

**FRIEDRICH-WILHELMS-UNIVERSITÄT BONN**  
**Landwirtschaftliche Fakultät**

## **MASTERARBEIT**

Im Rahmen des Masterstudiengangs

**Nutzpflanzenwissenschaften**

zur Erlangung des Grades

„Master of Science“

# **PRÄZISIONSLANDWIRTSCHAFT FÜR DEN SCHUTZ UND DIE ERHALTUNG DER BIODIVERSITÄT**

vorgelegt von

Hamid Motamedi  
Martikel-Nr. 2837844

vorgelegt am: 03.08.2021

1. Prüfer: Prof. Dr. (Thomas Döring)
2. Prüfer: Dr. (Andrée Hamm)



# Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten und nicht veröffentlichten Schriften entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form oder auszugsweise im Rahmen einer anderen Prüfung noch nicht vorgelegt worden.

Ort,

---

Unterschrift des Studierenden



## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Masterarbeit unterstützt und motiviert haben. Zuerst gebührt mein Dank Herrn Prof. Thomas Döring, der meine Masterarbeit betreut und begutachtet hat. Für die hilfreichen Anregungen und die konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit möchte ich mich herzlich bedanken. Einen weiteren Dank gilt Herrn Dr. Andrée Hamm, ohne ihn diese Arbeit hätte nicht entstehen können. Letztendlich gilt ein Danke meinen Eltern und meiner Frau, dass sie mich während meiner Studienjahre und während des Prozesses der Recherche und des Schreibens dieser Arbeit uneingeschränkt unterstützt und permanent ermutigt haben.



## Zusammenfassung

Die zunehmende Weltbevölkerung in nächsten Jahrzehnten fordert die nachhaltige Produktion von Nahrungsmitteln heraus. Biologische Vielfalt als Ressourcenbasis für Ökosystemdienstleistungen verschwindet irreversibel im Laufe intensiver Produktion, während die Landwirtschaft die Biodiversität für Ernteertrag braucht. Die vorliegende Masterarbeit befasst sich mit der Interaktion zwischen intensivierter Landwirtschaft und Verlust der Biodiversität in Anbetracht zukünftigen Bedarfs an Ernährungssicherheit und Erhaltung biologischer Vielfalt anhand der Präzisionslandwirtschaft und ihrer Optionen. Der Stand des Rückgangs der Biodiversität und ihrer Elemente in Agrarlandschaft wird hierbei am Beispiel von Segetalflora thematisiert. Die Bedeutung der Ökosystemdienstleistungen wie Bestäubung wird in dieser Arbeit anhand der Auswirkungen des Verlustes dieser Funktionen auf Menschen und Umwelt beschrieben. Anhand der Ergebnisse wird ersichtlich, dass die Ertragssicherheit und Erhaltung der Ökosystemdienstleistungen durch Optionen nachhaltiger Präzisionslandwirtschaft gleichzeitig erfolgen können. Die Sensortechnologien und autonome Luftfahrzeuge tragen zur Generierung der Datensätze aus dem Pflanzenbestand durch die Charakterisierung elektromagnetischer Spektren bei. Denn die Spritzmenge der Mittel in Präzisionslandwirtschaft kann durch Nutzung datengesteuerter Applizierung an den Bedarf der Nutzpflanzen angepasst werden. Hierbei sind die globalen Positionierungssysteme und Geoinformationssysteme sowie Algorithmen maschinellen Lernens von Bedeutung. Die Künstliche Intelligenz und die Robotik in „Smart Farming“ können in Echtzeit oder zeitversetzt benutzt werden, um die Belastung durch Pflanzenschutzmittel zu verringern und ökonomischen und ökologischen Ressourcen für Agrobiodiversität zu schonen. Die Ausweitung der Anbauflächen beeinträchtigt die Ökosystemdienstleistungen. Für die Erstellung der teilflächenspezifischen „Profitkarte“ sowie Nutzung der Agrofortsysteme für Deutschland und Europa werden gute Methoden zur Erhaltung der Biodiversität in den Agrarlandschaften akzentuiert. Die Agrarumweltpolitik in Deutschland wird von Vorgaben der Europäischen Union mitbeeinflusst, daher werden im Rahmen dieser Arbeit die Szenarien und Strategien für ökologische und digitale Landbewirtschaftung in Betracht gezogen. Dabei erfolgt eine Ableitung aus überlappenden Ontologien der Präzisionslandwirtschaft und Biodiversität als Schlussfolgerung, dass die Entwicklung einer serviceorientierten Architektur aus diesen Domänen durch nachhaltige Landwirtschaft gemeinsame Managemententscheidungen und Vertrauen unter Interessentengruppen fördert. Letztendlich kann Agrobiodiversität durch ökologische und sozioökonomische Studien über Kapazität der Agrarökosysteme sowie anhand der Technologien der Präzisionslandwirtschaft erhalten werden.





# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>Biodiversität</b>	<b>15</b>
2.1	Definition . . . . .	15
2.2	Bedeutung der Biodiversität . . . . .	17
2.3	Auswirkungen des Verlusts der biologischen Vielfalt . . . . .	22
<b>3</b>	<b>Präzisionslandwirtschaft</b>	<b>26</b>
3.1	Definition . . . . .	26
3.2	Fernerkundung . . . . .	27
3.3	Sensortechnologien . . . . .	29
3.4	Unbemannte Luftfahrzeuge . . . . .	31
3.5	Bildverarbeitung anhand Algorithmen . . . . .	32
3.6	Umrechnung der Pixel . . . . .	34
3.7	Ortungssysteme . . . . .	34
3.8	Erstellung der Applikationskarte . . . . .	36
3.9	Informationssammlung in Präzisionslandwirtschaft . . . . .	37
3.9.1	Informationssysteme . . . . .	37
3.9.2	Bedeutung von Informationssystemen für die Präzisionslandwirtschaft	38
3.9.3	Modellierungssystem für Biodiversität . . . . .	39
3.9.4	Soziale Netzwerke für die Agrobiodiversität . . . . .	40
<b>4</b>	<b>Ökologischer Ressourcenschutz</b>	<b>43</b>
4.1	Sekundärstoffwechsel . . . . .	43
4.2	Biologische Unkrautregulierung . . . . .	44
4.3	Zwischenkulturen in der Unkrautregulierung . . . . .	46
4.4	Mischungseffekte innerhalb der Deckfrucht . . . . .	48
<b>5</b>	<b>Nachhaltige Landnutzungsplanung</b>	<b>51</b>
5.1	Optimierung der Landnutzung . . . . .	51
5.2	Austauschbeziehung zwischen Landnutzung und Biodiversität . . . . .	52
5.3	Agroforstsystem . . . . .	53
5.4	Skalenübergreifende Effekte der Landnutzungsintensivierung . . . . .	55

<b>6</b>	<b>Ressourcenschutz in Produktion anhand Präzisionslandwirtschaft</b>	<b>58</b>
6.1	Erstellung der Gewinnkarte . . . . .	58
6.2	Smart Farming . . . . .	60
6.3	Datengesteuerte Landwirtschaft . . . . .	62
6.4	Big Data; Analyse massiver Daten . . . . .	64
6.5	Robotik für Nachhaltige Nutzpflanzenproduktion . . . . .	66
6.6	Managemententscheidungen der Zukunft . . . . .	67
<b>7</b>	<b>Fazit</b>	<b>69</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>71</b>

## Abbildungsverzeichnis

1	Die Komponenten, Funktionen und Verbesserungsstrategien für Biodiversität in Agrarökosystemen [Altieri 1994, Abbildung 1.4]. . . . .	16
2	Farbenfroher Ackerwildkräuter auf einem Lupinenacker mit Saat-Wucherblume ( <i>Glebionis segetum</i> ), Kornblume ( <i>Centaurea cyanus</i> ) und Klatschmohn ( <i>Papaver rhoeas</i> ) auf der Halbinsel Usedom in Mecklenburg-Vorpommern (Foto: F. Gottwald [Leuschner <i>et al.</i> 2015]) . . . . .	21
3	Bilder von der NASA und Shutterstock.com [Cardinale <i>et al.</i> 2012]. . . . .	23
4	Der zyklische Charakter des Ansatzes der Präzisionslandwirtschaft [Sudduth 2000, Abbildung. 1] . . . . .	26
5	Beispiele für bildgebende Sensorerfassung a) RGB ([Goodbody <i>et al.</i> 2017]). b) Nahinfrarot (geovantage.com). c) Multispektral (skylab.global). d) LiDAR (flight-evolved.com) [Moreno <i>et al.</i> 2019, Abbildung 2]. . . . .	29
6	a) Originales RGB-Bild von Zwiebelpflanzen und einem Schlauch. b) Rot Kanal getrennt. c) Blauer Kanal getrennt. d) Grüner Kanal getrennt. e) Vergleichsskala [Moreno <i>et al.</i> 2019, Abbildung 7]. . . . .	33
7	a) Originales RGB-Bild von totem Gras mit einigen grünen Pflanzen. b) Rot Kanal getrennt. c) Blauer Kanal getrennt. d) Grüner Kanal getrennt. e) Vergleichsskala [Moreno <i>et al.</i> 2019, Abbildung 8]. . . . .	33
8	a) Roter Kanal des Graustufenbilds; b) kommentiertes Bild zur Unterscheidung der Blätter vom Gras [Moreno <i>et al.</i> 2019, Abbildung 9]. . . . .	35
9	Die Wechselwirkungen zwischen sozialen und ökologischen Teilsystemen in einem Bewirtschaftungssystem aus Nutzpflanzen und Nutztieren; Interaktionen zwischen landwirtschaftlichen Akteuren bestimmen die Landnutzungspraktiken. Im Gegenzug erbringen sie Ökosystemdienstleistungen, die sich sowohl für die Zivilgesellschaft als auch für die Landwirte gut bewähren. Gerade Pfeile repräsentieren Schlüsselinteraktionen, die unter dem Gesichtspunkt gebietsgebundener Integration von Nutzpflanzen und Nutztieren analysiert oder entworfen werden [Moraine <i>et al.</i> 2015, Abbildung 2]. . . . .	41

10	a: Walnuss-Getreide; silvorables System Frankreich (Fotografie: Philippe Van Lerberghe) [agforward 2016], b: Projekt Agroforst; Landwirtschaft im Einklang mit der Natur [Agroforstkampagne], c: Durch achtreihige Windschutzhecken geschützte Siedlung in Nord-Dakota USA [DeFAF], d: Ein Projekt der Agroforstwirtschaft zur Kombinierung der Landwirtschaft und Naturschutzaspekte bei der Produktion an der Technischen Universität München [R & D Projekt 2008-2011] . . . . .	54
11	Das Beispiel der Identifizierung räumlicher Verteilung vom Gewinn eines Bestandes mit potenziell stillgelegten Teilflächen (CAD $ha^{-1}$ : Canadian Dollar per Hectar) [Capmourteres <i>et al.</i> 2018, Abbildung 4]. . . . .	59
12	Der informationsbasierte Managementzyklus für die fortgeschrittene Landwirtschaft ([Saiz-Rubio & Rovira-Mas 2020, Abbildung 1]). . . . .	63
13	Überlappende Kreisdiagramme, die die nachhaltige Präzisionslandwirtschaft und Biodiversitätsschutz für optimale Nutzpflanzenproduktion darstellen (Quelle: Eigene Erhebung). . . . .	68

## Tabellenverzeichnis

1	Elemente der biologischen Vielfalt [Heywood <i>et al.</i> 1995]. . . . .	17
2	Einige Ökosystemdienstleistungen von Biodiversität. . . . .	18
3	Die elektromagnetischen Spektren der Fernerkundung [Moreno <i>et al.</i> 2019, Tabelle 1]. . . . .	28

# 1 Einleitung

Eine nachhaltige Landwirtschaft ist das Ergebnis mehrerer sozioökonomischer Prozesse [Ramankutty *et al.* 2018], was zur Deckung des Bedarfs an Nahrungsmittel für zehn Milliarden Menschen bis 2050 sowohl geforscht als auch politisch umgesetzt werden soll [Ortiz *et al.* 2021]. Die Überweidung und langfristig unzureichende landwirtschaftliche Technologien sowie unpräzises Management des Bodens und Wassers führen zur Belastung der Umwelt und zu Verlust der Ressourcen [Tyleur *et al.* 2017]. In letzten Jahrzehnten haben große Ackerfelder mit Monokulturen bzw. vereinfachten Agrarlandschaften in Europa dominierende Rolle gespielt [Ditzler *et al.* 2021]. Weitere Ausweitung und Intensivierung der Landwirtschaft ist jedoch wichtigste Besorgnis für Umwelt und Biodiversität [Ortiz *et al.* 2021].

Biologische Vielfalt ist in Biowissenschaften ein Bewertungsmaßstab für die Fülle unterschiedlichen Lebens in einem bestimmten Landschaftsraum oder in einem geografisch begrenzten Gebiet [Brockhaus 2021]. Es bezieht sich auf alle Arten von Pflanzen, Tieren und Mikroorganismen, die in Ökosystemen existieren und interagieren [McNeely *et al.* 1993]. Erhalt der biologischen Vielfalt ist für ordnungsgemäße Funktion von Agrarökosystemen und Führung nachhaltiger Landwirtschaft von großer Bedeutung [Dainese *et al.* 2019]. Landwirtschaft ist von biologischer Vielfalt abhängig und viele spezifische Tier- und Pflanzenarten sind ebenso von Ökosystemfunktionen abhängig [Perfecto *et al.* 2009]. Intensivierung der Landwirtschaft gilt als wichtigste Ursache für gegenwärtigen Rückgang der biologischen Vielfalt bei Insekten [Sanchez-Bayo & Wyckhuys 2019]. Die gemeldeten Verluste bei den Wildbestäubern sind alarmierend und könnten die künftige Stabilität der Ökosysteme und Ernährungssicherheit gefährden [Potts *et al.* 2010]. Hauptursache dieser Rückgänge ist der Verlust des Lebensraums dieser Arten aufgrund Intensivierung der Landwirtschaft [Kovaces-Hostyánszki *et al.* 2017]. Die chemischen Herbizide hat die mechanische Unkrautbekämpfung weitgehend ersetzt. Infolgedessen stieg der Einsatz der Pestizide auf deutschen Ackerländer zwischen 1950 und 1977 von < 5 % auf rund 90 % der Fläche [Köhler 1979]. Viele Agrarlandschaften werden daher durch Pflanzenschutzmittel belastet. Eine übersättigende Dosierung der Düngemittel vermindert Bodenfruchtbarkeit und löst Bodenerosion aus, wenn sie an Bedarf der Nutzpflanzen nicht anpasst. Dies bedroht nicht nur biologische Vielfalt, sondern auch gesamte Ökosysteme und Segetalflora, von denen die Landwirtschaft selbst abhängt. In Deutschland macht die Segetalflora rund 10 % der gesamten Flora aus (rund 350 Arten) [Ellenberg & Leuschner 2010]. Während ca. 200 dieser Arten ein breites ökologisches Spektrum aufweisen, sind 150 von ihnen auf Acker-

felder beschränkt [Meyer *et al.* 2013]. Es ist daher wichtig zu verstehen, wie die Art und das Management einer Landbewirtschaftung die biologische Vielfalt beeinflusst, damit das Konzept der zukünftigen Politik für Green-Way-Strategien und Umweltprogramm verwirklicht werden [Martin *et al.* 2019]. Die Umsetzung der Strategien gegen die Schrumpfung des Artenreichtums ist eine Zielsetzung der Bundesregierung in Deutschland. Die Präzisionslandwirtschaft trägt zum Schutz der Elemente der Biodiversität und zur Deckung des Produktionsbedarfs in nachhaltiger Form bei, was gleichzeitig die Produktionsqualität maximiert und die Umweltbelastung minimiert. Die Präzisionslandwirtschaft basiert auf einer Reihe von Ressourcen, die ein variables Management auf dem Feld gestalten. Dieses Konzept stammt aus den 1980er-Jahren und löste eine Revolution im Ressourcenmanagement aus [Robert 2002]. Das führte zu relevanten Untersuchungen in etlichen Publikationen, die auf Notwendigkeit der Nutzung von Daten und Technologien ausgerichtet sind [Plant 2001, Zhang *et al.* 2002]. Anhand diverser Mittel, Systemen und Geräten trägt die Präzisionslandwirtschaft zur Steigerung der Rentabilität, Verbesserung der Qualität und des Umweltschutzes bei [Korduan *et al.* 2004].

Im Rahmen dieser Masterarbeit wird versucht, auf Grundlage einer Literaturrecherche nach einer funktionellen und auf höchstem Potenzial der Biodiversität basierender Landwirtschaft zu richten. Dies erfordert einige Schlüsselerkenntnisse für Ansatz eines widerstandsfähigen Systems, indem sowohl Landbewirtschaftung als auch Umwelt von einem übergreifenden Einsatz solcher belastbaren Systeme profitieren können. In dieser Arbeit wird versucht, nach Lösungen zu suchen, die die Ernährungssicherheit und den Erhalt der biologischen Vielfalt gleichzeitig gewährleistet, sodass die Produktion ökonomisch rechtfertigbar bleibt. Etliche jungen Studien beweisen, dass es möglich sei, diese Herausforderung zu meistern und eine Schadensbegrenzung für Biodiversität zu setzen, wenn es Optionen zur Steigerung der Nachhaltigkeit geben und gleichzeitig weitere Ausweitungen der Produktionsfläche gestoppt werden würden [Bruinsma 2009, Foley *et al.* 2011, Foresight 2011, Godfray *et al.* 2010, Herrero *et al.* 2010]. Im nachfolgenden Kapitel werden die wesentlichen Begriffe der Biodiversität und ihre Bedeutung für Ökosysteme sowie die Auswirkungen des Rückgangs biologischer Vielfalt beschrieben. In Kapitel 3 wird die Präzisionslandwirtschaft und ihre Technologien für Landbewirtschaftung vorgestellt. Anschließend wird in Kapitel 4 über aktuellste ökologische Methoden für Ressourcenschutz berichtet. Kapitel 5 befasst sich mit nachhaltigem Ressourcenschutz anhand optimaler Landnutzungsplanung. Der Ressourcenschutz anhand der Präzisionslandwirtschaft für Nutzpflanzenproduktion wird im Kapitel 6 thematisiert. Diese Arbeit schließt mit einem Forschungsausblick und Fazit.

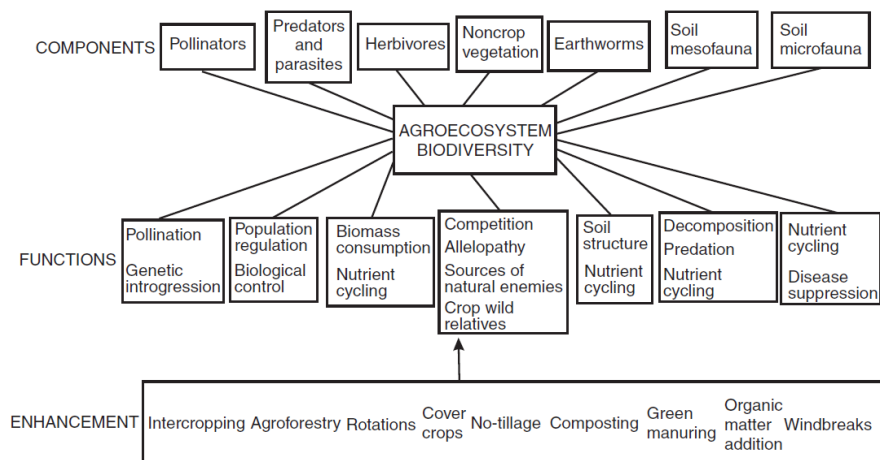
## 2 Biodiversität

### 2.1 Definition

Es gibt mehrere Vorschläge einer offiziellen Definition für die Biodiversität oder biologische Vielfalt. Eine klassische Beschreibung ist das am 5. Juni 1992 auf der Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung in Rio de Janeiro geschlossene Abkommen über die biologische Vielfalt. Diese Vereinbarung wurde als Wahrzeichen für den Umweltschutz von mehreren Nationen unterschrieben. Die Biodiversität beschreibt die Variabilität zwischen lebenden Organismen aus allen Quellen wie terrestrischen, marinen und verschiedenen aquatischen Ökosystemen sowie Variabilität zwischen ökologischen Komplexen, denen diese Organismen angehören. Dies schließt die Diversität innerhalb der Arten und zwischen Spezies sowie Vielfalt in den Ökosystemen ein [Gaston & Spicer 2013].

