (2011-2020) zum Jahrzehnt der Biodiversität (Schreiber 2014).

Zusammenfassend wird heute unter dem Begriff Biodiversität die biologische Vielfalt in ihrem gesamten Spektrum verstanden. Dies umschließt alle Tier- und Pflanzenarten (natürlich sowie durch Züchtung entstanden), Mikroorganismen und Pilze. Zusätzlich wird die Vielfalt der biotischen Integrationsebenen (Organe, Organismen, Lebensgemeinschaften, Ökosysteme) in Bezug zu räumlichen, zeitlichen und funktionalen Aspekten gesetzt. Des Weiteren wird die Interaktion der verschiedenen Beobachtungsobjekte und Aspekte miteinander berücksichtigt, dies ergibt ein äußerst komplexes Gesamtgefüge (Abb. 3) hinter dem kurzen Begriff Biodiversität (Noss 1990, Solbrig 1994, Beierkuhnlein 1998).

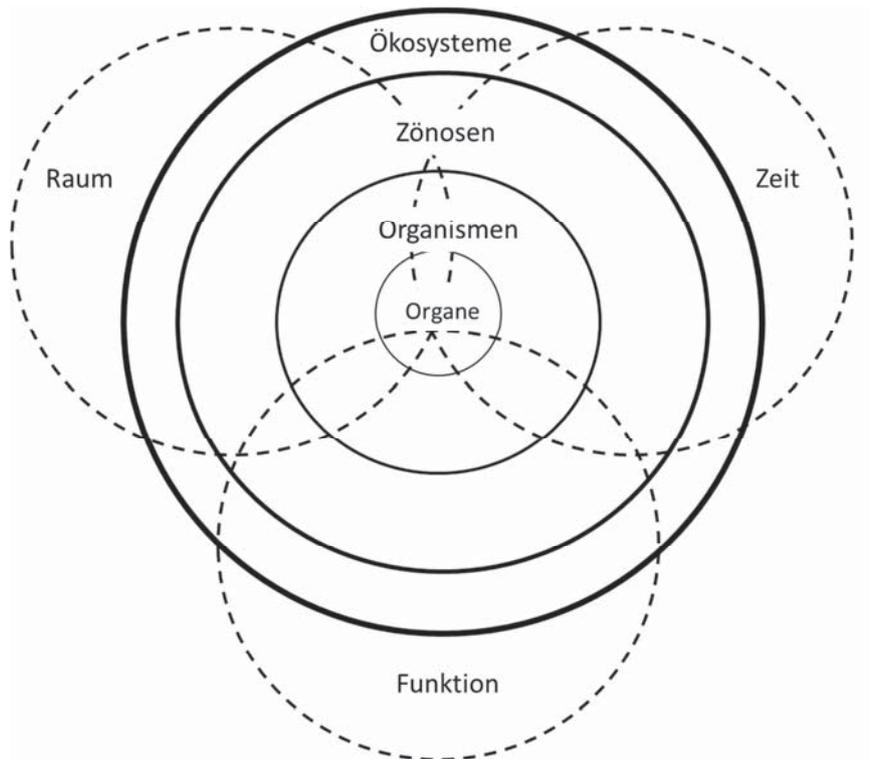


Abb. 3: Schematische Abbildung der biotischen Integrationsebenen als konzentrische Kreise (Organe, Organismen, Zönosen¹, Ökosysteme) sowie der Einfluss der räumlichen, zeitlichen und funktionalen Aspekte auf die verschiedenen Integrationsebenen (gestrichelte Kreise) (Beierkuhnlein 1998).

Allgemein gilt heute, dass Biodiversität meist einen positiven Einfluss auf Ökosystemfunktionen und -dienstleistungen besitzt (Balvanera et al. 2006). Zu den Ökosystemfunktionen und -dienstleistungen gehören eine große Zahl von Prozessen, die mit dem Transport, der Umwandlung und Speicherung von Stoffen, Energie sowie der Interaktion zwischen den Organismen und den abiotischen Ökosystemebenen entstehen. Bei der Bewertung von Ökosystemfunktionen wird zwischen den für den Menschen bedeutungslosen sowie die menschlichen Bedürfnisse bedienenden, sogenannten Ökosystem-Service-Leistungen („ecosystem services“), unterschieden. Zu den für die Existenz des Menschen bedeutsamen Ökosystemleistungen gehören die Steuerung von Klima und Gashaushalt der Erde, die Funktionsweise der Nährstoffkreisläufe, die Produktion von Biomassen, die Regulation des Wasserhaushalts inklusive der Wasserversorgung sowie die Bodenbildung und Erosionskontrolle (Weigel & Schrader 2007).

¹ Artengemeinschaften