Die Forschung der Biodiversität untersucht unterschiedliche Erscheinungsformen des Lebens und die Wechselwirkung zwischen den Organismen und den Ökosystemen. Diese beträgt die Vielfalt auf unterschiedlichen Ebenen wie die Diversität der Ökosysteme, die Mannigfaltigkeit der Arten und genetische Variabilität innerhalb einer Art. Die Biodiversitätsforschung umfasst alle Formen, Ebenen und Kombinationen natürlicher Variationen und wird mithin als ein übergreifendes einheitliches Konzept angewendet. Diese beträgt die tatsächliche Anzahl der Arten unter Pflanzen, Tieren und Mikroorganismen und die enorme Vielfalt der Gene in diesen Arten. Dazu gehört auch unterschiedliche Ökosysteme auf dem Planeten wie Wüsten, Regenwälder und Korallenriffe, die Teile der biologischen Vielfalt auf der Erde sind. Die Vielfalt des Ökosystems umfasst alle unterschiedliche Biotopen, Biozönosen und ökologische Prozesse sowie die Variabilität innerhalb einzelner Ökosysteme. Die biologische Vielfalt beeinflusst Mikroklima, Nährstoffkreislauf und lokale hydrologische Prozesse. Diese ist ebenso für Schädlingsbekämpfung und Entgiftung schädlicher Chemikalien in den landwirtschaftlichen Systemen von Bedeutung (siehe Abbildung 1) [Altieri 1994, Altieri 1999]. Die Komponente, Funktionen und Strategien für Biodiversität sind unterschiedlich. Einige Ansätze für diese Vielfalt können anhand einer Unterscheidung zwischen verschiedenen Schlüsselementen dargestellt werden. Diese bilden damit die Grundbausteine der Biodiversität [Gaston & Spicer 2013], die sich wiederum in genetische, organische und ökologische Diversität aufteilen (siehe Tabelle 1). Die Elemente der biologischen Vielfalt lassen sich zwar unterschiedlich definieren, jedoch sind diese nicht voneinander unabhängig. Innerhalb der drei genetischen, organismischen und ökologischen Gliederungen der Diversität werden die Bestandteile der Biodiversität in Form eines ver-





**Abbildung 1:** Die Komponenten, Funktionen und Verbesserungsstrategien für Biodiversität in Agrar-ökosystemen [Altieri 1994, Abbildung 1.4].

schachtelten Musters hierarchisiert, was die Komplexität der Biodiversität besser darstellt. Beispielsweise ist genetische Vielfalt für Populationen und Individuen zuständig, die jeweils von einer Anzahl der Gene auf Chromosomen vervollständigt werden. Gleichmaßen besteht ein organismischer Hierarchieaufbau aus einer Reihe von Stämmen, Familien, Gattungen, Spezies, Unterarten, Populationen und Individuen auf unterschiedlichen Ebenen, indem jeder Bestandteil auf einem niedrigeren Level nach einem Element auf ein höheres Niveau zugeordnet wird.

Die Elemente der Biodiversität können in Hinsicht auf ihre Rolle für Funktion der Anbausysteme klassifiziert werden. Aus diesem Aspekt wird die Biodiversität in der Landwirtschaft wie folgt kategorisiert [Swift & Anderson 1993]:

- Produktive-Biota wird den von Landwirten ausgewählten Pflanzen, Bäumen und Tieren zugeordnet und sind für die Agrarökosysteme von einer entscheidenden Bedeutung.
- Ressourcen-Biota steuern Bestäubung, biologische Regulierung, Zersetzung bei, die für Produktion der Organismen wichtig sind.
- Destruktive-Biota sind beispielsweise Unkräuter, Insektenschädlinge, mikrobielle Krankheitserreger.

<b>Ecological diversity</b>		<b>Organismal diversity</b>
Biomes		Domains or Kingdoms
Bioregions		Phyla
Landscapes		Families
Ecosystems		Genera
Habitats		Species
Niches	<b>Genetic diversity</b>	Subspecies
Populations	Populations	Populations
	Individuals	Individuals
	Chromosome	
	Genes	
	Nucleotides	

**Tabelle 1:** Elemente der biologischen Vielfalt [Heywood *et al.* 1995].

## 2.2 Bedeutung der Biodiversität

In Deutschland gibt es 71500 Arten an Pflanzen, Tieren und Pilzen [Rapoport & Drausal 2001]. Die Erhaltung der Biodiversität erfüllt wesentliche Bedürfnisse des Menschen und ist für einen sauberen und beständigen Wasserfluss, Stabilität des Klimas und Schutz vor Unwetter und Überschwemmung unentbehrlich. Diese bietet den Menschen die Nahrungsmittel wie Gemüse, Obst, Nüsse, Fleisch und bildet daher eine Basis für Lebensmittelindustrie und derer zusammengehörigen Dienstleistungen. Die biologische Vielfalt sichert Nahrungsmittelproduktion für die Weltbevölkerung und spielt eine wichtige Rolle für Gesundheit des Menschen. Eine Nutzung der Artenvielfalt ist der weitverbreitete Einsatz natürlicher Feinde zur Behandlung der Arten, die in der Landwirtschaft als Schädlinge oder Unkräuter und auch meist als umweltfreundliche Ersatzmethoden gegen Bioziden unter der Bio-Kontrolle bezeichnet werden. In diesem Sinne haben sich beinahe zu jeweils 30 und 40 % der Bio-Kontrolle anhand der Versuche auf mehrere Hunderte Pflanzen- und Insektenspezies positiv erweisen können [Kunin & Lawton 1996].

---

Regulierung atmosphärischer Schadstoffe  
Klimastabilisierung  
Bestäubung  
Nährstoffkreislauf  
Schädlingsbekämpfung  
Fotosynthese  
Instandhaltung der Bodenbildung

---

**Tabelle 2:** Einige Ökosystemdienstleistungen von Biodiversität.

Eine bereite Reichweite von industriellen Rohstoffen und Vorlagen, wie beispielsweise die Baumaterialien, Fasern, Farbstoffe, Öle, Wachse, Harze, Gummis und Klebstoffe sind unmittelbar auf biologischen Quellen angewiesen. Das schließt auch die für die Landwirtschaft benötigten Chemikalien ein. Die indirekt von Funktionen und Diensten der Biodiversität abgeleiteter Nutzungswerte sind für Wohlbefinden des Menschen sehr entscheidend (siehe Tabelle 2) [Westman 1977, Ehrlich & Ehrlich 1992, Chapin *et al.* 1997, Daily 1997].

Zahlreiche Autoren beschreiben interagierende Werte der Biodiversität für die Menschen wie folgt [Morton & Hill 2014]:

- i) Ökonomisch; biologische Vielfalt bereitet die Rohstoffe für menschlichen Verbrauch und die Produktion vor, indem die wichtigsten Lebensgrundlagen für die Landwirte, Fischer und Holzarbeiter von der Biodiversität abhängt
- ii) Ökologisch; die Bereitstellung der Funktion vom Ökosystem wird als Schutz für das Leben durch Sauerstoff, saubere Luft und sauberes Wasser, Bestäubung der Pflanzen, Schädlingsbekämpfung und viele andere Ökosystemdienstleistungen gesichert.
- iii) Erholung; die Freizeitaktivitäten sind auf biologische Vielfalt angewiesen wie Wanderung, Camping und Tourismusbranche.
- iv) Wissenschaftlich; die Artenvielfalt ist für eine reichhaltige systematische und ökologische Datenermittlung bzw. für Unterstützung der Wahrnehmung des Menschen über die Welt und ihren Ursprung zuständig.

Ein Grund für Priorität der Biodiversität ist, dass die Spezies zur Sicherung ihres eigenen Überlebens den Produkten anderer Arten bedürftig sind. Dieses ökologische Gleichgewicht beruht auf der gegenseitigen Kooperation für den gemeinsamen Fortbestand. Verschiedene Tierarten und Organismen einer normalen Agrarlandschaft sind von „Vandana Shiva“ wie folgt zusammengefasst [Shiva 2012]:

- i) Nutztiere ernähren sich von pflanzlichen Nebenprodukten.
- ii) Boden und Nutzpflanzen werden von tierischen Abfallstoffen ernährt.
- iii) Nutzpflanzen hinterlassen neben Ernteertrag organische Stoffe wie Stroh und daher sind sie die Nahrungsquellen für Menschen und Tiere.
- iv) Bodenorganismen profitieren von Nutzpflanzen.
  - Bakterien ernähren sich von Zellulosefasern des Strohs, die die Landwirte in den Boden zurückführen.
  - Amöben speisen Bakterien für die Zubereitung der Biopolymere, die zur Aufnahme durch die Pflanzen zugänglich sind und sich in der pflanzlichen Zellwand einlagern.
  - Algen verschaffen organische Materialien zur natürlichen Speicherung des Stickstoffs.
  - Nagetiere erhöhen die nutzbare Feldkapazität durch das Bohren unter der Schläge und Belüften des Bodens.
  - Spinnen, Tausendfüßler und Insekten bearbeiten den Boden durch andauerndes Schleifen organischer Stoffe mit ihrer Bewegung und hinterlassen angereicherten Kot.
  - Regenwürmer wirken in der Bodenfruchtbarkeit mit.
- v) Diverse Lebensformen in der Agrarlandschaft stellen Versorgung der Pflanzen durch die Belüftung, Entwässerung und den Erhalt der Bodenstruktur sowie Bestäubung zur Verfügung.

Kulturpflanzen sind stark von Insektenbestäubung abhängig und diese sind für die Landwirtschaft von wesentlicher Bedeutung [Cock *et al.* 2012]. Weltweit verlassen sich Menschen auf Tierbestäubung, indem es bei bis zu 75 % der Nutzpflanzen durch die Insektenbestäubung eine erhöhte Frucht und Aussaat aufgewiesen wird [Klein *et al.* 2007].

Die Bestäubungsleistung von den Insekten ist weitverbreiteter und relevanter Ablauf für Zusammenhalt der ökologischen Gemeinschaften in den Grünland- und Agrarlandschaften [Kevan 1999]. Mangel der Bestäubung ist in mitteleuropäische Äcker am meisten bei Obst- und Gemüsearten aufgetreten, die nicht zur Selbstbestäubung für einen ausreichenden Ertrag fähig sind [Klein *et al.* 2007]. Ungefähr wird 85 % der bedecktsamigen Pflanzen (*Angiospermen*) durch Insekten bestäubt [Grimaldi & Engel 2005]. Die Bestäubung der Nutzpflanzen wird über wilde Bestäuber aus natürlichen und semi-naturalen Lebensräumen in der Nähe von Ackerfeldern stattgefunden. Aktuell besteht in vielen landwirtschaftlichen Anbausystemen aufgrund intensiver Landbewirtschaftung den Bedarf an zusätzlichen Agenten für die Bestäubung wie angesteuerte Honigbiene und andere Hautflügler wie die westliche Honigbiene, Wildbiene, Hummeln und Luzerne-Blattschneiderbiene. Die Aufrechterhaltung der Produktivität in der Landwirtschaft wird größtenteils auf Bestäubung vorausgesetzt [Klein *et al.* 2007]. Wirtschaftlicher Gewinnwert der jährlichen Bestäubung beträgt 153 Milliarden Euro entsprechend der 9,5 % des weltweit landwirtschaftlichen Produktionswerts [Galil 1977].

Der Rückgang der Anzahl und Diversität von z. B. Wildbienen im Falle der Zerstörung ihrer Habitate hat in vielen Gebieten insbesondere aufgrund ihrer Bedeutung als Bestäuber für Landwirtschaft bzw. ihrer Auswirkung auf Ernteertrag Aufmerksamkeit gewonnen [O'Toole 1993]. Beispielsweise in den letzten 50 Jahren sind Vereinigte Staaten von Amerika mit dem Kollaps der Bienenvölker konfrontiert gewesen [Winfree 2010]. Aktuell liegt die Beweise für die Abnahme der Häufigkeit bzw. für den Rückgang der Vielfalt einzelner Arten von Bestäubern in Europa [Rasmont *et al.* 2005, Biesmeijer *et al.* 2006] und Nordamerika vor [Cameron *et al.* 2011]. Trotz der Kombinierung der Imkerei und Anbausysteme konnte im letzten Jahrhundert das 50%ige Wachstum der bewirtschafteten Honigbienenvölker den 300%ig angestiegenen Bedarf an Bestäubung mittels Insekten für die Nutzpflanzen nicht decken [Aizen & Harder 2009]. Der Anteil von Bestäubung abhängigen landwirtschaftlichen Nutzpflanzen steigt andauernd an. Es scheint so, dass die Nachfrage für die Bestäuber das Angebot an den Wildbestäubern für diese Pflanzen übersteigen wird.

Die Segetalflora (aus lateinischen „*seges*“; Saat oder metonymisch; Saatfeld) beträgt alle wild wachsenden Pflanzenarten in der Agrarlandschaft innerhalb und außerhalb der Räumlichkeiten der Kulturpflanzen, die Ackerunkraut bzw. Begleitkrautgesellschaft bildet (siehe Abbildung 2). Die Ackerwildkräuter passen sich speziell zu den Lebensbedingungen der Äcker [Gottwald & Stein-Bachinger]. Abhängig von Autoren ist „Segetal“ als Unkraut oder als Kulturland-Unkraut bezeichnet worden [Bergmeier 2006, Nowak *et al.* 2014,



**Abbildung 2:** Farbenfroher Ackerwildkräuter auf einem Lupinenacker mit Saat-Wucherblume (*Glebionis segetum*), Kornblume (*Centaurea cyanus*) und Klatschmohn (*Papaver rhoeas*) auf der Halbinsel Usedom in Mecklenburg-Vorpommern (Foto: F. Gottwald [Leuschner *et al.* 2015])

Fanfarillo *et al.* 2019]. Die Segetalarten sind im Hinblick auf Unterstützung der biologischen Vielfalt sowie Bereitstellung zahlreicher Ökosystemdienstleistungen die Hauptbestandteile des Agrarökosystems und der Nutzpflanzenproduktion. Dieser Auftrag wird im Zusammenhang der speziesspezifischen Wechselwirkung mit anderen Organismen umso wichtiger. Die Segetalflora ist relevanter Anbieter der Nistplätze und diese ist trophische Nische für eine Gruppe von Tieren wie die Bestäuber und körnerfressende Insekten- und Vögelarten [Marshall *et al.* 2003, Storkey & Neve 2018, Bretagnolle 2018]. Die Segetalpflanzen sind stark von Umwelt- und Managementbedingungen betroffen. Somit ist die Segetalgesellschaft eines bestimmten Feldes die Ergebnisvariable von Umweltfaktoren wie die Bodenart, der pH-Wert, die Höhe, das Klima und die Landschaftseigenschaften. Sie wird auch von der Art der Bewirtschaftungsmaßnahmen wie Fruchtfolgen, Pflanzenschutz- und Düngemittel sowie von Typus der Nutzpflanzen beeinflusst [Fried *et al.* 2009]. Die Entwicklung einer nährstoffbedürftigeren Flora und eine Zunahme von gebietsfremden und einkeimblättrigen Pflanzen sowie Abnahme von charakteristisch gefährdeten einheimischen Segetalpflanzen sind einige Beispiele für die vorkommenden Angelegenheiten einer Segetalflora. Der Verlust von landwirtschaftlicher Biodiversität oder das Vorkommen des Artenwechsels wurde in Ackerflächen vom Mitteldeutschland innerhalb der letzten 50 Jahre um 23 % der ganzen Segetalarten festgestellt, sodass die durchschnittliche Anzahl der erfassten Arten pro Parzelle in einer Studie von 24 auf 7 reduziert und mittlere Bedeckung der Ackervegetation von 30 % auf 3 % herabgesetzt war [Meyer *et al.* 1993].

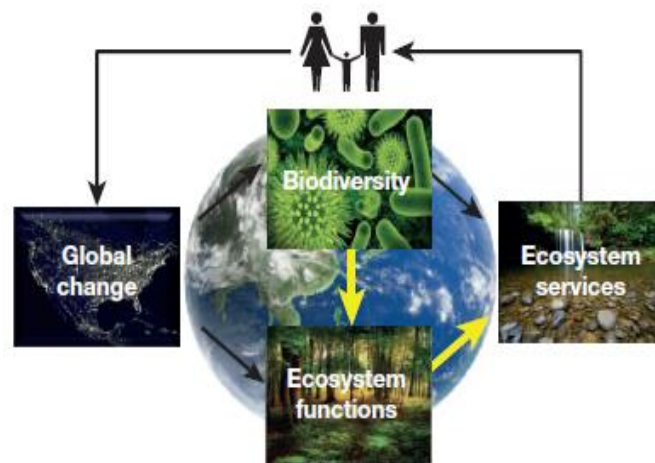
Die ehemaligen charakteristischen Ackerwildkräuter seit den 1960er-Jahren wurden um mehr als 95 % im Bestand abgenommen [Meyer *et al.* 1993]. Die in den deutschen Äckern üblich auftretenden 350 Kräuterarten sind bundesweit um 25 % von der Ausrottung bedroht [Hofmeister & Garve 2006]. Diese Effekte werden hauptsächlich aufgrund flächendeckenden Einsatzes von Pflanzenschutzmittel, extrem dichten Beständen infolge der Überdüngung und in Form von Mineraldünger und Gülle sowie große Anbaufläche mit geringer Vielfalt verursacht [Gottwald & Stein-Bachinger]. Die Segetalpflanzen gewöhnen sich an die landwirtschaftlichen Maßnahmen ein und wachsen innerhalb der Felder mit den Kulturpflanzen. Die Notwendigkeit der Segetalflora für die Biodiversität in den Agrarökosystemen ist weitgehend anerkannt [Marshall *et al.* 2003]. Viele Segetalpflanzen sind wildlebende Verwandte der Kulturen und bilden daher eine potenzielle Genquelle zur Modifizierung der Merkmale gegenüber den Schaderregern wie z. B. Resistenz unter verschiedenen Arten der Kulturpflanzen. Segetalflora ist aus der Perspektive des Umweltschutzes sowie der Evolution an erster Stelle für Menschen von großer Bedeutung. Daher ist ein Ausbau der Segetalflora in der Agrarlandschaft durch die Neubildung der Steppen und Pflanzenimport auch wichtig.

### **2.3 Auswirkungen des Verlusts der biologischen Vielfalt**

Industrielle Landwirtschaft beeinträchtigt den Artenreichtum einschließlich der Grundlage seiner natürlichen Wiederherstellung für die Bodenfruchtbarkeit durch ihre Anbautechnologie und Chemikalien, indem diese vielen Arten die Nahrungsquelle entzieht. Die Beständigkeit der Verschlechterung von biologischer Vielfalt ruft zwei Risiken für aufkommende Generationen hervor. Ein Risiko ist weitgehender Verlust der wertvollen Arten für Gesellschaft. Das andere konzentriert sich auf zweckorientierte Nutzungswerte, die wegen des Artenverlustes bedroht sind, wie beispielsweise Ökosystemdienstleistungen, die für die Menschheit wesentlich sind [Millennium Ecosystem Assessment 2005, Naeem *et al.* 2009].

Biodiversität unterstützt Phänomene des Ökosystems einschließlich vieler unmittelbar den Menschen profitablen Ökosystemfunktionen [Hooper *et al.* 2005]. Allein daraus wird allgemein hervorgegangen, dass es aufgrund des Artenverlustes voraussichtlich starke Kosten auf die Menschheit zukommt [Daily 1997]. Daher ist es wichtig, zu verstehen, wie dieser Rückgang besonders die Lebensmittel- und Faserproduktion beeinflusst. Erst nach dem Gipfel am 1992 in Rio de Janeiro wuchs auf internationaler Ebene das Interesse daran, über das Ausmaß negativer Einflüsse des Artenrückgangs auf die dynamischen Leistungen und die Funktionen von Ökosystemen zu diskutieren. In diesem Rahmen wird versucht, eine Übersicht zu erlangen, wie stark der Artenverlust die Ökosystemfunktionen bzw. die von

Ökosystemen bereitgestellter Güter und Dienstleistungen beeinflusst (siehe Abbildung 3).



**Abbildung 3:** Bilder von der NASA und Shutterstock.com [Cardinale *et al.* 2012].

Die Funktionen eines Agrarökosystems sind ökologische Prozesse, die den Energiefluss, die Nährstoffe und das organische Material binnen eines landwirtschaftlichen Milieus steuern. Dabei benutzen die Pflanzen beispielsweise in primärer Produktion das Sonnenlicht für die Umwandlung anorganischer Materie zu biologischem Gewebe. Die Ökosystemdienstleistungen beteiligten sich an Prozess der Erneuerung der Ressourcen und vermindern den Klimawandel durch ihre Regulierungsdienste. Diese spielen auch Rolle in der Schädlings- und Krankheitskontrolle [Cardinale *et al.* 2012]. Der Artenrückgang verursacht eine Reduktion der Effizienz der Abläufe von den Ökosystemdienstleistungen, die in ökologischer Gemeinschaft biologisch unersetzlich sind, wie beispielsweise Produktion der Biomasse, Zersetzung und Verwertung biologisch wichtiger Nährstoffe. Laut internationaler Biodiversitätsrat IBPES (Intergovernmental Science Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services) sind es ca. 8 Millionen Tier- und Pflanzenarten auf der Erde, wovon ca. eine Million von der Ausrottung bedroht sind [Cardinale *et al.* 2012]. Seit 2005 wurden etliche wissenschaftliche Metaanalysen publiziert, die einen Schwund der Anzahl der Gene, Spezies und funktionellen Organismen beweisen [Balvanera *et al.* 2006].



Laut Studien herrscht es eine Form von Komplementarität in unterschiedlichen Arten [Huston 1997, Loreau & Hector 2001]. Viele dieser Studien weisen auf, dass die Wechselwirkung der untereinander verbundenen Nahrungsketten wesentlich für die Ökosystemfunktionen ist. Daher wird der Verlust eines höheren Verbrauchers in verschachtelten Nahrungsnetzen die Biomasse beeinflussen [Shurin *et al.* 2002, Estes *et al.* 2011]. Die Ausrottung einiger wenigen Spitzenprädatoren lässt nicht nur Pflanzenbiomasse gleichermaßen verringern, sondern auch die Zusammensetzung der Pflanzengruppen in eine Monokultur umwandeln [Duffy *et al.* 2007]. Die Knappheit dieser Klassen wird ebenso die Beschaffenheit der Vegetation, Anfälligkeit gegen den Brand und epidemischen Krankheitsbefall weit und breit in Ökosystemen verändern [Estes *et al.* 2011].

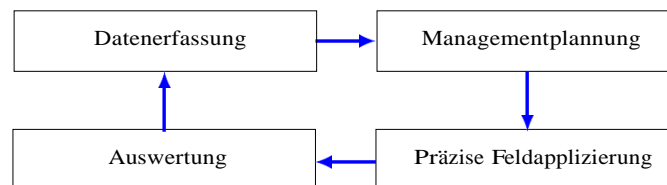
In Deutschland nimmt die Landwirtschaft den größten Landbedarf in Anspruch und bildet daher eine wichtige Grundlage für die Erhaltung biologischer Vielfalt. Der Erhalt der Biodiversität erfordert nachhaltige Anordnung der Landnutzung innerhalb der gesamten Landschaft und die Wahrnehmung des richtigen Verhaltens gegenüber der Umwelt. Des Öfteren wird der Begriff „Biologische Vielfalt“ sehr linear benutzt, indem eine quantitative Variation immer von Vorteil betrachtet wird, wobei es neben der hohen Artenzahl auch die Qualität sowie die Habitatspezialisten von Bedeutung sind. Eine in Deutschland entwickelte Nachhaltigkeitsstrategie zur Erfassung der Biodiversität benutzt die Erscheinung der Vogelpopulation als Indikator in verschiedenen Landschaften. Der stärkste des Rückgangs biotischer Indikatoren wird in der Bewertung agrarisch genutzter Landschaften dargestellt. Selbst in einer gut untersuchten Agrarlandschaft bzgl. der Erfassung zoologischer Taxa bestehen Erkenntnisdefizite, die zwecks einer aussagekräftigen Bewertung der Biodiversität gelöscht werden müssen [Büchs 2012]. Die Senkung der Vogelpopulation weist deutlich einen hohen Risikostatus in Deutschland insbesondere im ländlichen Raum mit intensiver und industrieller Bewirtschaftung auf. Das beträgt den intensiven Einsatz von Düngemitteln und Pestiziden, hohe Konzentration der Viehbestände, kurzen Fruchtfolgen, großen und nicht kleinräumig aufgeteilten Ackerländer ohne Gestaltung der Landschaftselemente, wie beispielsweise die Hecken und Grünlandstreifen, die Segetalflora mit Acker-Unkraut-Gesellschaft. Die Applikationen anhand des Einsatzes schwerer Agrarmaschinen, unangemessener Bodenbehandlung und extremen Anbaus der Energiepflanzen sind auch für einen Artenrückgang in den Agrarlandschaften verantwortlich. Die deutsche Entwicklung für die Nachhaltigkeitsstrategie sieht einen hundertprozentigen Anstieg in der Vogelpopulation bis 2030 ab. Mit dem Vorbehalt vorherrschender Richtlinien wird dieses Ziel nur mit größtem Aufwand durchgesetzt [Umweltbundesamt 2018].

Die Politik der Förderung der Biodiversität in Deutschland genießt eine langwierige Tradition. Das zieht sich auf gut vor dem 1992 in Rio verabschiedeten Abkommen über biologische Vielfalt zurück. Deutsche Gesetzgebung für die Erhaltung des Natur- und Umweltschutzes fördert die Erhaltung der Biodiversität mit erheblicher Ausstattung zur unantastbaren Verwahrung auch in weiteren verankerten Gesetzgebieten. Diese führt zu relevanten Erfolgen nach langjährigem Streben, jedoch scheint der erhöhte Trend vom Artenrückgang durch die Industrialisierung der überbevölkerten Landflächen kaum reversibel zu sein, während die Verkehrsinfrastruktur in den von Menschen besiedelten Gebieten ständig zunimmt (siehe fünfter nationaler Bericht des Übereinkommens über die biologische Vielfalt). Die Bundesregierung sowie andere Vertragsparteien geschlossenen Abkommens einigten sich über nationale Strategie der biologischen Vielfalt (NBS), was selbst auf internationaler Ebene das Aufsehen erregt und die Anerkennung gewonnen hat. Ein Ziel der 2007 verabschiedeten Strategie war, alle staatlichen und nicht-staatlichen Bündnisse und Leitbilder für die Umwelt einzusetzen und zugunsten biologischer Vielfalt aufzurüsten, indem diese die Schrumpfung der Artenreichtum stoppen oder den Trend positiv beeinflussen. Die Umsetzung dieser Strategie ist eine wichtige Zielsetzung von der Bundesregierung. Mit der politischen Umsetzung der biologischen Vielfalt werden möglichst viele Strukturen und Funktionen wiederhergestellt [NSB 2007].

### 3 Präzisionslandwirtschaft

#### 3.1 Definition

Die Präzisionslandwirtschaft („Precision Agriculture“, PA) ist eine Managementstrategie, die zeitliche, räumliche und individuelle Daten von Böden und Pflanzen sammelt, verarbeitet und analysiert, um die Entscheidungsunsicherheiten zu minimieren, sodass es durch ein verbessertes Management gemäß der erfassten Variabilität im Raum und in der Zeit die Ressourcennutzungseffizienz, Produktivität, Qualität, Rentabilität und Nachhaltigkeit der Landbewirtschaftung optimiert wird. Die Präzisionslandwirtschaft besteht aus einem modernen Konzept der landwirtschaftlichen Betriebsführung bei zeitlichem und räumlichem Bedarf. Dabei werden die landwirtschaftlichen Maßnahmen an die Variabilität der Standort- und Bestandsparameter angepasst. Dadurch können die ökonomischen Ziele, wie beispielsweise die Einsparung von den Betriebsmitteln, die Erhöhung der Ertragssicherheit und -qualität erreicht werden. Diese trägt ebenfalls zu ökologischen Zielen wie die Nachhaltigkeit in Form umweltschonender Landwirtschaft bei. Heutzutage erweitern sich die Erkenntnisssysteme der modernen Landwirtschaft durch Verfügbarkeit von immer mehr werdenden größeren Datenmengen. Die Präzisionslandwirtschaft ist das Agrarindusriemangement oder das Bewirtschaftungskonzept, das auf der Erfassung der Variabilität und auf der Messung der Reaktion innerhalb der Felder beruht [Whelan & James 2010].



**Abbildung 4:** Der zyklische Charakter des Ansatzes der Präzisionslandwirtschaft [Sudduth 2000, Abbildung. 1]

Die Präzisionslandwirtschaft funktioniert in Form eines umfassenden Systems zur Optimierung der landwirtschaftlichen Produktion. Diese Landbewirtschaftung wird für die zeitliche und räumliche Variabilitätserfassung und autonome Führung der Applikation innerhalb der Teilschläge des Feldes eingesetzt [Norton & Swinton 2018]. Dies basiert größtenteils auf dem globalen Positionierungssystem (GPS) und Bilderfassung bei Fernerkundung. Diese Technologien optimieren die Qualität und Effizienz der Produktion, reduziert den Umwelt-

schaden und minimiert Unstimmigkeiten. Die Präzisionslandwirtschaft ermöglicht eine zielgerichtete Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Nutzflächen zur richtigen Zeit mit den richtigen Mengen, die von den tatsächlichen Bedürfnissen der Pflanze abhängen [Sudduth 2000]. So können die Umweltbedingungen weitgehend berücksichtigt werden. Die Präzisionslandwirtschaft für Pflanzenproduktion kann als einen vierstufigen Prozess angesehen werden. Erster Schritt dieses Prozesses ist die räumliche Messung der Faktoren, die Pflanzenproduktion einschränken oder anderweitig beeinflussen. Diese variablen Daten werden dann zur Entwicklung der Managementpläne für variable Anwendung der Eingaben benutzt. Im Anschluss werden Entscheidungen für die Modulation des Betriebsmitteleinsatzes z. B. über Pflanzenschutzmittel und Düngung getroffen. Letztendlich wird die Wirksamkeit der Präzisionslandwirtschaft im Hinblick auf Wirtschaftlichkeit und Umweltauswirkungen bewertet. Diese Auswertung wird zu einem Teil des Datenerfassungsprozesses für die nächste Anbausaison. Mehrere Iterationen durch diesen Zyklus ermöglichen eine Verfeinerung der präzisen Managementpläne in der folgenden Vegetationsperiode (siehe Abbildung 4). Die entworfene und entwickelte Geräte und Systeme (z. B. GPS-Systeme, Sensoren u. Probenentnahmegерäte) sind für die effiziente Erfassung der in der Präzisionslandwirtschaft erforderlicher Daten von wesentlicher Bedeutung. Alle Daten werden automatisiert erfasst, analysiert und gespeichert. Derzeit treibt Landwirtschaft durch Feldroboter, Drohnen und automatisierte Lenksysteme, autonomes Fahren, datengestützten gezielten Einsatz von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln und die Digitalisierung voran. Die Verfahren der Präzisionslandwirtschaft basieren im Wesentlichen auf einer Kombination aus modernen Sensortechnologien, Satellitennavigation, Ortungstechnologien und Internet der Dinge [Schrijver *et al.* 2016].

### 3.2 Fernerkundung

Die Hauptakteure der Landwirtschaft-Industrie in Deutschland und Europa sind an Entwicklung autonomer Drohnen interessiert, deren Sensoren z. B. bei der Ermittlung des Bewässerungsbedarfs oder bei der Detektion der Krankheiten von Pflanzen helfen. Die Fernerkundung ist eine weitere Technologie, die für die Präzisionslandwirtschaft vielversprechend ist. Etliche Forscher und Produzenten verwenden bereits die Luft- und Satellitenbilder, um die Variabilität innerhalb der Felder abzubilden. Diese Technologie wurde besonders hilfreich bei der Erkennung von Problemen im Pflanzenbestand wie Stress während der Saison, die durch den Schädlingsbefall und den Wasser- und Nährstoffmangel verursacht werden kann [Frazier *et al.* 1997]. Die Fernerkundung ist aktuell zu einem wesentlichen Verfahren in verschiedenen Bereichen geworden wie Ökologie, Agrar- und Forstwissenschaft,

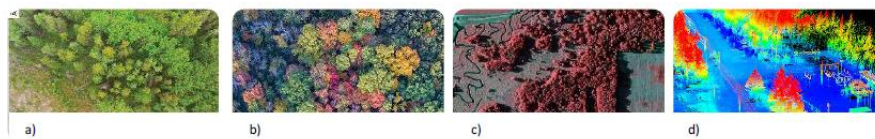
	Ultra Violet	visible	NIR	SWIR	Water absorption	MWIR	LWIR	Micro waves	Radio waves
Wavelengtht (nanometers)	10-400	390 – 750	750- 1400	1500-2800	2900	3000 -8000	8000-14000		1mm-1m

**Tabelle 3:** Die elektromagnetischen Spektren der Fernerkundung [Moreno *et al.* 2019, Tabelle 1].

Geografie und Kartierung des Landes sowie bildgebende Erfassung zur Generierung der Information über die Erdoberfläche und Kronendächer [Coops & Tooke 2017]. Die Instrumente der Fernerkundung nehmen elektromagnetische Strahlung, wie beispielsweise Gammastrahlung, Röntgenstrahlung, Ultraviolett, sichtbaren Bereich, Infrarot und Mikrowellen auf (siehe Tabelle 3), deren Unterschiede an ihren Wellenlängen liegt [Padua *et al.* 2017]. Die Fernerkundungssensoren der Erfassung von der Erdoberfläche können als aktiv oder passiv eingestuft werden [Coops & Tooke 2017]. Ein wichtiger Bestandteil der Durchführung von der Fernerkundung ist das Bildgebungsverfahren anhand der Erfassungsnutzlast, was die Leistungsfähigkeit und Verwendbarkeit der selbstfliegenden Luftfahrzeuge konkretisiert [Siebert & Teizer 2014, Padua *et al.* 2017]. Zu dem zählen die speziell für verschiedenen Drohnen entwickelten Reflexkameras, die sich von kostengünstiger digitaler Einzel-Linsen-Kamera bis hin zu teuren Geräten wie LiDAR (Light Detection And Ranging) erstrecken [Heaphy *et al.* 2017].

Die wichtigsten angewendeten Sensoren für die Forst- und Landwirtschaft sind; Rot-Grün-Blau (RGB), Nahinfrarot (NIR), Multispektral und LiDAR, deren generierte Bilder in der Abbildung 5 dargestellt wird. Die RGB-Bilderfassung wird oft zur Erstellung der Modelle für digitale Topografie in Agrar- und Forstwirtschaft benutzt, wenn kein spezielles Spektrum z. B. bei der Untersuchung einer Spalte im Waldkronendach erforderlich ist [Getzin *et al.* 2012]. Die zuständigen Sensoren für den Wellenlängenbereich von Nahinfrarot (NIR) sind spezifisch zur Erkennung der Pflanzenkrankheiten und zur Identifizierung der Pflanzen [Torresan *et al.* 2017]. Die LiDAR-Sensoren können in den Baumbestand durchdringen und präzise Messung für die Biomassebestimmungen und auch die Erkennung von dem Bewuchs des Unterholzes leisten, jedoch sind diese kostenaufwendig und erfordern spezialisierte Softwares zur Analyse ihrer Bilderfassung [Padua *et al.* 2017]. Die Vegetationsindizes werden unter dem Verhältnis des Reflexionsvermögens bei verschiedenen Wellenlängen verstanden und lassen sich in der Regel auf die Beobachtung photosynthetischer

Aktivitäten und die Veränderungen pflanzlicher Strukturen anwenden [Huete *et al.* 2000]. Etliche Vegetationsindizes wurde zur Bestimmung biologischer Parameter der Vegetation geprüft und entwickelt [Onyia *et al.* 2018]. Es gibt mehr als 100 Vegetationsindizes, die sich in sieben Kategorien aufgliedern [Xue & Su 2017]. Beispielsweise wird die Kategorie grüner Bandbreite zur Beschreibung der Vitalität und Gesundheit für die Grünpflanzen benutzt. Eine der wesentlichsten durchzuführenden Aufgaben der Fernerkundung ist die Identifizierung zwischen exotischen und einheimischen Pflanzenarten anhand der Nutzung von den Vegetationsindizes. Das Ergebnis trägt zu einem besseren und angemessenen Pflanzenmanagement innerhalb der Agrarlandschaft bei. Die Ermittlung der Vegetationsbeschaffenheit anhand der Fernerkundung basiert auf dem Prinzip der speziellen Spektralsignaturen verschiedener Elemente [Moreno *et al.* 2019]. Angesichts der technologischen Fortschritte in der Fernerkundung kann dieses Studiengebiet signifikanten Beitrag zur nachhaltigen Landbewirtschaftung leisten, während der Bedarf an automatisierte Pflanzenerkennungssysteme innerhalb der Nutzpflanzen weiter ansteigt.



**Abbildung 5:** Beispiele für bildgebende Sensorerfassung a) RGB ([Goodbody *et al.* 2017]). b) Nahinfrarot (geovantage.com). c) Multispektral (skylab.global). d) LiDAR (flight-evolved.com) [Moreno *et al.* 2019, Abbildung 2].

### 3.3 Sensortechnologien

Die meisten kommerziellen Geodatenerfassungen in der Präzisionslandwirtschaft erfolgen durch die Laboranalyse der gesammelten Proben. Die Einschätzung individueller Bedürfnisse einer Nutzpflanze ist zeitaufwendig und mühselig. Daher bestehen ein enormer Bedarf und auch eine enorme Chance für die Entwicklung der Sensortechnologien, die eine automatisierte Erfassung von Boden, Ernte und Schädlingsdaten ermöglichen. In den letzten 10 Jahren hat die Präzisionslandwirtschaft rascher Fortschritte aufgrund technologischer Innovationen in den Bereichen Sensoren, Computerhardwares, Nanotechnologien gemacht,

die eine spezifische Identifizierung der Felder, wie beispielsweise in integrierter Unkrautbekämpfung ermöglichen [Sposito *et al.* 2021]. Es ist besonders wichtig, Sensortechnologien für die sich stets zeitlich und räumlich ändernden Parameter wie der Stickstoff und die Feuchte im Boden sowie der Gesundheitszustand der Pflanzen zu entwickeln. Etliche entwickelte Sensoren erfassen in dem Bereich die Bodenmerkmale und -substanzen wie der Nährstoffgehalt, der pH-Wert, die Lagerungsdichte und elektromagnetische Eigenschaften. Auch ist es möglich, mit manuellen Methoden oder Labormethoden die Variabilität innerhalb des Feldes zu charakterisieren. Die Sensoren ermöglichen aber die Erfassung von Daten mit einer viel feineren räumlichen Auflösung für verschiedene Ebenen der Bewirtschaftungsmaßnahmen wie Stickstoffdüngung, Pflanzenschutz, die Unkrautbekämpfung [Sudduth 2000].

Dank genauer Planung kann die Effektivität mechanischer Verfahren erhöhen und oder die Ausbreitung der Herbizide reduzieren [López-Granados *et al.* 2016]. Kombination von unbemannten Luftfahrzeugen mit fortschrittlichen Kameras und Sensoren ermöglicht die präzise Überwachung großer Bereiche in wenigen Minuten. Die Datenaufnahme kann über Kronendach anhand verschiedener Sensoren stattgefunden werden. Beispielsweise RGB-Kameras werden verwendet, um Vegetationsindizes wie der Grün-Rot-Vegetationsindex (GRVI), Grünheitsindex (GI) und übermäßiger Grünheitsindex (ExG) mit akzeptabler oder hoher Genauigkeit zu berechnen. Die Daten können kalibriert und ausgewertet werden. Dadurch ergibt sich die Berechnung passender Vegetationsindizes, die den Zustand der Bestände räumlich und zeitlich ermitteln und abschätzen können. Dieser Prozess kann in Echtzeit und nahezu Echtzeit geführt werden [Xue *et al.* 2017]. Die RGB- oder VIS-Sensoren sind die gängigsten und am weitesten verbreiteten kommerziellen Kameras. Ihre Anwendungsmöglichkeiten stehen aufgrund ihres Potenzials und ihrer kostengünstigen Betriebsanforderungen seit Jahren im Fokus der meisten Forschungen [Jannoura *et al.* 2015]. Daten dieser Sensoren können per se verwendet werden oder ein georeferenziertes Orthomosaik zu erstellen. Dabei werden die Einzelbilder entzerrt, mit GPS-Daten georeferenziert und zu einem einzigen Bild über das gesamte Untersuchungsgebiet zusammengefügt.

Die multispektralen Sensoren werden für ein breiteres Spektrum von Berechnungen der Vegetationsindizes verwendet, da sie sich auf eine größere Anzahl von elektromagnetischen Bändern verlassen können. Die Beispiele für solche Sensoren sind *Micasense RedEdge*, *Micasense Altum*, *TetraCam* und *Parrot Sequoia+*, die jeweils in verschiedenen Spektralbändern funktionieren können und aus Kombination von verschiedenen Wellenlängenbereichen, wie beispielsweise Blau, Grün, Rot, roter Rand, Nahinfrarot (NIR) und thermisches Infrarot aufnahmefähig sind. Die Marktpreise dieser Sensoren erstrecken sich von 3000 bis 17000

Euro. Dank der Verfügbarkeit einer höheren Anzahl von radiometrischen Bändern können die Algorithmen des maschinellen Lernens auf nicht sichtbare Erkennung wie Pflanzenkrankheiten im Frühstadium, Beurteilung der Feldqualität, Bodenwassergehalt und mehr erweitert werden [Candiago *et al.* 2015].

Die hyperspektralen Sensoren können Hunderte bis Tausende von schmalen radiometrischen Bändern normalerweise im sichtbaren und infraroten Bereich aufzeichnen. Diese haben eine geringere Auflösung im Vergleich zu RGB-Sensoren, daher sollte eine geringere Flughöhe und eine ausreichende horizontale und vertikale Überlappung der Aufnahmen bei diesen Sensoren berücksichtigt werden. Jedes Band oder jede Kombination von Bändern ist so schmal, um eine spezifische Eigenschaft des Feldes erkennen zu können. Jeder hyperspektrale Sensor kann nur eine bestimmte Anzahl von Bändern erkennen, daher muss das Ziel der Untersuchung sehr klar sein, um den richtigen Sensor auszuwählen. Diese sind viel teurer, schwerer und größer als andere beiden Sensoren. Der Arbeitsablauf hyperspektraler Sensoren für die radiometrische Kalibrierung ist komplexer. Die Bildgröße und der Datenfluss sind größer als beide anderen Sensoren. Diese Sensoren können eine große Datenmenge erfassen, aber die Beschränkung der Nutzlast von Luftfahrzeuge erlauben möglicherweise nicht den Transport geeigneter Datenspeichersysteme. Anhand dieser Sensoren ist es möglich, schmalbandige Indizes wie den chlorophyll-Absorptionsverhältnis-Index (CARI), Grünheitsindex (GI), Grünheit-Vegetationsindex (GVI), Photochemischer Reflektanz-Index (PRI) und modifizierte normalisierter Differenz-Vegetationsindex zu berechnen. Solche Sensoren können bis zu 50000 Euro (Beispiele sind: *CUBERT*, *Corning microHSI 410 SHARK*, *Rikola Ltd. hyperspectral camera*) kosten, wobei sie in den letzten Jahren ökonomischer geworden sind [Sposito *et al.* 2021]. Die RGB- und Multispektralbilder sind in Algorithmen und Applikationen maschinellen Lernens zu verwenden. Dafür ist es erforderlich, einen großen Datensatz von Bildern für das Training und Testen des Algorithmus zu sammeln [Bah *et al.* 2018]. Verschiedene Sensoren befinden sich in unterschiedlichen Entwicklungsstadien bei Regierung, Universität und Industrie. Die Sensortechnologien der Präzisionslandwirtschaft fördern die Produktionsqualität bei gleichzeitiger Minimierung der Umweltbelastung ansteigen.

### **3.4 Unbemannte Luftfahrzeuge**

Es gibt zwei Haupttypus kleiner unbemannter Luftfahrzeuge wie die Starrflügler-Drohne und Multirotordrohne, die jeweils hinsichtlich mit der Umwelt und mit geforderter Aufgabe ihre Vorteile haben. Die Drohnen sind im Sinne der Kosteneffizienz für kleine Projekte mit ihrer sehr hohen Auflösung und hoher Positionierungsgenauigkeit von Vorteil, wobei



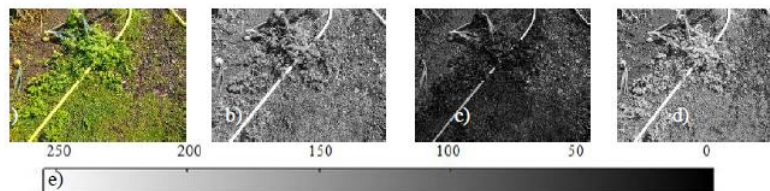
diese aufgrund der Empfindlichkeit in schlechten Wetterbedingungen und auch aufgrund einschränkender Auflagen regierungsamtlicher Verordnungen für die Sicherheitsmaßnahmen auch nachteilig sein können [Padua *et al.* 2017]. Die Starrflügler-Drohne kann mehrere Kilometer weit Weg vom Abflugort fliegen und es eignet sich für die Kartierung und für die Applikation in der Landvermessung sowie in der Agrar- und Forstwirtschaft. Manche Arten dieser Luftfahrzeuge erreichen ein Niveau der Bildauflösung bis zu wenigen Zentimetern Genauigkeit. Der Abflug kann per Hand oder über eine Rampe stattfinden und die Flugzeit beträgt in der Regel eine Stunde, wobei diese normalerweise kleinere Nutzlasten haben [Lisein *et al.* 2013]. Die Multicopter verfügen über mehreren Rotoren, die rund um den Angelpunkt angebracht sind. Die Multicopter ermöglichen ein Niveau von millimetergenauer Bildauflösung. Diese sind ungefähr zu einer dreißigminütigen Flugzeit fähig und den Abflug kann vertikal gestartet werden. Die Kapazität der Nutzlast hängt von der Anzahl der Rotoren ab [Padua *et al.* 2017].

Aufgrund der geringen Kosten und hohe Effizienz haben solche pilotlosen Drohnen sich für die Nutzung in der Forstwirtschaft, in der Landschaftsökologie und über die Kulturlandschaften weit ausgebreitet [Moreno *et al.* 2019]. Diese sind zu einem gängigen Werkzeug in der Präzisionslandwirtschaft und erste Wahl für schnelle und präzise in-situ-Fernerkundung oder -vermessung geworden, weil sie kostengünstig, vielseitig und benutzerfreundlich sind [Radoglou-Grammatikis *et al.* 2020]. Diese Systeme bieten zwar nicht die gleiche räumliche Abdeckung wie Satelliten, dafür aber eine räumliche und zeitliche Auflösung, die andere Systeme wiederum nicht bieten. Der weitere Vorteil dieser Systeme ist die Möglichkeit, leicht zu implementierende Daten in Echtzeit zu sammeln und Bereiche mit hohem Gefährdungsgrad und oder schwer zugänglichen Bereichen zu vermessen. Diese ermöglichen es Betreibern, auch bei ungünstigen Wetterbedingungen Daten zu sammeln, beispielsweise an sehr bewölkten oder nebligen Tagen, an denen Erkennungssysteme der Satelliten versagen oder stark veränderte Datensätze erzeugen [Manfreda *et al.* 2018].

### **3.5 Bildverarbeitung anhand Algorithmen**

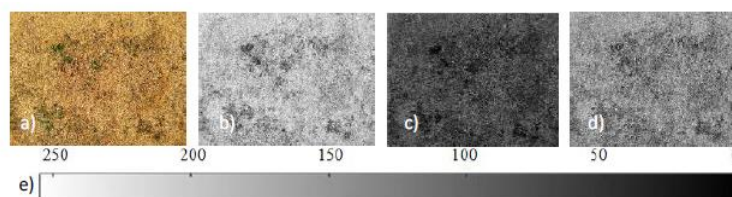
Einige Bilder als Beispiel aus umgebender Plantage im Gewächshaus der Universität Rhein-Waal in Kleve wurde im Rahmen der Testung und Validierung der Algorithmen in der Abbildung 7 gezeigt. Solcher Algorithmus wird zur Farbtrennung und -analyse erfasster Bilder auf jedem unterschiedlichen Farbkanal beigetragen. Hierdurch kann das Bild in drei verschiedenen Graustufendarstellung anhand drei Farbkanälen konvertiert werden. Die Intensität der Graustufe ist vom eingegebenen Farbkanal abhängig. Diese Algorithmen sind

ziemlich schnell und hilfreich bei der Trennung der Objekte mit unterschiedlichen Reflexionseigenschaften, wie beispielsweise die Unterscheidung der Früchte aus den Blättern. Die Bestimmung einer gewünschten Größenordnung für die Bilder wird vor der Anwendung des Algorithmus bestimmt. Die grau gestuften Bildaufnahmen können simpel ausgewer-



**Abbildung 6:** a) Originales RGB-Bild von Zwiebelpflanzen und einem Schlauch. b) Rot Kanal getrennt. c) Blauer Kanal getrennt. d) Grüner Kanal getrennt. e) Vergleichsskala [Moreno *et al.* 2019, Abbildung 7].

tet werden, indem ein dunkleres Bild eine geringere Farbmenge im entsprechenden Kanal repräsentiert und umgekehrt. Die Abbildungen 6 und 7 zeigen zwei Bilder mit den entsprechenden Graustufenbildern, nachdem der Algorithmus der Farbtrennung für diese angewendet wurde. Eine Skala mit den Schwellenwerten von 0 bis 255 definiert den Übergang von Schwarz zu Weiß. Die Bilder von jedem Farbkanal können zur Entdeckung bestimmter Pflanzen oder Objekten verarbeitet werden. Anhand der Anwendung eines Schwellenwertes auf einen Kanal kann den Hintergrund umgehend entfernt und somit gewünschtem Objekt für weiteren Prozess auf dem Vordergrund hinterlassen werden. Verschiedene Vorgänge können zur Ermittlung gewünschten Objekts vorgenommen werden, sodass beispielsweise zwei unterschiedliche Kanäle von einem zum anderen subtrahiert werden.



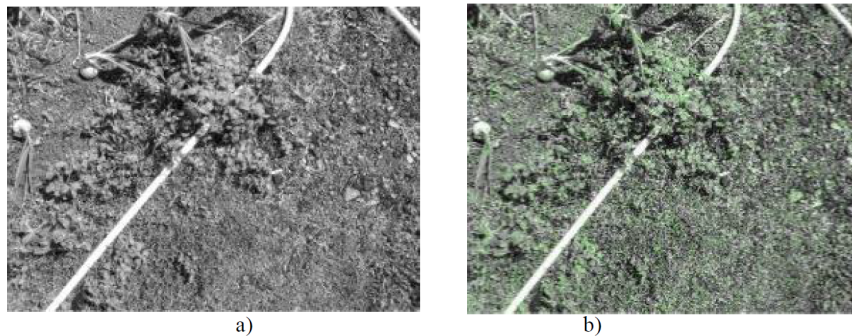
**Abbildung 7:** a) Originales RGB-Bild von totem Gras mit einigen grünen Pflanzen. b) Rot Kanal getrennt. c) Blauer Kanal getrennt. d) Grüner Kanal getrennt. e) Vergleichsskala [Moreno *et al.* 2019, Abbildung 8].

### 3.6 Umrechnung der Pixel

Dieser Algorithmus wird durch die Weiterentwicklung des trennenden Farbalgorithmus modifiziert. Das wird zur Unterscheidung des gewünschten Zielobjekts in einem bestimmten Bild beigetragen. Über den Hauptfarbkanal eines gesuchten Objektes wird das ursprüngliche Bild mit den Graustufenbildern verglichen, um möglich versteckte Bereiche zu ermitteln. Denn diese Bereiche sind trotz des Besitzes gleicher Farbmerkmale kaum in den Originalbildern unter allen dargestellten Farben zu unterscheiden. Ein Beispiel für die Anwendung dieses Algorithmus ist die Feststellung des Vorkommens bestimmter Arten anhand bildgebender Erfassung. Am Beispiel, wie beispielsweise dargestellt in der Abbildung 7, werden die Graustufenbilder im roten Bereich zur Unterscheidung des Grases und Blättern zwischen anderen Arten und Objekten verwendet, sodass bestimmte Spezies durch bestimmtes Pixel auf dem Bild repräsentiert und erhalten bleiben wird. Daraus wird sich ein vorgemerkttes Graustufenbild ergeben. Das Resultat dieses Prozesses ist in der Abbildung 8 gezeigt, indem das Gras und die Blätter nach wie vor in ihrer Originalfarbe ersichtlich sind, während andere Objekte oder Spezies im Graustufenbild gezeigt werden. Solche einfachen Prozesse stellen Vorteile für menschliche Betreiber bereit. Zur weiteren Verarbeitung dieser Bilddateien wird maschinelles Lernen in Anspruch genommen, damit die Spezies im erstellten Trainingsdatensatz annotiert und markiert werden [Moreno *et al.* 2019]. Maschinelles Lernen fördert den Aufbau eines lernfähigen Entscheidungshilfesystems, das den Boden, die Kultur und das Klima in einem Feld überwacht und für die Behandlungen wie die Bewässerung, die Düngemittel und Ausbringung der Pflanzenschutzmittel für bestimmte Teile dieses Feldes in Echtzeit Anwendung findet [Dimitriadis & Goumopoulos 2008]. Als weitere Anwendungen maschinellen Lernens in der Landwirtschaft sind weitere Erfassung anhand Sensordaten für Erntequalität, Detektion von Krankheiten, Unkrauterkenennung, Wasser- und Bodenmanagement und die Abschätzung des Ertrags zu erwähnen [Liakos *et al.* 2018].

### 3.7 Ortungssysteme

In fast allen Aktivitäten der Präzisionslandwirtschaft findet heutzutage differenziertes globales Positionierungssystem (DGPS) zur Bereitstellung der Raumkoordinaten die Anwendung. Eine präzise Erfassung räumlicher Variabilität von Boden-Pflanzeigenschaften benötigt Informationen, die durch die Raumkoordinaten generiert werden. Die vollständige Verfügbarkeit der GPS-Satellitenkonstellation seit den frühen 1990er-Jahren war ein Schlüssel für die effektive Messung der räumlichen Variabilität innerhalb des Feldes. Das globale Positionierungssystem (GPS) ist ein satellitengestütztes Radio-Navigationssystem, das vom



**Abbildung 8:** a) Roter Kanal des Graustufenbilds; b) kommentiertes Bild zur Unterscheidung der Blätter vom Gras [Moreno *et al.* 2019, Abbildung 9].

US-Verteidigungsministerium entwickelt ist und betrieben wird. Differenziertes globales Positionierungssystem ist eine Bezeichnung für die Prozesse, die gleichzeitig mehrere GPS-Empfänger anwenden, um die Genauigkeit der Ortung zu erhöhen. Differenziertes globales Positionierungssystem basiert auf der Tatsache, dass es immer eine Differenz gibt, wenn mit zwei GPS-Empfänger simultan auf nahe gelegenen Messpunkten dieselben Satelliten beobachtet werden. In dieser Weise kann die gleichartig auftretenden Fehler zwischen den Messungen von den Empfängern korrigiert werden. Es ermöglicht den Benutzern, sich nach dreidimensionaler Position und Geschwindigkeit überall auf der Welt genau zu erkundigen [Tyler *et al.* 1997].

Eine relativ neue Verwendung von GPS-Daten ist die topografische Kartierung unter Verwendung eines Ansatzes, der als Echtzeitkinematik (RTK) bezeichnet wird. In vielen Feldern kann die Topografie einen tief greifenden Einfluss auf die Variabilität innerhalb des Feldes haben. Die Topografie steuert die Umverteilung des Oberflächenwassers über die Schläge. Diese kann das Pflanzenwachstum unterschiedlich beeinflussen und auch Informationen über die Unterschiede zwischen den Bodenarten liefern. Mithilfe von georeferenzierter Datenaufnahme durch Sensoren kann 3-D-Geometrie-Rekonstruktion in einem zentralen Computersystem zustande kommen. Das ermöglicht eine räumliche Erfassung des Bestandes, was sich bei einer Regelmäßigkeit der Messung auch gute zeitliche Auflösung herausgestellt. Die Echtzeitkinematik kann die Höhenmessung bis zu 5 cm Genauigkeit liefern. Das ist eine Verbesserung von fast zwei Größenordnungen im Vergleich zu DGPS. Diese Verbesserung ist möglich, weil die Echtzeitkinematik-Systeme zusätzliche Informationen gewinnen, sodass sie die Trägerwelle des GPS-Signals überprüfen können [Saiz-Rubio & Rovira-Mas 2020].

### 3.8 Erstellung der Applikationskarte

Aus dem Standpunkt der Präzisionslandwirtschaft werden hochauflösende Ertragsdaten nicht genügend in der Landwirtschaft als wertvolle Informationsquelle berücksichtigt. Die räumlichen Schwankungen des Ernteertrags ist ein wichtiger Input für die standortspezifische Entscheidungsfindung [Florin *et al.* 2009]. Die Ertragskartierung ist ein Integrator der infinitesimalen und unterschiedlichen Ernte- und Bodenparameter wie die Feuchtigkeit, der Nährstoffgehalt, die Schädlingsprobleme durch die Verknüpfung räumlicher Informationen zu Ertrag und Bodeneigenschaften über ein GIS-System kann die diagnostische Bestimmung der vorherrschenden Faktoren zur Steuerung der Pflanzenproduktion durchgeführt werden. Diese wird dann zur Grundlage für Entwicklung präziser Input-Strategie für die Produktion. GIS-Funktionen sind umfassende Pakete für Konnektivität der Datenbanken und Feldgeräten. Die Ertragsmessungen können auch Auskünfte über die Auswirkung der Anwendung unterschiedlicher Eingangsgröße mit variabler Rate austauschen, damit es eine Optimierung des Anwendungsplans für zukünftige Jahre ermöglicht wird. Entwicklung der Mähdrescher-Modelle durch die Messung der Flussdynamik von den Erntekörnern ist auch ein wichtiger technischer Beitrag zur Verbesserung der Genauigkeit der Ertragskartierung [Saiz-Rubio & Rovira-Mas 2020].

Die räumliche Erstellung eines Musters für den Ernteertrag bietet bessere Identifizierung und Charakterisierung für Erfassung der Variabilität über die Felder. Die Landwirte sind an Erkenntnisgewinnung über ihren durchschnittlichen räumlichen Ernteertrag interessiert, damit sie ein verlässliches und wesentliches Management für ihre Entscheidungsfindung einsetzen können. Diesbezüglich ist es trotz zeitlicher Variabilität des Öfteren möglich, ein einheitliches räumliches Muster für den Ernteertrag über die Jahre hinweg zu erkennen [Tyler *et al.* 1997]. Einige Muster für den Ertrag weisen sich trotz unterschiedlicher Nutzpflanzen und klimatischer Bedingungen konsistent auf. Die räumlichen Modelle des Ernteertrags können außerdem wichtigste Informationen in Hinsicht auf die Bodeneigenschaften binnen der Felder vermitteln oder die Einflüsse von anderen externen Faktoren wie Ausführung des Managements und Wetterbedingungen darstellen. Laut der Studien über kleinräumige Variabilität der Bodeneigenschaften können die über trockene Jahre ertragreichen Gebiete zugleich in feuchten Jahren die ertragsschwachen Gebiete sein. Die spezifischen Versuche auf den Feldschlägen haben bewiesen, dass es aus dem Management der Fruchtfolge von letzten Jahren die zeitliche Abfolge des Anbaus für Nutzpflanzenarten in die nächsten Jahre hervorgehen kann [Sudduth 2000, Tyler *et al.* 1997]. Ein zugänglicher Ertragsdatensatz ist von großem Vorteil. Es ist von Vorteil, wenn die Landwirte die Ernteerträge überwachen

und auch daran investieren, die Ertragsdaten jährlich nach jeder Erntezeit zu erfassen und zu dokumentieren. Denn es kann daraus eine nachhaltige Applikationskarte resultiert und erbaut werden. Letztendlich kann es für den teilschlagspezifischen Datensatz im unmittelbaren Zusammenhang mit der Produktionsleistung des Anbaus sowie mit dem Rohertrag der Felder argumentiert werden. Aus diesem Aspekt stellen diese Daten Landwirten sowie Beratern einsichtige und nützliche Informationen bereit. Der Aufbau einer Profit-Karte als ein Managementinstrument für die Landwirte führt zur Identifizierung optimalen Ernteertrags, zur Planung ökologischer Investition und zur Ersparung wirtschaftlicher Verluste [Capmourteres *et al.* 2018].

Die Auswertung optischer Informationen aus Fernerkundung in Kombination mit historischen Daten, wie beispielsweise Ertragsdaten führt zu schlagspezifischer Bedarfsermittlung der Düngung von Stickstoff, Phosphor und Kalium sowie andere wichtige Makro- und Mikronährstoffe, die für Wachstums- und Stoffwechselprozesse der Nutzpflanzen notwendig sind. Die Überversorgung dieser Substrate verursacht eine Nährstoffanreicherung, die zu verheerende Auswirkungen auf Ökosysteme führen. Die Variation der Betriebsmittelverteilung erfolgt durch Kartierungsansatz [Speckle *et al.* 2020].

### **3.9 Informationssammlung in Präzisionslandwirtschaft**

#### **3.9.1 Informationssysteme**

Die Softwareentwicklung erfordern die Datenanalyse und die Technik, welche die Einführung der Informationssysteme als ein wesentliches Werkzeug für den Erfolg in Präzisionslandwirtschaft und im Biodiversitätsschutz benötigt. Die Präzisionslandwirtschaft interpretiert große Datenmengen aus dem Feld, damit diese die Aufschlüsse über Ursachen der Variabilität verschaffen kann. Sie kann Strategien für Schutz der Biodiversität durch die geografischen Verteilungsmodelle vorschlagen, die auf dem ökologischen Nischenkonzept basiert. Die Verknüpfung biotischer und abiotischer Umweltdaten beschreibt die geografische Wahrscheinlichkeit der Population einer Spezies für das Biodiversitätsmanagement. Dabei können die Modelle für ein Untersuchungsgebiet erstellt werden [Santana *et al.* 2007]. Die Umwandlung dieser Daten in nützliche Wissensdatenbank und Modellierung mittels eines Informationssystems kann die Herausforderung des Biodiversitätsmanagements überwinden, indem die potenzielle geografische Verteilung von Arten vorhergesagt und die Karte für die Untersuchung des Gebietes erstellt werden [Sorensen *et al.* 2002]. Ein Modell für die Wahrscheinlichkeit der Verteilung von Arten ergibt sich durch geografische Kombination von Umweltdaten mit An- und Abwesenheit der Spezies in einer Koordinate, damit

die georeferenzierten Gebietskarten mit ökologisch vergleichbarem Nischenkonzept für die Bestimmung des Vorkommens einer Spezies erstellt wird. Die Nischenmodelle erlauben den Wissenschaftlern, Szenarien für eine nachhaltige Nutzung der Umwelt vorzuschlagen [Chapman *et al.* 2005]. Eine Referenzarchitektur der Informationssysteme für die Präzisionslandwirtschaft kann laut der Studien auch für die auf derselben Urform basierenden Systemen für Modellierung der Biodiversität eingetroffen werden.

### **3.9.2 Bedeutung von Informationssystemen für die Präzisionslandwirtschaft**

Monolithische Informationssysteme sind zu spezifischen Aufgaben für das Produktionsmanagement und fähig und besitzen meist keine Beziehung zueinander. Die Präzisionslandwirtschaft erfordert für alle durchgeführten Schritte mehrere Softwarepakete mit benutzerfreundlichen Schnittstellen, sodass der Ausgangspunkt von einem Ablauf den Input der nächsten Applizierung bilden kann [Murakami 2006]. Es wird umfassende Pakete benötigt, die die Konnektivität zwischen den Feldgeräten und GIS-Funktionen mit den Datenbanken und anderen Elementen der Präzisionslandwirtschaft ermöglichen. Solche Systeme sollten über grafischen Schnittstellen verfügen und mit automatisierten Methoden funktionieren. Diese sollten ebenfalls für unterschiedliche Einsätze je nach Benutzer individuell programmierbar sein, die geringerer Fachkenntnisse über Softwareentwicklung innehaben. Eine reglementierte Wissensdatenbank führt zur Erhöhung der Genauigkeit der Systeme und macht die Lernkurven effizient. So können die Landwirte den präferierten Zugriff auf die Analysefunktionen und für die Anpassung und die Steuerung haben und die richtigen Parameter für den räumlichen und zeitlichen Bedarf mitbekommen. Diese Systeme sollten ökonomisch sein und auch leicht einstellbar sein, indem diese den Metadaten und lokalen Softwarepaketen kompatibel sind. Das gewährleistet die Rückverfolgbarkeit und die Sicherung der Abläufe der Präzisionslandwirtschaft. Diese sollte für die Implementierung innovativer Komponenten und Schnittstellen aufgeschlossen sein, die noch nicht angekommen sind. Eine serviceorientierte Architektur (SOA) der Agrarwirtschaft kann sich mit hoher Integrationsfähigkeit und eindeutigen Verträgen und Schnittstellen für komplexe Herausforderungen der Präzisionslandwirtschaft eignen, wie beispielsweise die Bewirtschaftung in Hinsicht auf die Technologieentwicklung und zukommende Veränderungen. Ein Ziel dieser Architektur ist der Aufbau einer Infrastruktur, der Referenzarchitektur sowie der Standardsprache für den Informationsaustausch durch den Datenbus, die Geodaten und den Internetzugang. Ein Servicebus empfängt die Anforderung einer Anwendung und ruft die entsprechenden Dienste, wie beispielsweise die Koordinate ab. Die Datentransformation kann beim Entscheidungs-

interesse präkommunikativ oder bei einem enormen Verarbeitungsaufwand asynchron aufgerufen werden. Nach Ende des Ablaufs werden die Meldungen in einem Repositorium gespeichert und anschließend wird der Auftraggeber benachrichtigt. Darüber hinaus sollte eine Erhöhung der Modifizierbarkeit und Wiederverwendbarkeit durch solche Architektur gewährleistet werden, sodass die Schichten der Informationssysteme mit den Applikationssystemen sowie dem kompletten Bewirtschaftungssystem über ein Intranetportal diese Dienste bieten können [Santana *et al.* 2007].

### 3.9.3 Modellierungssystem für Biodiversität

Komplexe Modellerstellung erfordert die Fachkenntnis über gesamten Prozess von Umgang mit technischen Herausforderungen aus anderen Studienfächern wie die Softwareentwicklung und Datenanalyse sowie das Data-Ingenieurwesen. Die Modellanalyse, -generierung und die Validierung sind drei Hauptschritte dieses Prozesses [Santana *et al.* 2007]. Die Darstellung von Kontextdaten beeinflusst direkt die Vorhersagemodelle [Sarker *et al.* 2020], daher ist die Durchführung der Entscheidung und Datenverarbeitung vor der Modellerstellung von Bedeutung. Demzufolge führt die Auswahl eines Algorithmus zur Generierung der Artenverbreitungsmodelle und zur Bewertung der Analyse. Es gibt einige Lösungen für geografische Erfassung ökologischen Nischenkonzepts, jedoch besteht den Bedarf in einer Softwareentwicklung, die für jeden Frame anerkannt ist. So kann ein technisch effizientes Umfeld für die Modellgenerierung und Experimente geschaffen werden. Solche digitalen Instrumente ermöglichen den Forschern, die Bergung und Bereinigung erforderlicher Daten durchzuführen. Eine passende Umfeldschicht kann durch die Datengenerierung für die Problemlösung ausgewählt werden, sodass diese Schicht die Verteilung vorkommender Arten am besten erklärt. Die Softwareanforderung für Aufbau der Modellsysteme der Präzisionslandwirtschaft und Umwelt sind anteilig zusammengehängt, sodass es aus dem gelösten Problem eines Bereiches die Lösung für anderen Bereich abgeleitet wird. Diese Definitionen und Softwarekomponente können teilweise für Wiederverwendung geeignet sein [Santana *et al.* 2007]. Der Zugang der landwirtschaftlichen Betriebe zur Pflanzenvielfalt erhöht die Kapazität einer Landwirtschaftsform, die auf der Grundlage der Ökosystemdienstleistungen in ökologische Landwirtschaft umgesetzt werden kann. Das kann also eine Elastizität gegenüber dem Widerspruch zwischen Ökonomie und Ökologie bereitstellen [Gevers *et al.* 2019]. Die sozioökonomischen Netzwerke können die skalenübergreifende Erkenntnis über eine umfangreiche Pflanzenvielfalt und über die Simulationsstudien schaffen.

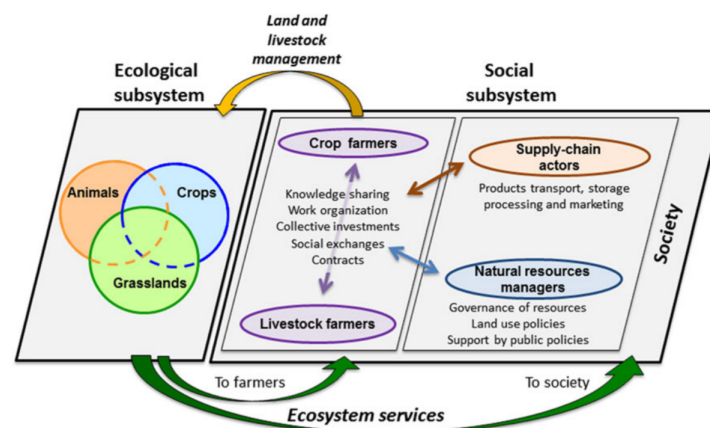


### 3.9.4 Soziale Netzwerke für die Agrobiodiversität

Ökologische Studien untersuchen den Einfluss der Biodiversität auf die Produktivität von Agrarökosystemen. Es bezieht sich auf die Stabilität des sozioökonomischen und biologischen oder klimatischen Schadens in langfristigen Skalen [Renard & Tilman 2019]. Aus diesem Aspekt sind die Wissenssysteme im Zusammenhang mit der Agrobiodiversität und in der auf biologischer Vielfalt basierenden Landwirtschaft von zentraler Bedeutung [Altieri 2004]. Die Struktur sozialer Netzwerke spielt eine entscheidende Rolle für das Management natürlicher Ressourcen [Barnes *et al.* 2016]. Landwirte spielen zusammen mit einer Vielzahl von Interessentengruppen, wie beispielsweise die Regierung und auch nicht-staatliche Organisationen eine Schlüsselrolle für die Erhaltung, Erzeugung und Verbreitung der Agrobiodiversität. Das bezieht sich auf Privatsektor sowie auf internationale und regionale Institutionen [McGuir & Sperling 2016, Hauck *et al.* 2016], die zur Bestimmung verfügbaren Daten-Pools der Agrobiodiversität auf Landschaftsebene miteinander interagieren. Die Fähigkeiten verschiedener Landwirte werden für den Zugriff auf diese Daten von Sozialen Netzwerken beeinflusst. Die Struktur und die Zusammensetzung sozialer Netzwerke spielen eine entscheidende Rolle bei der Steuerung des Managements und die Regierung trägt auch die Verantwortung für eine Vielzahl natürlicher Ressourcen [Barnes *et al.* 2016, Bodin & Crona 2009].

Die Anwendung eines Funktionsrahmens sozialer Netzwerke im Bereich der Agrobiodiversität trägt zu innovativen Führungssystemen bei, indem ein verbesserter Zugang der Landwirte zur Agrobiodiversität geschaffen wird, der die Zusammenarbeit lokaler Interessentengruppen gewährleistet. Diese kann ebenfalls die Entwicklung auf institutionellen Ebenen unterstützen [Folke *et al.* 2005]. Das optimiert die allgemeine Erkenntnisgewinnung über die beteiligten Parteien in gesamter Wertschöpfungskette [Bodin 2017]. Die Kenntnisnahme nach Art und Weise der geschützten, ausgewählten, vermehrten, kultivierten und gezüchteten Ressourcen fördert die Kapazitäten der Agrarökosysteme in großen Skalen zur Versorgung menschlicher Population [Isaac *et al.* 2018]. Die Zusammenarbeit und der Austausch über die Ressourcen sind zur Aufrechterhaltung solcher Systeme unabdingbar, in denen das fragmentierte Wissen erhältlich ist. Denn die Interessentengruppen sind trotz unterschiedlicher Werte und Ziele ökologisch stark voneinander abhängig [Armitage *et al.* 2009]. Der Zugang der Landwirte zu Ressourcen der Agrobiodiversität fördert Entwicklung des Umweltmanagements [Bodin 2017] für ländlichen Raum [Rockenbach & Sakdapolrak 2017]. Der Zugriff auf die durchgeführten Aktivitäten der Landwirte in Produktion, Erhaltung oder Reduktion der Biodiversität auf Landschaftsebene

kann für die Bestimmung der Unterstützung bestehender Agrobiodiversität bzw. für die Ermittlung der Ressourcenkapazität von Bedeutung sein. Diese sind auf globaler Ebene die Funktionsformen der sozialen Netzwerke für Kreislauf des Wissens in diesem Bereich (siehe Abbildung 9) [Pautasso *et al.* 2013]. Die Entwicklung innovativer Optionen und Führungen



**Abbildung 9:** Die Wechselwirkungen zwischen sozialen und ökologischen Teilsystemen in einem Bewirtschaftungssystem aus Nutzpflanzen und Nutztieren; Interaktionen zwischen landwirtschaftlichen Akteuren bestimmen die Landnutzungspraktiken. Im Gegenzug erbringen sie Ökosystemdienstleistungen, die sich sowohl für die Zivilgesellschaft als auch für die Landwirte gut bewähren. Gerade Pfeile repräsentieren Schlüsselinteraktionen, die unter dem Gesichtspunkt gebietsgebundener Integration von Nutzpflanzen und Nutztieren analysiert oder entworfen werden [Moraine *et al.* 2015, Abbildung 2].

kann für die Unterstützung der Biodiversität basierender Landwirtschaft zwischen verschiedenen beteiligten Akteuren auf den lokalen Bauernnetzwerken die Anwendung finden [Coolsaet 2015]. Die Innovation aus der Forschung kann zur partnerschaftlichen und kooperativen Umsetzung der nachhaltigen Fortschritte beitragen. Dabei spielen kollektive Akteure mit ihrer sozialen Handlung große Rolle für die Erhöhung lokaler Kenntnisse und Effizienz der landwirtschaftlichen Praktiken [Duru *et al.* 2015b]. Die Planung solcher Ansätze umfasst die folgenden Schlüsseldimensionen; die Verbesserung sozialen Lernens ermöglicht den Interessentengruppen, sich ihrer wechselseitigen Abhängigkeit hinsichtlich der Einzelheiten der Agrobiodiversität bewusst zu werden, sodass die komplexe Interaktion für die Verfügbarkeit der Agrobiodiversität im solidarischen Niveau zur Erkenntnis genommen und gefördert wird [Bazile 2006]. Die Komplexität dieser Abläufe erfordert die Entwicklung spezieller Methoden und interaktiver Werkzeuge, die die Szenarien im Bezug auf die Verfügbarkeit der

Agrobiodiversität für die Landbewirtschaftung untersuchen und die Zugänglichkeit dieser Methoden diskutieren. Diese präzisiert und vereinfacht den Dialog zwischen verschiedenen Interessentengruppen wie die Wissenschaftler, Techniker und Landwirte [Chable *et al.* 2020]. Der Aufbau des Vertrauens unter diversen Interessentengruppen ermutigt ernsthafte und kollaborative Führungsbereitschaft und fördert das Agrobiodiversitätsmanagement in die Richtung erwünschte Ergebnisse [Demeulenaere *et al.* 2017]. Die Nutzung einer ökologischen sowie sozialökonomischen Netzwerkanalyse und -modellierung schafft starkes Potenzial und bietet den Ansatz für gemeinsamen Zugang zur Entscheidungsfindung und zur Interaktionsgestaltung, die sich in der Agrobiodiversität auswirken und sich besser an die Biodiversität basierender Landwirtschaft anpassen können.

## 4 Ökologischer Ressourcenschutz

### 4.1 Sekundärstoffwechsel

Das Phänomen, dass die Pflanzen benachbarte Pflanzen durch die Freisetzung von Chemikalien in die Umwelt beeinflussen, ist bereits seit 370 v. Chr. bekannt. Griechen und Römer haben dieses Wissen in der Landwirtschaft seit 64 n. Chr. verwendet [Mallik 2008]. Bisher wurden in einigen Studien [Mahal & Callaway 1992] hemmende Wirkungen der Allelopathie gefunden, in anderen jedoch keine oder stimulierende Wirkungen. Daher kann es neben der Prüfung der Gesamtwirkung der Allelopathie auch die Identifizierung der Ursachen für die Heterogenität das Verständnis verbessern [Meiners 2012, Zhang *et al.* 2015]. Ein Unterschied in der Allelopathie kann auch durch biologische Merkmale von Pflanzen verursacht werden [Zhang *et al.* 2021]. Die Studien unterscheiden sich jedoch auch hinsichtlich der verschiedenen Entwicklungsstadien von Pflanzen (z. B. Keimung vs. Wachstum) und der Dauer des Experiments. Eine Entflechtung der Bedeutung der verschiedenen Faktoren im Zusammenhang mit dem Studiendesign kann in einer quantitativen Synthese wie der Metaanalyse möglich werden [Gurevitch *et al.* 2018]. Allelopathie bezieht sich entweder auf die hemmende oder stimulierende Wirkung einer Pflanze auf andere Pflanzen durch die Produktion von Chemikalien und deren Freisetzung in die Umwelt. Das basiert auf biochemischer Wechselwirkung zwischen allen Pflanzenarten einschließlich Mikroorganismen [Molisch 1937].

Die Stärke und die Richtung allelopathischer Wechselwirkungen können auch von zwei anderen Aspekten der Evolutionsgeschichte abhängen; die phylogenetische Entfernung und der Ursprung der Arten. Die Zusammensetzung von Sekundärmetaboliten (d. h. Allelochemikalien) in Pflanzen sind im Allgemeinen phylogenetisch konserviert, daher können sich entfernt verwandte Arten aufgrund der geringen Überlappung ihrer allelochemischen Profile stark gegenseitig hemmen. Die Evolutionsgeschichte ist auch von den Bedingungen geprägt, die eine Art erlebt hat. In ihrem natürlichen Verbreitungsgebiet interagierten gebietsfremde Pflanzen mit anderen Arten (z. B. Konkurrenten und Feinden) mehr als in ihrem nicht heimischen Verbreitungsgebiet [Zhang *et al.* 2021]. Zum Beispiel ist die eurasische *Centaurea diffusa* ein schädliches invasives Unkraut in Nordamerika, das mehr negative Auswirkungen auf in Nordamerika heimische Arten als auf in Eurasien heimische Arten hatte [Ning *et al.* 2016]. Allelopathische Wirkungen zwischen eng verwandten Arten (oder Individuen derselben Art) ist schwächer als entfernt verwandte Arten. Dies deutet darauf hin, dass eine Allelopathie die Koexistenz eng verwandter Arten (oder die Dominanz einzelner

Arten) begünstigen würde, was dem Effekt des Ressourcenwettbewerbs entgegengesetzt ist. Daher kann die gemeinsame Untersuchung von der Allelopathie und dem Ressourcenwettbewerb die gemischten Ergebnisse der Koexistenz von Arten erklären [Zhang *et al.* 2021]. Die Pflanzen und Unkräuter interagieren aufgrund gemeinsamer Bedürfnisse wie das Wasser, das Licht, der Raum und die Nährstoffe miteinander. Diese Interferenz kann als Konkurrenz oder Allelopathie auftreten. Allelopathie kann in zwei Kategorien unterteilt werden, die echte Allelopathie und funktionelle Allelopathie umfassen. Im Allgemeinen kann die direkte Freisetzung allelochemischer Verbindungen in die Umwelt durch die gebenden Arten als echte Allelopathie angesehen werden. Die funktionelle Allelopathie bezieht sich jedoch auf die Verwendung von den Pflanzen mit allelopathischen Eigenschaften in Form von Mulch oder Deckfrüchten auf landwirtschaftlichen Feldern, die nach ihrer Zersetzung durch chemische und biochemische Prozesse die phytotoxischen Verbindungen produziert und freisetzt. Ein Beispiel für typische Verwendung der Allelopathie in der Landwirtschaft ist das Aufbringen der allelopathischen Deckfrüchte und ihrer Rückstände als Mulch auf die Feldoberfläche oder das Versprühen ihrer wässrigen Extrakte ähnlich wie bei Herbiziden im Nachauflauf [Mehdizade & Mushtaq 2020].

## 4.2 Biologische Unkrautregulierung

Integriertes Unkrautmanagement ist ein wirksamer Ansatz zur nachhaltigen Unkrautbekämpfung und zur Verringerung der Umweltverschmutzung sowie zur Erhaltung des Lebens von Mikroorganismen [Liebman *et al.* 2016]. Zweifellos hat der Einsatz von Herbiziden einen großen Einfluss auf die Verbesserung des Ernteertrags in Agrarökosystemen. Die mit diesen Chemikalien verbundenen negativen Auswirkungen auf die Umwelt und die Gefahr für die menschliche Gesundheit sind jedoch nicht vernachlässigbar. Daher können Allelopathie und die Verwendung von den Allelochemikalien als Alternative zu den Herbiziden in landwirtschaftlichen Systemen angesehen werden. Einige dieser Allelochemikalien können aufgrund ihrer Anti-Unkraut-Eigenschaften als neue Gruppe von den Pflanzenschutzmitteln klassifiziert werden, die als Bioherbizide bezeichnet werden [Mehdizade & Mushtaq 2020].

Um ein effektives und nachhaltiges Unkrautmanagement zu verwirklichen, müssen wirksame umweltfreundliche und sozial verträgliche Methoden integriert werden. Die gängigen Strategien sind kulturelle Methoden z. B. die Fruchtfolge, resistente Sorten, Untersaat, Mischkulturen und das Düngemittelmanagement [Gonzalez *et al.* 2019]. Die kulturellen Praktiken sind während der aktiven Wachstumsphase der Kultur weit verbreitet. Diese Methoden umfassen Verwendung kompetitiver Genotypen [Lemerle *et al.* 2014], lebende Mul-

chen und Ernterückstände [Ikeh *et al.* 2019], Saatzeit [Lutman *et al.* 2013], Saadmuster und -dichte [Marin & Weiner 2014]. Die biologische Bekämpfung von Unkräutern bezieht sich auf die Verwendung lebender Organismen wie Insekten, Pilze, Bakterien und Nematoden zur Bekämpfung von Unkräutern und zur Verringerung ihrer Population in den Kulturpflanzen. Bei der biologischen Bekämpfung von den Unkräutern wird die Verhinderung oder Verringerung des Wachstums, der Entwicklung und der Vermehrung von Unkräutern durch die Stimulierung der Pflanzenfresser und der Pathogenität natürlicher Feinde verfolgt [Mehdizade & Mushtaq 2020].

Die Verwendung des allelopathischen Phänomens kann als umweltfreundliche Strategie für das Unkrautmanagement in Betracht gezogen werden. Freisetzung biologischen Kontrollmittels in die Umwelt ist eine klassische Strategie, indem biologischer Bekämpfungsmittel neue Generationen produziert und die beabsichtigten Unkräuter über einen langen Zeitraum auf nachhaltige Weise reguliert [Sheppard *et al.* 2006]. Manche Bioherbizide beinhalten die Verwendung einiger Pilze und Bakterien, um das Unkraut während der Vegetationsperiode zu bekämpfen [Boyette *et al.* 2018]. Im Rahmen der Bioassay-Experimente wurde *Medicago poly morpha* L. über die Allelopathie einiger Heilpflanzen behandelt. Es wurde herausgefunden, dass die wässrigen Extrakte von vier Heilpflanzen, darunter *Achillea santolina* L., *Artemisia mono sperma* Del., *Pituranthos tortuosus* L. und *Thymus capitatus* L. eine große hemmende allelopathische Wirkung auf die Keimung, die Sämling und Radikellängen, den Blattflächenindex hatten. Diese konnte das gesamte fotosynthetische Pigment und das Chlorophyll a (Chl a) dieses Unkrauts ebenfalls beeinflussen [Algandabya & El-Darierb 2018].

Der Wirkstoff in dieser Methode sind die lebenden Organismen. Die Wirksamkeit von biologischer Bekämpfung auf Unkräuter erfordert das Vorhandensein von wirtsspezifischen biologischen Bekämpfungsmitteln, die ein hohes und schnelles Reproduktionsvermögen und eine hohe Flexibilität haben. Diese sollten sich ebenfalls an neue Umgebung anpassen können [Schwarzländer *et al.* 2018]. Die biologische Unkrautbekämpfung ist eine zeitaufwendige Methode, jedoch wurde aufgrund der hohen Stabilität und Verringerung der Umweltverschmutzung viele Anstrengungen unternommen, um diese Methode in landwirtschaftlichen Ökosystemen zu entwickeln [Gnanavel & Nataraja 2014]. Im Gegensatz zu den üblichen Herbiziden haben die Allelochemikalien pflanzlichen Ursprung und verursachen keine belastenden Rückstände und Umweltverschmutzung. Pflanzen mit allelopathischen Eigenschaften sind eine Quelle für verschiedene allelochemische Verbindungen, mit denen neue Bioherbizide entdeckt und hergestellt werden können [Rice 1984]. Die Anwendung von Herbiziden auf biologischer Basis kann als geeignete alternative Methode zur

Unkrautbekämpfung angesehen werden. Diese kann eine nachhaltige Landwirtschaft fördern und die Umweltbelastung aufgrund synthetischer Herbizide in den Agrarökosystemen verringern. Es ist nicht möglich, eine vollständige Unkrautbekämpfung durch die Allelopathie bzw. durch den Einsatz von Allelochemikalien zu gewährleisten. Eine Minimierung der Unkraut-Populationen könnte in den Agrarökosystemen erreicht werden, indem die Allelopathie-Phänomene mit anderen Methoden wie die Fruchtfolge, wettbewerbsfähigen Sorten, das Wasser- und Bodenmanagement und anderen landwirtschaftlichen und mechanischen Methoden kombiniert werden. Andererseits kann es Unkraut auch so bekämpfen, indem die verantwortlichen Gene für die Entstehung der Allelopathie über biotechnologische und pflanzenbauliche Züchtungsmethoden auf verschiedene Kulturen übertragen werden [Mehdizade & Mushtaq 2020].

### **4.3 Zwischenkulturen in der Unkrautregulierung**

Die nachhaltigen Anbausysteme basieren auf verschiedenen Produktionsstrategien zur Herstellung hochwertiger Lebensmittel unter der Voraussetzung der Minimierung des Ressourcenverbrauchs. Die Produktivität in Monokulturen zu steigern, steht häufig im Gegensatz zum Konzept der nachhaltigen Landwirtschaft [Luhmer *et al.* 2021]. Die Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit, die Verbesserung der Unkrautbekämpfung und die Verringerung des Risikos von den Ertragsverlusten können durch die Erhöhung der Vielfalt von den Pflanzen auf dem Feld erreicht werden [Liebmann & Dyck 1993].

In der Landwirtschaft werden verschiedene Arten von den Deckfrüchten eingesetzt, um verschiedene Ökosystemdienstleistungen zu erbringen, wie beispielsweise die Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit für die nächste Ernte, das Nährstoffrecycling, die Unterdrückung von Unkräutern und Schutz der Böden vor Erosion [Döring *et al.* 2013]. Eine Strategie für die Diversifizierung in der Landwirtschaft ist die Zwischenkultur [Kugbe *et al.* 2018]. Zu den potenziellen Vorteilen der Zwischenkultur gehören die Bekämpfung von Unkraut sowie die ökologische Schädlings- und Krankheitsbekämpfung, die beide im ökologischen Landbau von besonderer Bedeutung sind [Lithourgidis *et al.* 2011]. Aufteilung und Entlastung der Ressourcen sind die zwei Hauptprinzipien, die normalerweise zu einer verbesserten Unkrautbekämpfung in den Zwischenkulturen beitragen [Bybee-Finley & Ryan 2018]. Eine funktionierende Zwischenkultur basiert auf Partnern, die komplementäre Nischen besetzen [Vandermeer 2012]. Etliche Studien haben eine Unterdrückung der Unkräuter durch den Anbau von Zwischenkulturen nachgewiesen, von denen ein Großteil Getreide mit Hülsenfrüchten kombiniert [Paulsen *et al.* 2006, Mohler & Liebmann 1987]. Die Zwischen-

kultur führt aufgrund zeitlicher oder räumlicher Unterschiede in der Nutzung der Ressourcen durch die einzelnen Kulturen zu einem effizienteren Verbrauch dieser Quellen [Yu *et al.* 2015]. Die Wechselwirkungen zwischen den Kulturpflanzen können sich von einem Milieu in die andere ändern, was die Auswahl der richtigen Partner für das Management einer Zwischenkultur schwierig macht [Lithourgidis *et al.* 2011]. Neben möglichen Vorteilen für den Ertrag können die Zwischenkulturen im Vergleich zu den Monokulturen zusätzlich eine verbesserte Unkrautbekämpfung bieten [Szumigalski & van Acker 2005], wenn dabei die Pflanzendichte der Mischkultur insgesamt höher als jeweilige Monokultur ist. Aufgrund der erhöhten Pflanzendichte bzw. der Bodenbedeckung wurde für alle Behandlungen unter den Zwischenkulturen eine unterdrückende Wirkung gegen die Unkräuter angenommen [Luhmer *et al.* 2021]. Wird eine andere Kultur in einem bestehenden Anbausystem eingeführt, ändert sich der Wettbewerb um Ressourcen wie Licht [Vandermeer 2012].

Dies gilt auch für den Wettbewerb mit den Unkräutern um Stickstoff. Zum Beispiel hinterlassen die Hülsenfrüchte mehr Stickstoff im Boden als die Gerste für die Zwischenfrüchte oder die Unkräuter, die nicht den Stickstoff fixieren [Corre-Hellou 2011]. Daher kann die gesamte Stickstoffaufnahme einer Zwischenkultur als eine Hauptkultur höher sein, sodass die Aufnahme des Stickstoffs für die Unkräuter limitiert wird [Carton *et al.* 2020]. Die Unkrautregulierung durch Zwischenkulturen ist möglicherweise nicht immer vollständig oder wirksamer als die Verwendung von Herbiziden, kann jedoch auch von wirtschaftlichem Interesse sein, da es die Kosten für Herbizide, mechanische oder manuelle Unkrautbekämpfung reduziert [Liebmann & Dyck 1993]. Die Modellierung einer Zwischenfrucht erhöht die Bodenbedeckung während der gesamten Erntezeit, indem die Bodenerosion und Verdunstung minimiert und allelopathische Wirkungen zwischen den Pflanzen ermöglicht wird [Yin *et al.* 2020].

Laut einer Studie von Universität Bonn für drei aufeinanderfolgende Jahre (2018-2020) in Campus Klein-Altendorf (CKA) wurde es versucht, durch die Zwischenernte vom Mohn mit der Gerste und dem Weißklee den Mohnanbau zu verbessern, indem das Risiko von dem Verlust des Gesamtertrags verringert und gleichzeitig ökologische Vorteile hinzugefügt werden. Es wurde dabei die Schlüsselfaktoren hinsichtlich des Pflanzenwachstums, der Ertragsbildung und der Unkrautbekämpfung ermittelt. Das Konzept wurde mit verschiedenen Aussaatdichten von der Gerste und zwei Aussaatzeiten vom Weißklee studiert, die die Leistung und die Wettbewerbsfähigkeit von Mohn zwischen den Kulturen bestimmen. Die Wirksamkeit der Unkrautregulierung beim Anbau der Zwischenfrüchte hängt von vielen Faktoren ab, wie z. B. die Auswahl der Kulturpflanze, die Aussaatzeiten und -dichten, die



Vorfrucht, die Boden- und Wetterbedingungen, die Unkrautsamenbank oder verschiedene Faktoren des Standortmanagements [Luhmer *et al.* 2021]. Zu den stärksten unkrauthemmenden Zwischenkulturen zählen Pflanzen mit einem schnellen frühen Wachstum und einem dichten Kronendach [Liebmann & Dyck 1993]. Laut genannter Studie wurde bei Gerste eine Tendenz zu einer geringeren Bodenbedeckung in Form vom Unkraut unter der Behandlung von der Zwischenfrucht beobachtet. Darüber hinaus brachten Zwischenkulturen aus Gerste und Mohn in zwei von den 3 Jahren akzeptabler Mohn-Erträge im Vergleich zu den Monokulturen. Höhere Pflanzendichten bei Zwischenkulturen können auch dafür verantwortlich sein, dass Mohn-Klee-Zwischenkulturen weniger Unkräuter als beide Monokulturen haben. Gemäß dieser Studie scheint der Weißklee eine vielversprechende Zwischenfrucht für Mohn zu sein, da er ökologische Vorteile bietet, ohne die Leistung von Mohn zu beeinträchtigen. Aufgrund der hohen Flexibilität bei der Auswahl der Sorten, Saatedichten und -zeiten kann diese Methode eine gute Anbaustrategie sein [Luhmer *et al.* 2021].

#### **4.4 Mischungseffekte innerhalb der Deckfrucht**

Die Verwendung der Deckfrüchte im Gemengeanbau kann die Vorteile hinzufügen, die durch die Folgen dieser Kulturen erzielt werden [Döring *et al.* 2013]. Viele Deckfrüchte sind großartige Futterpflanzen und ihre Verwendung in binären Gemischen zeigte einen hohen Ertrag und Nährwert für die ausgewählten Arten [Cherney *et al.* 2020]. Die Deckfruchtmischungen könnten eine vielversprechende Zukunft für nachhaltige landwirtschaftliche Systeme und die Futterproduktion darstellen. Eine Herausforderung besteht darin, die Deckfruchtbestände in einem Wettbewerbsumfeld erfolgreich zu etablieren, wenn beispielsweise die Temperatur zu niedrig oder zu hoch ist und die Niederschlagsmenge für optimale Wachstumsbedingungen zu niedrig ist. Insbesondere je nach Aussaatdatum können die Umweltbedingungen während der frühen Phase der Pflanzenentwicklung stark variieren. Die Studien an Deckfruchtmischungen haben gezeigt, dass das Mischen von Arten mit asynchronem Wachstum positive Mischungseffekte auf die erwarteten Leistungen haben kann, wenn verschiedener Arten zu verschiedenen Zeitpunkten unter unvorhersehbaren Bedingungen Dominanz sind [Elsalahy *et al.* 2021]. Dieser Ansatz kann die Wettbewerbsfähigkeit der Arten unter den Bedingungen begrenzten Wachstums verringern und ein komplementäres Pflanzenwachstum ermöglichen [Elsalahy *et al.* 2020]. Die Studie der Mischungseffekte auf die Samenkeimung und das Auflaufen von Sämlingen ist zu Beginn der frühen Phase der Interaktionen zwischen den Pflanzen wichtig, weil die Fähigkeit einer Art zur schnelleren Keimung als ihre Nachbarn die Leistung und die Dominanz dieser Art

in der Mischung beeinflussen kann [Fenesi *et al.* 2020]. Das Verständnis der verschiedenen Aspekte der Samenkeimung in Mischkulturen unter verschiedenen Umweltbedingungen kann daher dazu beitragen, eine erfolgreiche Ernte zu sichern und positive Mischungseffekte zu fördern [Elsalahy *et al.* 2021]. Neben der Qualität eines Milieus kann insbesondere die biotische Umgebung wie die Dichte und die Identität benachbarter Samen oder Sämlinge das Verhalten der Samenkeimung in der Mischkultur beeinflussen [Leverett *et al.* 2018]. Die Pflanzen verwenden eine Reihe von den Kriterien, mit denen diese den besten Zeitpunkt für die Keimung im intra- und interspezifischen Wettbewerb bestimmen können, z. B. der Feuchtigkeitsgehalt, die richtige Temperatur oder die Dichte des benachbarten Saatgutes. Ein wichtiger Bestandteil dieser Plastizität ist der beschleunigte Auflauf von den Sämlingen in konkurrierenden Nachbarschaften [Tielbörger 2009].

Die potenziellen Mechanismen der Samenkeimung, die plastisch auf den Nachbarn reagiert, können auf die Tatsache zurückgeführt werden, dass die keimenden Samen aufgrund der Wachstumsbedingungen flüchtige organische Verbindungen (VOCs: volatile organic compounds) emittieren können [Fincheira *et al.* 2017]. Das Temperaturniveau ändert die Enzymaktivität und dadurch die Produktionsraten und Zusammensetzung von flüchtigen organischen Verbindungen. Das kann zum Abbau der Speicherreserven in den Samen führen und wirkt sich daher auf das Brechen der Samenruhe aus [Effah *et al.* 2019]. Eine Studie der Mischungseffekte über die Keimung auf zwei mehrjährige Futterleguminosen wie der Schweden-Klee (*Trifolium hybridum* L.) und der Hopfenklee (*Medicago lupulina* L.) hat positive Ergebnisse hinsichtlich der Produktivität, der Unkrautbekämpfung und der Widerstandsfähigkeit gegen die Dürre gezeigt. Hierbei wurde getestet, dass die Keimung dieser Leguminosen in 1:1-Mischkulturen durch die Identität benachbarter Samen oder Sämlinge unter verschiedenen Temperatur- und Feuchtigkeitsbedingungen beeinflusst wird [Elsalahy *et al.* 2020].

Die Gesamtergebnisse einer aktuellen Studie zeigen, dass das Mischen von Leguminosenarten die Samenkeimung im Vergleich zu den Monokulturen der beiden Arten signifikant beeinflussen kann. Insbesondere kann es einen signifikanten positiven Mischungseffekt bei suboptimaler Temperatur geben, was in dieser Studie auf eine interspezifische Erleichterung bei 12 °C hindeutet. Die Auswirkungen der Identität der Arten auf die Keimung wurde als eine wichtige Voraussetzung für das Verständnis der Effekte in den Mischungen anhand dieser Studie in Betracht gezogen. Es wurde dabei angenommen, dass relativ inerte Samen weniger als die physiologisch aktiven Sämlinge in ihrer Umgebung physikalisch oder chemisch interagieren. Die Unterschiede zwischen Samen und Sämlinge in ihrer Wirkungen

auf die Keimung wurde auf dem Feld (In-Situ) dieser Studie nicht explizit erkannt. Es gab keinen konsistenten Mischungseffekt auf die Keimung, aber es wurde unter experimentellen Bedingungen (In-Vitro) signifikante sowohl positive als auch negative Auswirkungen in der gemischten Kultur auf die Keimung gefunden [Elsalahy *et al.* 2021]. Es gibt außerdem mehrere potenzielle Verfahren wie der Ausgleichsmechanismus [Creissen *et al.* 2013], die Komplementation [Xiao *et al.* 2018], die Intraspezifische Asynchronie [Groot *et al.* 2020] sowie der Wettbewerbseffekt und die Wettbewerbsreaktion [Goldberg & Landa 1991], die kombiniert werden können, um die beide Richtungen der Mischungseffekte auf die Keimung zu erklären. Die ökologischen Wechselwirkungen sind komplex und es ist unter realistischen Feldbedingungen fast unmöglich, die Richtung und Größe von den Mischungseffekten auf keimende (Nutz-)Pflanzen vorherzusagen. Dies kann sich jedoch durch Kombination unähnlicher Pflanzenarten ändern oder wenn schwere Stressfaktoren nur einen der Partner in der Mischung betreffen [Elsalahy *et al.* 2021]. Laut aktuellen Forschungen ist empfehlenswert, die Kompensationsfähigkeit der Partnerarten in den Monokulturen wie in den Mischkulturen unter verschiedenen Umweltbedingungen zu verstehen, damit es Strategien zur Optimierung der Mischkulturen im Sinne vom Ernteertrag überdacht werden kann.

## 5 Nachhaltige Landnutzungsplanung

### 5.1 Optimierung der Landnutzung

Die Intensivierung der Landbewirtschaftung hat sich historisch als Hauptursache für den Verlust biologischer Vielfalt nachgewiesen. Um den einseitigen Fokus auf Ertragssteigerung zu vermeiden, sollte eine ortsspezifische Lösung zur Erhaltung biologischer Vielfalt und darauf ankommender Produktion aufgrund der inhärenten Variabilität der Agrarlandschaften überlegt werden. Die Debatte und das Engagement sollten bis hin zu ihrer Belastungsgrenze mit der Absicht eines Kompromisses zwischen Nachhaltigkeit und Produktion ausdehnen [Cunningham *et al.* 2013]. Die Landnutzung für die Produktion der Lebensmittel und der Ballaststoffe nimmt heutzutage mehr als 50 % der eisfreien Erdoberfläche ein [Ellis *et al.* 2010]. Als ein wichtiges Element der Volkswirtschaft sichert die Landwirtschaft die Ernährung und produziert nachwachsende Rohstoffe. Beispielsweise die Hälfte der Flächen Deutschlands werden landwirtschaftlich genutzt. Davon finden zwei Drittel ackerbaulich und den Rest als Dauergrünland die Nutzung. Die Landwirtschaft ist in Deutschland größte Flächennutzerin. Auf knapp 60 % der Landwirtschaftsflächen werden die Futtermittel für die Tierhaltung und auf 20 % dieser Flächen die Lebensmittel angebaut [Umweltbundesamt 2018].

Trotz der öffentlichen Einsicht über die Notwendigkeit von der Minimierung der Umweltbelastung zur Erhaltung der Biodiversität erhöht sich globale Nachfrage für die Nahrungsmittel ständig. Diese erfordert gleichzeitig erhöhte Produktion pro Einheitsfläche und zusätzliche Ausweitungen der Anbaufläche [Lobell *et al.* 2009]. Der aktuelle Verlust von Ökosystemdienstleistungen zeigt, dass die erwartete Grenze des Biodiversitätsschutzes überschritten worden ist [Rockström *et al.* 2009], was direkt oder indirekt außer intensiver Landnutzung [Carson 1963] insbesondere von dem Klimawandel beeinflusst wurde [Bellard *et al.* 2012]. Die alarmierende Verlustrate der biologischen Vielfalt fordert eine Stabilisierung und auch eine Reduzierung dieser Entwicklungstendenz [Butchart *et al.* 2010].

Die Verknüpfung von Agrarwissenschaften und Biodiversität wurde in einigen wissenschaftlichen Artikeln aus dem Aspekt einer umfassenden Gemeinschaft herausgehoben [Godfray *et al.* 2010]. Die Bezeichnung des Rückgangs der Biodiversität als sekundäres und oder separates Problem kann in der Herausforderung der Nahrungsversorgung für Menschen im langfristigen nicht signifikant sein [Wood 2000].

## 5.2 Austauschbeziehung zwischen Landnutzung und Biodiversität

Das Produktionswachstum von Lebensmitteln zur Deckung des Ernährungsbedarfs korrelierte stark mit der Ausweitung der landwirtschaftlichen Nutzflächen [Pretty 2008], wobei es in manchen Regionen eine weitere Ausweitung aufgrund vorheriger Erschließungen nicht mehr möglich ist [Young 1999]. In diesem Rahmen gibt es eine typische Austauschbeziehung zwischen der Landnutzungsintensivierung (LUI) und der Biodiversitätserhaltung, die beim Umfang des Produktionssystems über die Landschaft und durch den Kontrast zwischen dem Produktionssystem und dem endemischen Ökosystem interpretiert wird. Das Management der lokalen Artenvielfalt besitzt in diesem Kontext die oberste Priorität, während die Nachfrage für die Ackerländer steigt.

Eine Lösung für gleichzeitigen Erhalt der Biodiversität bzw. der Produktion ist das Verständnis und die Berücksichtigung der Typologie zwischen den Landschaften hinsichtlich mit biologischer Vielfalt, dem Produktionspotenzial und der menschlichen Population. Um die Auswirkungen des Landnutzungswandels zu verstehen und die Artenvielfalt in unterschiedlichen Landwirtschaftssystemen zu unterstützen, sollte die Eigenschaften von dem ursprünglichen Ökosystem in diesen Landschaften erfasst werden. Es ist dabei wichtig, das Ausmaß der zur Landwirtschaft eingenommenen Flächen und den Grad der Abweichung von den Erkennungsmerkmalen endemischen Ökosystems zu erfassen. Eine archetypische Untersuchung der Agrarwirtschaft-Systeme kann zur Gewinnung besserer Strategien für die Biodiversität führen. Bei einer Produktionsfläche mit relativ großer räumlichen Streuung in der Agrarlandschaft kann es noch einheimische Biodiversität erhalten bleiben, ohne im Konflikt mit dem Produktionsmanagement zu geraten.

Die flächenhaft niedrige Verschiedenartigkeit eines Produktionssystems führt eine endogene Strukturbeschaffenheit und ein Störungsregime in Agrarlandschaft. Die Produktionssysteme mit großem Kontrast zu dem ursprünglichen Ökosystem erfordern häufig einen hohen Aufwand an Eingaben und Mechanisierung. Wenn verschiedenen Anbausystemen unterschiedlichen Kontrast und Umfang heben, sollte angemessene Maßnahmen und Technologien zur Optimierung der Ökosystemdienstleistungen und zum Schutz intoleranter Arten ergriffen werden. Es ist außerdem wichtig, die Übernutzung der Ressourcenbasen zu vermeiden und die negativen Auswirkungen landwirtschaftlicher Tätigkeit außerhalb des Standorts möglichst zu reduzieren, indem die Wiederherstellung natürlicher Ökosystemkomponente machbar ist. Die anderen Beispielmaßnahmen sind die aussichtsreiche Flächennutzungsplanung und Landnutzungsänderung, die Verwaltung der Expansion von der Landnutzung mit hohem Kontrast sowie die Begrenzung der Auswirkungen der Produkti-

on auf Menschen in weiteren ländlichen Räumen zu erwähnen [Cunningham *et al.* 2013]. Der Produktionssektor wird für das Ertragswachstum zwar vorrangig auf Mangel von produktivem Land fokussiert, aber auch wird er sich mit der Reduktion der negativen Auswirkungen von der Produktion befasst [Godfray *et al.* 2010]. Die Beziehung zwischen verschiedenen Formen der Landwirtschaft ist in ihren Auswirkungen auf Biodiversität sehr unterschiedlich. Daher sollte die Rücksicht auf die Biodiversität nicht nur nach räumlichen Auswirkungen bewertet werden, sondern sollen die Produktionsstätten auch geringste negative Effekte für die biologische Vielfalt überdenken [Hodgson *et al.* 2010]. Die Optionen eines besseren Ergebnisses für die Biodiversität in der Landwirtschaft hängen mit inhärenter Heterogenität zwischen der produktiven Landnutzung und dem ursprünglichen Ökosystem zusammen.

In Regionen mit großer Heterogenität, in denen die jährlichen Anbausysteme die Bäume ersetzt haben, ergibt landwirtschaftlicher Matrix nur wenige Optionen für die signifikante Erhaltung biologischer Vielfalt. Da die endemische Biodiversität dieser Regionen von dem Waldökosystem abhängig ist, kann sie durch landwirtschaftlichen Lebensraum nicht unterstützt werden. Unter diesen Umständen ist die Sicherstellung vom Stattfinden einer Reproduktion innerhalb der Patchflächen zur Erhaltung der Restpopulation von Bedeutung [Perfecto *et al.* 2009]. Die industrielle Landwirtschaft und der Bergbau für die Energieinfrastruktur verursachen jährlich den Verlust von fünf Millionen ha Wald [Curtis *et al.* 2018].

Während die Agrarwälder den einheimischen Wald ersetzen, ist es jedoch wahrscheinlich, dass diese sich strukturell und räumlich der komplexen Umwelt der Wälder ähneln (siehe Abbildung 10). Diese sind produktiv und fördern die Biodiversität [Clough *et al.* 2011]. Die Ausbeutung von Ressourcen aus dem nicht landwirtschaftlich genutzten Teil der Agrarlandschaft ist eine Gelegenheit, die jedoch zugunsten der Nachhaltigkeit der Produktion möglichst vermieden werden muss [Kangalawe & Noe 2012]. Die richtige Erkenntnis einer Balance zwischen der Produktion und der Biodiversität in verschiedenen agrarökologischen Systemen führt zur Nutzung der Optionen und Technologien, die möglichst in ihren Auswirkungen (auf Produktion oder Biodiversität) unter diversen sozialen, ökonomischen und ökologischen Kontexten äquivalent sind [Tscharrntke *et al.* 2011].

### 5.3 Agroforstsystem

Die Intensivierung der Landwirtschaft in Europa hatte in letzten Jahrzehnten in einigen Fällen nachteilige Auswirkungen auf den Agrarfeldern, wie beispielsweise die Erosion und die Nährstoffverluste verursacht. In letzten Jahren ist die Agroforstwirtschaft wieder in den Fo-

kus gerückt, indem dieses Anbausystem zur Lösung wichtiger Umweltprobleme beitragen. Laut einer Studie in Karlsruhe-Stupferich in Südwestdeutschland erhöht sich die organische Bodensubstanz im Agroforstsystem im Vergleich zu angrenzenden traditionellen Ackerländern um bis zu 15 %. Der Gesamtstickstoffgehalt im Boden wurde entsprechend diesem Versuch auf 5 % erhöht. Diese Verbesserung gilt für den Oberflächenabfluss 90 % und für Stickstoff- und Phosphorverlust im Abfluss  $\text{mg L}^{-1}$  jeweils 25 % und 70 % [DBU 2010]. Die Anzahl der Individuen und Arten war in den Agroforstschlägen 30 % höher als im Kontrollbereich ohne Bäume [Peng *et al.* 1993]. Die Kombination von der Laubstreu und der Zunahme des organischen Materials infolge des Wurzeltodes und -verfalls dürfte für diese Zunahme der organischen Bodensubstanz verantwortlich gewesen sein [Park *et al.* 1994]. Eine Verringerung über gesamten Oberflächenabfluss wurde beim Agroforstsystem um bis zu 78 % im Vergleich zu der Monokultur dokumentiert. Darüber hinaus wurden die Nährstoffverluste für den Gesamtstickstoffgehalt um bis zu 78 % und für den Gesamtphosphorgehalt um 81 % reduziert [Borin *et al.* 2005]. Die Agroforstsysteme sind in der Regel mit einer erhöhten Artenvielfalt insbesondere bei Insekten verbunden [Stamps & Linit 1998]. Die Agroforstsysteme erhöhen die Blumenvielfalt aufgrund der besseren Nahrungsversorgung und des Schutzes mehr als Monokulturflächen [Peng *et al.* 1993]. Die Beispiele für die Agroforstsysteme werden in der Abbildung 10 gezeigt. Die Bäume in regenerativen Agro-



**Abbildung 10:** a: Walnuss-Getreide; silvorables System Frankreich (Fotografie: Philippe Van Lerberghe) [agforward 2016], b: Projekt Agroforst; Landwirtschaft im Einklang mit der Natur [Agroforstkampagne], c: Durch achtreihige Windschutzhecken geschützte Siedlung in Nord-Dakota USA [DeFAF], d: Ein Projekt der Agroforstwirtschaft zur Kombination der Landwirtschaft und Naturschutzaspekte bei der Produktion an der Technischen Universität München [R & D Projekt 2008-2011]

forstsystemen können in verschiedenen Formen und Klassen wie kompakten und aufrechten Wuchs für den Windschutz oder für die Produktion hochwertiger Holzgewächse sein. Die kurzstämmigen Obstbäume können hierbei für das Obst und das Brennholz benutzt werden. Die Agroforstsysteme können die Verwendung der Wachstumsfaktoren optimieren und positive Wechselwirkungen gewährleisten [Smith *et al.* 2012a]. Es sollten die Eigenschaften

wie die Lichtdurchlässigkeit der Baumkronen für den untergepflanzten Nutzpflanzenbestand überlegt werden und sollte ebenfalls über die Minimierung der Einschränkung des Managements mit landwirtschaftlichen Maschinen nachgedacht werden. Die ausgewählten Baumarten sollten keine Zwischenwirte oder Wirtspflanzen für landwirtschaftliche Schädlinge sein. Der Wasserverbrauch muss auch an die Standortbedingungen zur Vermeidung des Wasserstresses angepasst werden [Chalmin & Mastel 2009]. Viele Studien haben gezeigt, dass die modernen Agroforstsysteme die Bodenerosion verringern und Nährstoffverluste in den Böden minimieren. Als Windschutz beschützen die Bäume das Mikroklima und verringern die Winderosion. Die Agroforstsysteme lassen sich bei optimalen Bedingungen das Pflanzenwachstum und den Ertrag erhöhen und stellen eine geeignete Kombination aus der Baum- und Pflanzenmorphologie, -phänologie und -physiologie bereit.

#### **5.4 Skalenübergreifende Effekte der Landnutzungsintensivierung**

Die Landnutzungsintensivierung ist der von den Menschen angeeignete Grad an dem gesamt netto Produktivitätspotenzial der Landschaft [Erb *et al.* 2009, Krebs *et al.* 2009]. Die FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) definiert die Intensivierung im Hinblick auf die ökonomische Effizienz vom Output der Produktion für Ernteertrags pro Input und Flächeneinheit [FAO 2004]. Andere Definitionen haben außerdem auf den Unterschied in der Ausdehnung, Intensivierung und Variabilität der landwirtschaftlichen Flächen betont [Moller *et al.* 2008]. Die spezifischen Methoden und benutzten Verfahren bei einer hohen Produktionsrate pro Flächeneinheit verursachen mehr Verluste in Biodiversität als die hohe Produktion selbst. Beispielsweise führt die Ausbringung der Pestizide zur Abtötung der Organismen und somit zur Senkung der Biodiversität. Diese führt auch zu einem Übertragungseffekt auf die nicht-agrarisch genutzten Nachbargebiete und geht in die Wasserwege hinein. Die nicht heimisch entstandenen Arten auf den Produktionsflächen können in den angrenzenden und nicht-landwirtschaftlichen Flächen eindringen und sich dort dominieren [Rand *et al.* 2006]. Unpräzise Anwendung der Pflanzenschutzmittel verursacht eine überschüssige Nährstoff-Akkumulation und die Eutrophierung, was der umgebenden Umwelt aufgrund ihrer nährstoffarmen Bedingungen schaden kann [Kleijn *et al.* 2009].

Der Wasserüberfluss kann auch mit geringerer Erosionsrate die Bodensedimente bewegen und lässt dadurch signifikante landwirtschaftliche Schadstoffe nach außerhalb der Anbauggebiete und auf die Wasserläufe hinein transportieren [Mortlock 2017]. Die Produktion von Dünge- und Futtermittel als Input für die Vieh- und Pflanzenzüchtung erfordert Umweltkosten wie die Landnutzung in externen Plätzen sowie die Süßwasser und Ener-



gie [West & Marland 2002], die selbst an der Rückgangstendenz der Biodiversität teilhaben können. Wenn die Landnutzungsintensivierung die Ökosystemdienstleistungen und ihre Widerstandsfähigkeit beeinträchtigt, sind die Kleinbauern wahrscheinlich stärker von diesem Verlust betroffen [MEA 2005]. Das Verständnis skalenübergreifender Abhängigkeit und Verknüpfung lokaler Umweltschäden an den globalen Marktdruck während des Lebenszyklus eines Produkts ist von großer Bedeutung. Nach diesem Verständnis kann die Auswirkung auf globaler Ebene geschätzt werden, indem die Nachhaltigkeit der Produktion im Hinblick auf den gesamten Energie- und Materialfluss zwischen Menschen und Umwelt in umfassenden Skalen bewertet wird [Burger *et al.* 2012].

Es gibt in etlichen Publikationen verschiedenen Szenarien für die Deckung des Bedarfs an Ernteertrag, die zugleich als Strategien zur Erhaltung der Biodiversität für einen Win-win-Ansatz die Anwendung finden. Die unbeabsichtigten Auswirkungen der Landnutzungsintensivierung werden anhand gezielter Applizierung in der Präzisionslandwirtschaft gesunken [Cassman 1999]. Die Effizienz der Behandlung kann durch die Nutzung von den Ökosystemdienstleistungen wie z. B. biologische Behandlung in Form der Nutzung natürlicher Feinde gegen den Ausbruch der Schädlinge maximiert werden [Thompson *et al.* 2011]. Die Integrierung stickstofffixierender Pflanzen in den Produktionssystemen kann den Ernteertrag steigern [Akininifesi *et al.* 2010]. Der Fokus auf räumliche Landnutzungsplanung wird ein gutes Entscheidungsmanagement in großem Maßstab ohne weitere Ausweitung der Anbaufläche ermöglichen [Barraquand & Martinet 2011]. Die Bestimmung spezifischer Applikationsauswahl für unterschiedliche Agrarlandschaften und daraus resultierenden Ergebnissen steht im Mittelpunkt der Debatte auf der Suche nach einem Kompromiss zwischen Produktion und Naturschutz. Eine Reihe von Optionen basiert auf die Erhaltung und Produktion in gesamter Landschaft durch die Aufteilung der Landschaft und durch die Trennung der Anbauziele für die Produktion und den Naturschutz in verschiedenen Landparzellen [Phalan *et al.* 2011, Tscharncke *et al.* 2011].

Aktuell dreht sich das Thema Biodiversitätserhaltung um das Dilemma „Landteilung oder Landersparung“ [Green *et al.* 2005]. Die Landersparung beruht auf strengem Schutz von einigen kleineren Landflächen vor Fußabdrücke intensiver Landbewirtschaftung. Durch die Landteilung müssen vielmehr weniger Landflächen für strenge Biodiversitätserhaltung etabliert werden, sodass die größeren Landflächen sorgfältig genutzt werden sollen [Durán *et al.* 2014]. Diese Debatte zieht sich weiter, obwohl beide Alternativen eingesetzt werden [Kremen *et al.* 2015]. Die Landersparung hat jedoch weltweit häufiger die Anwendung gefunden [Mertz & Mertens 2017]. Bessere Ergebnisse für die Biodiversität erfordert

die genauere Kenntnis über die speziellen Bewertungsmaßstäbe und die Berücksichtigung dieser Maßstäbe, die auf wichtige natürliche Abläufe ankommen, was zur Klarheit im Analyserahmen führt [Pelosi *et al.* 2010 ].

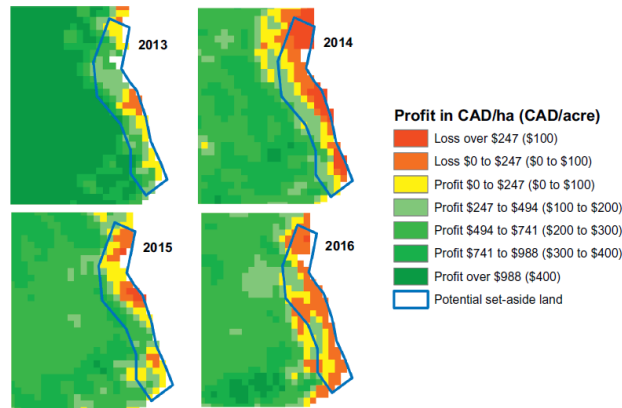
## 6 Ressourcenschutz in Produktion anhand Präzisionslandwirtschaft

### 6.1 Erstellung der Gewinnkarte

Optimierung des Ressourcenschutzes für die Produktion in Agrarökosystemen erfordert präzise räumliche Analysen bzw. die Technologien. Diese Techniken basieren auf der Heterogenität der Agrarlandschaften wie die Bodenart, die Neigung, der Nährstoffgehalt, die Feuchtigkeit und der präzise Ressourcenschutz beschreibt die Ansätze für die Schonung des Bodens und des Wassers in den Acker- und Grünländern, indem es mit räumlichen Technologien (z. B. GPS, Fernerkundung und GIS) und ihren Verfahren (Kartenanalyse, Oberflächenmodellierung, Geodaten Mining) zusammenhängt [Berry *et al.* 2005]. Der präzise Ressourcenschutz ist mit der Präzisionslandwirtschaft verbunden. Dieser bezieht sich auf die Überwachungstechnologien für die Optimierung der Produktionsprozesse. Das ist überwiegend wichtig für die Erhöhung der Leistung und des Ernteertrags sowie für die Effizienz und Effektivität der Applikationen in der Landwirtschaft [Fraser 2018].

Im Bezug auf die Umwelt wurde die Präzisionslandwirtschaft bisher erfolgreich eingesetzt, um die übermäßigen chemischen Einträge in den Boden zu vermeiden, den ökologischen Fußabdruck zu verringern und die Pflanzengesundheit zu überwachen. Aus ökonomischer Sicht trägt die Präzisionslandwirtschaft auch durch die Abschätzung von Qualität und Quantität der landwirtschaftlichen Produkte sowie die Überwachung der Nahrungskette zur Kosteneinsparung und zur Ernährungssicherheit bei [Schrijver *et al.* 2016]. Die tendierte Anwendung der Gewinnkarte motiviert die Produzenten zur Stilllegung landwirtschaftlich nicht gewinnbringender Gebiete als Reserve, die anfällig gegen die Umweltrisiken wie die Bodenerosion sind [Muth *et al.* 2014, Brandes *et al.* 2016].

Die Umweltvorteile können durch Entwicklung hochauflösender Gewinnkarten von landwirtschaftlichen Betrieben auf ökonomische Basis erzielt werden, indem die Teilflächenskala mit niedrigem oder negativem Gewinn identifiziert wird (siehe Abbildung 11). So können die Gebiete mit niedriger wirtschaftlicher Durchführbarkeit für die präzise Erhaltung des Agrarökosystems erkannt werden. Die Überwachung zur Erfassung der Daten mit guter Auflösung über die Nutzpflanzen und über die Rendite findet anhand optischer Sensoren und GPS-Technologie statt, die an Mähdrescher installiert werden [OMAFRA 2018a]. Die Abschätzung des Budgets für die Anbausysteme inkludiert die gesamten Kosten der Operationen zum Anbau (z. B. die Saatgut, Düngemittel, Herbizide, Kosten für Traktoren und Maschine, Ernteversicherung und Laborarbeit) und Verwaltungskosten (z. B. Investition, Zinsen und Ab- und Zuschreibung der Umlaufvermögen) sowie Kosten pro Flächeneinheit.



**Abbildung 11:** Das Beispiel der Identifizierung räumlicher Verteilung vom Gewinn eines Bestandes mit potenziell stillgelegten Teilflächen (CAD  $ha^{-1}$ : Canadian Dollar per Hectar) [Capmourteres *et al.* 2018, Abbildung 4].

Nach jährlich kontinuierlicher Erstellung der Gewinnkarte anhand einer Interpolationsmethode namens Kriging, die eine geostatistische Funktion an einige Stichprobepunkte anpasst, kann für alle anderen Orte auf der Karte den Ausgabewert berechnet werden. Das ist besonders zur Korrelation mit räumlichen Abständen geeignet [Oliver & Webster 1990]. Dabei kann die Gleichung wie folgt verwendet werden:

$$P_{ijk} = (Y_{ijk} \times GP_{ij}) - CP_{ijk}$$

In der Gleichung ist P die Rentabilität, i ist die Kulturpflanze, j ist das Jahr und k ist die Koordinate vom Ernteertrag [Brandes *et al.* 2016], wobei  $Y_{ijk}$  der Ertrag für Ernte i im Jahr j am Ertragspunkt k ist;  $GP_{ij}$  ist der Getreidepreis in diesem Beispiel für Ernte i im Jahr j; und  $CP_{ijk}$  ist die Produktionskosten für die Ernte i im Jahr j am Ertragspunkt k. Interpolationen werden in der Regel zur Generierung der Gewinnkarte aus den Daten der Präzisionslandwirtschaft verwendet [Betzek *et al.* 2017]. Die stillgelegten Landflächen sind anfällig für die Schädlinge und die Unkräuter und sind geeigneter Bestand für Pilze, dafür ist die Überlegung eines durchführbaren Anbaus als Alternative in diesen Teilschlägen auch aus ökonomischer Sicht von Bedeutung [Valko *et al.* 2016]. Die Bewertung positiver oder negativer Wirtschaftlichkeit einer alternativen Landwirtschaft verschafft den Herstellern eine Vergleichsbasis zur Kalkulation der Kosten für verschiedene Strategien. Die Ergebnisse einer

Fallstudie zeigen um 14 % günstigere Gesamtkosten, wenn es in umweltspezifische Vorteile, wie beispielsweise die Flächenstilllegung investiert wird [Capmourteres *et al.* 2018]. Dies war gemäß dem Jahr und entsprechendem Gewinn des ganzen Anbaus im Vergleich zu konventioneller Landwirtschaft. Dies verlangte keine Subvention oder andere wirtschaftliche Anreize. Im Rahmen dieser Studie haben aber um 50 % der Anbauflächen in beiden Abläufen gleiche Geldverluste aufgewiesen [Capmourteres *et al.* 2018]. Diese Methode hatte in den letzten Jahren den Ansatz gefunden und erfordert die Untersuchungen auch in größeren Maßstäben [Muth *et al.* 2014, Brandes *et al.* 2016]. Diese Untersuchungen erfordert die Festsetzung der ungeschützten privaten Landflächen als Schutzgebiete, was im größeren Verhältnis eine Herausforderung der staatlichen Kaufkraft ist [Selinske *et al.* 2015]. Die stillgelegten Landflächen können in kleineren Skalen nach mehrjähriger Bewertung über die Preise für den Ernteertrag zur Erhaltung biologischer Vielfalt beitragen. Dabei sind auch die Rohstoffpreise, Größe und Standort von Bedeutung. Die Regierungen investieren zunehmend in die Einführung der Präzisionslandwirtschaft zur Reduzierung der Emission von Treibhausgasen [AAFC 2018]. Daher können stillgelegten Landflächen im Besitz von Personen oder Unternehmen in Form privater Schutzgebiete befinden [Clements *et al.* 2016].

## 6.2 Smart Farming

Digitalisierung ist ein Megatrend in der Agrarwirtschaft und unter allen Akteuren landwirtschaftlicher Wertschöpfungsketten. Die datengesteuerte Landwirtschaft, Digital Farming oder „Smart Farming“ ist ein Oberbegriff für das digitale Entscheidungsmanagement sowie die Präzisionslandwirtschaft. Die digitalen Datenplattformen können die Schnittstellen zwischen verschiedenen Technologiezweigen der Landbewirtschaftung im Interesse einer intelligenten und nachhaltigen Agrarwirtschaft gestalten [Gandorfer *et al.* 2017]. Die Nutzung intelligenter Landwirtschaft auf den Grundsätzen der Präzisionslandwirtschaft ergibt sich strategischen und praktischen Entscheidungsfindungen und geeigneten Anwendungen. Die Agrarbetriebe können von datengenerierenden Systemen sowie von Weiterverarbeitung dieser Daten profitieren. In diesem Sinne werden die Elemente und Aktivitäten durch das Internet der Dinge in die Daten umgewandelt. Diese Technologie veranlasst einen Ausgangspunkt zur Datenerstellung aus vielen wertvollen Informationen der Agrarlandschaft für die Landwirtschaft [Tzounis *et al.* 2017]. Traditionell gingen Landwirte auf die Felder, um den Status ihres Nutzpflanzenbestands zu überprüfen und Entscheidungen gemäß ihrer Erfassung zu treffen. Dieser Ansatz ist zur Bestimmung der effizienten Kriterien für kommende Jahre nicht genügend nachhaltig und erreichbar, da diese nicht alle Managementbereichen

so decken kann. Die fortgeschrittenen Managementsysteme im Rahmen von Smart Farming bieten jedoch praktische Lösungen. Diese Technologien können den Landwirten ein systematisches Instrument zur Detektion unerwarteter Probleme aufstellen, die durch optische Einsichtnahme bei vereinzelter Kontrollen schwer zu erkennen sind. Daher wenden die Landwirte manche High-Tech-Anbausysteme zur andauernden Effizienzoptimierung ihrer Arbeit an. Die Sensortechnologien und telematische Instrumente haben ihren Platz für präzise Kartierung und Ressourcenerfassung sowie für Topografie einer Region etabliert. Daraus kann es von Variabilität der Merkmale wie der Säuregehalt, die Bodentemperatur und die Wetterprognose hervorgehen. Anhand dieser Systeme können z. B. die Modelle zur Abschätzung der Wetterbedingungen für die nächsten Tage und Wochen erstellt werden. Das Erfolgsmuster der digitalen Landwirtschaft hat bereits im Jahr 2015 im Rahmen einer Studie gezeigt, dass es bis 30 % der Wertschöpfung über Landmaschinen mit Software, Elektronik und Sensorik stattgefunden hat [Rohleder & Krüskens 2016].

Durch innovative Abläufe der Landbewirtschaftung und durch die Umstellung auf digitale Techniken und Konzepte wird einen ressourcenschonenden Umgang mit der Umwelt gewährleistet. Laut einer Befragung im Jahr 2016 hinsichtlich der Nutzung digitaler Anwendungen im Rahmen von der Landwirtschaft 4.0 haben 53 % der 521 Landwirte und Lohnunternehmer in Deutschland angegeben, dass sie mit diesen Ansätzen bekannt sind [Rohleder & Krüskens 2016]. Die Landwirte können sogar anhand des Smartphones ihre Ausstattungen, Nutzpflanzen und Viehbestände überwachen und die Daten zur Abschätzung nächsten Stand ihrer Bewirtschaftung abrufen. Es wird erwartet, dass der Agrarsektor stark von den Fortschritten dieser Technologien beeinflusst wird [Tzounis *et al.* 2017].

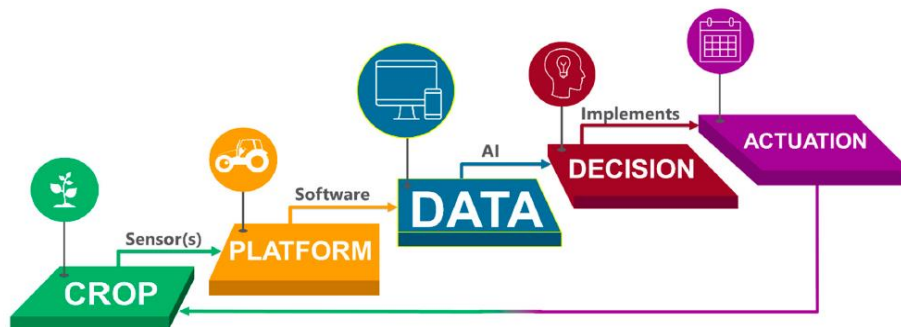
Maschinelles Lernen ist eine Teilmenge der Künstlichen Intelligenz und ist entstanden, um ständig wachsenden Anforderungen der Datenverarbeitung durch die Kapazität exponentieller Rechenleistung für Smart Farming zu gewährleisten. Dieser Ansatz wird in Ertragsabschätzung, Erkennung von Krankheiten, Unkraut- und Kulturpflanzenerkennung, Wasser-Bodenmanagement und Erntequalität genutzt. Maschinelles Lernen beschäftigt sich mit Methoden zur Analyse hyperspektraler und multispektraler Daten. In Smart Farming wird auf Big-Data-Analysen anhand Maschinelles Lernen und auch auf Robotik fokussiert. Effiziente Algorithmen erfüllen die Aufgabe, durch den Trainingsprozess das Modell zum Klassifizieren, Clustern oder Vorhersagen der Testdaten zu erstellen [Benos *et al.* 2021].

### 6.3 Datengesteuerte Landwirtschaft

Das pflanzenbauliche Management basiert auf den Daten aus dem Feld der Landbewirtschaftung und ändert sich aufgrund dynamischen Informationszeitalters sehr stark. Die datengesteuerte Präzisionslandwirtschaft ist die Anwendung der Daten zur Verbesserung des Entscheidungsmanagements bzw. der Eigenschaften der Anbausysteme wie ökologische Nachhaltigkeit, Ernteertrag und Gewinn sowie die Klimadienstleistungen [Mehrabi *et al.* 2020]. Ein Ziel dieser Technologien ist die Beobachtung und die Überprüfung der Pflanzenentwicklung zur Erhaltung der Diagnose über den Pflanzenbestand. Die Rohmessungen von Schlüsselparametern der Kulturpflanzen benötigen eine effiziente Verarbeitung zur Umwandlung der Zahlen oder Bilder in auswertbaren Informationen, damit die Landwirte geeignete Entscheidungen hinsichtlich verschiedener Behandlungen für ihre Nutzpflanzen treffen können [Saiz-Rubio & Rovira-Mas 2020]. Dabei werden die räumlich und zeitlich variablen Daten abgerufen und demgemäß Maßnahmen aus direkter Überwachung der Pflanzenbestände für die Nutzpflanzen ergriffen. Die Sensoren erfüllen die Aufgabe, die Daten über den Pflanzenbestand aufzunehmen. Diese Daten können die Grundlage zur Bestimmung erwünschter Parameter und entscheidend für die Tendenz der nächsten Jahre sein. Big Data und mobile Technologie können für verschiedene Probleme, wie beispielsweise für niedrigen Ernteertrag eingesetzt werden [Mehrabi *et al.* 2020].

Der Betriebszyklus vom Feldmanagement unter fortgeschrittenen Betriebstechnologien wird nach der Art der Ausführung in der Abbildung 12 gezeigt. Das besteht aus der Datengenerierung (durch mobile Anlagen, die Sensoren auf dem Feld, die Satelliten und die Landwirte als Sensor), die Datenverarbeitung und die Abschätzung-Analyse (über die Nutzung der Big-Data-Stacks, die Machine und Deep Learning). Diese besteht ebenfalls aus der Interaktion zwischen Menschen und Computern in Form von menschenzentriertem Ansatz zur Erstellung der Versuche und zur Dokumentierung der Erfassung durch die Sprachen, den Text und die Bilder [Mehrabi *et al.* 2020].

Dieses Führungssystem führt intelligente Entscheidungsfindung aus. Das basiert auf objektiven Daten aus dem Feld über die räumliche und zeitliche Variabilität im Pflanzenbestand und in Echtzeit. In dieser Plattform werden die objektiven Daten direkt aus den Ernte- und Bodenparametern oder aus der Umgebung abgerufen. Dabei werden umfassende Informationen anhand der Sensoren erhoben und transportiert. Der Datenabruf über die Sensoren wird in verschiedenen Formen erfolgen. Es kann von Einsetzung eines USB-Sticks in einen USB-Anschluss [Rovira-Mas 2019] bis hin zu einer durch das Internet synchronisierter Softwareanwendung unterschiedlich sein. Die Verknüpfung zwischen Datenerfassung



**Abbildung 12:** Der informationsbasierte Managementzyklus für die fortgeschrittene Landwirtschaft ([Saiz-Rubio & Rovira-Mas 2020, Abbildung 1]).

und Entscheidungsstadien benötigt das Filtern von den Routinen und den Einsatz von den Algorithmen künstlicher Intelligenz. Das unterstützt die Landwirte für korrekte Entscheidung durch die Übergabe richtiger Daten. Die Maßnahmen werden im Laufe ihres Kreislaufs an das Erntegut gerichtet, indem die Reaktion der Ernte dementsprechend anhand spezieller Sensoren aufgenommen wird. Dieser Regelkreis wird systematisch bis zur Erntezeit fortgesetzt, die das Ende der Vegetationsperiode für die Nutzpflanzen verzeichnet. Unabhängig von den Verfahren eines Managements weisen die Felder charakteristisch gewisse kleinräumige Variabilität in ihrer Beschaffenheit auf, die vom Wetter binnen der Vegetationsperiode und von der Felderwirtschaft abhängt. Diese vorhandene Variabilität begründet selbst die Notwendigkeit einer Überwachung der Kulturpflanzen. Die Daten von letzten Jahren sind die Grundlage für die Bestimmung der Tendenz in erwünschten Parameter für die nächsten Jahre. Die Umsetzung und die Realisierung dieser Ansätze erfordert, kleinräumige Erfassung-Managementzone mit homogenen Eigenschaften zu bilden. Diese Zonierung kann zu einer ökonomischen Applizierung des Materials sowie zur ökologischen Einsparung von den Mitteln im Rahmen der Präzisionslandwirtschaft geführt werden [Miao *et al.* 2018]. Die Einführung dieser Bewirtschaftungszonen senkt die Kosten für das Düngemittel. Sie spart den Einsatz von den Pflanzenschutzmitteln und verbessert den Er-



trag und dadurch erhöht die Rentabilität der Landwirtschaft [Grand View Research 2019]. Beispielsweise können diese Methoden eine Überversorgung durch den Stickstoff vermeiden, was die Eutrophierung in Oberflächengewässern und Algen- und Pflanzenwachstum an der Oberfläche dieser Gewässer verursacht. Die Verunreinigung von Grundwasser und weitere gasförmiger Verlustpfad von Stickstoff in Form des Lachgases ( $N_2O$ ) hat 300-fache Wirkung von Kohlenstoffdioxid ( $CO_2$ ) in der Atmosphäre. Diese präzisen Methoden können im Rahmen der Düngeverordnung gut eingesetzt werden [Speckle *et al.* 2020].

Steigt die Variabilität an, wird die Mindestgröße der Managementzone nach der Möglichkeit jedes Landwirts limitiert. Das gilt auch für verschiedene Managementbedingungen innerhalb eines Felds aus ökonomischer und logistischer Sicht. Die Auswahl der spezifischen Parameter innerhalb der Teilschläge sollte nach der Festlegung des Bereichs und vor dem Beginn des Prozesses sorgfältig geplant und überprüft werden [Zhang *et al.* 2002]. In der Regel gibt es zwei Verfahren des Informationsaustauschs zur Aktivierung einer Applikation für die Kulturpflanzen. Diese sind die Echtzeit und offline, die für die Entscheidungsfindung jeweils nach dem Erhalt der Information mit einer oder ohne eine Verzögerung zuständig sind. Die angewandten Technologien mit variabler Rate können anhand fortschrittlicher Geräte umgesetzt werden. Die landwirtschaftlichen Maschinen mit variabler und standortspezifischer Rate für die Applikation sind die Beispiele für das optimale Pflanzenmanagement in der Praxis. Diese erhalten die Aufträge einer intelligenten computergesteuerten Kontrolleinheit und führen eine Reihe von landwirtschaftlichen Aufgaben nur dort aus, wo es tatsächlich benötigt wird [Tobe 2019]. Es hat bereits mechanische Geräte mit der Kamera und GPS-Steuerung und mit der Bildverarbeitung auf der Grundlage der Künstlichen Intelligenz in der Landbewirtschaftung den Ansatz gefunden.

#### **6.4 Big Data; Analyse massiver Daten**

Ein grundlegender Unterschied zwischen konventioneller und moderner Landwirtschaft neben dem Mechanisierungsgrad wird sich in direkter Datengewinnung von den Kulturpflanzen abgezeichnet. Eine subtile Erfassung ist in traditionellen Betrieben nach optischer und subjektiver Begutachtung nicht realisierbar. In der modernen Landwirtschaft kann jedoch hohe quantitative Datenaufnahme zur objektiven Bewertung geführt werden. Die Sensoren erlauben eine Datenaufnahme vor Ort, indem diese bei nicht-invasiven Technologie in Kombination mit den selbstfliegenden Plattformen eine massive Echtzeit-Datenerfassung ermöglichen. Der Datenüberschuss ist jedoch eine ernsthafte Herausforderung, da die wichtigen Informationen durch die Rauschdaten maskiert werden können. Das Internet der

Dinge stellt die Anwendung der Sensoren in einem agrarlandschaftlichen Zusammenhang bereit und lässt jede Menge von Elemente und Maßnahmen in nützlichen Daten umwandeln. Die Agrarbetriebe werden stark von den Fortschritten dieser Technologien betroffen [Tzounis *et al.* 2017]. Die weltweite Nahrungsmittelproduktion muss bis 2050 um 60 % steigern, da die Bevölkerung in dieser Zeit bis über neuntausend Millionen Menschen wachsen wird [Myklevy *et al.* 2016]. Es wird geschätzt, dass das Big Data durch das Internet der Dinge mit neuen Techniken das Potenzial hat, eine Erhöhung landwirtschaftlicher Produktivität bis 2050 um 70 % zu ermöglichen [Sarini *et al.* 2019]. Dieses Phänomen wurde laut Studien positiv bewertet. Die ständig ansteigenden Datenmengen für das Management auf dem Feld erfordert die Durchführung der automatischen Prozesse, die durch Erfassung der Mas-sendaten aus den Betriebsinformationen ableiten. Big Data beeinflusst Smart Farming und umfasst die gesamten Abläufe. Die intelligenten Sensoren generieren große Datenmengen im Auftrag präziser Entscheidungsfindung. Dies spielt erhebliche Rolle zur Unterscheidung zwischen einem innovativen und oder traditionellen Beteiligten [Wolfert *et al.* 2017].

Die allgemeine Rechtsordnung für nachhaltige und digitale Landbewirtschaftung erfordert Daten-Governance, sodass die Anwendung algorithmischer Daten der Agrardigital-technologien z. B. Big-Data-Analyse, Cloud Computing, Robotik und Künstliche Intelligenz. im rechtlichen Rahmen erfasst, eingeordnet und für die Nutzung in der Agrarwirtschaft orientiert werden. In den umfangreichen digital basierten Agribusiness-Modellen wird es zwischen den personenbezogenen und nicht-personenbezogenen Datentypen unterschieden. Die Beispiele sind die Unternehmens- und Maschinendaten oder „Open Data“ z. B. Geo- und Satellitendaten in verschiedenen rechtlichen Gesamtlagen der Agrarpraxis [Härtel 2019].

In Publikationen über Big Data wird im Zusammenhang mit Pflanzenmanagement verschiedene Aspekte präsentiert, die sich von nur in einigen Fällen bis hin zu zunehmend anwendbar in der Landwirtschaft erstrecken. Diese ist abhängig von jedem Betrieb, in dem Big Data in landwirtschaftlichen Praktiken angewandt wird. Die ganzheitliche Einhaltung rechtlicher Vorgaben beim Management von Daten ist ein Schlüsselthema. Das schließt das Dateneigentum und den Datenschutz sowie die Sicherheit und die Geschäftsmodelle ein, die in zukünftigen Forschungsarbeiten mitgeführt werden sollten [Wolfert *et al.* 2017]. Die Eigenschaften wie Volumen, Vielfalt, Geschwindigkeit, Wahrhaftigkeit und Wert sind manche Dimensionen von Big Data [Meng *et al.* 2020].

## 6.5 Robotik für Nachhaltige Nutzpflanzenproduktion

In der Regel nehmen die landwirtschaftlichen Betriebe meistens viele saisonale Arbeiter für Erntezeit zur Beibehaltung der Produktionsrate in Anspruch. Die damals mit den Menschenmengen befüllten Agrargesellschaften haben sich jedoch inzwischen entwickelt, indem die Mehrheit von den Menschen heutzutage in Städten leben. Infolgedessen stehen die landwirtschaftlichen Betriebe vor der Herausforderung eines Arbeitskräftemangels. Die Integration der Funktionen von Künstlicher Intelligenz durch Robotik in der Landwirtschaft ist eine Lösung zur Behebung dieses Arbeitskräftemangels [Saiz-Rubio & Rovira-Mas 2020]. Dabei können wertvolle Informationen über objektive Sensoren für die Maximierung der Produktivität sowie für die Nachhaltigkeit erfasst werden. Das Konzept von Landwirtschaft 5.0 sollte für die erste Hälfte des 21. Jahrhunderts den Einsatz von den Robotern bzw. andere Facetten der Künstlichen Intelligenz verwirklichen [Zambon *et al.* 2002, Walch 2020].

Die Nutzung der Roboter auf dem Feld entlastet die menschliche Belegschaft im Labor und führt zu schnellerem Ernten im Vergleich zu der Leistung von menschlichen Arbeitskräften, jedoch gibt es aktuell noch viele Fallstudien, in denen die Roboter die Menschen nicht überholt haben. Das Aufkommen von den Robotern in der Landwirtschaft hat bereits die Produktivität in mehreren Ländern einprägsam erhöht und senkte gleichlaufend die der Betriebs- bzw. der Marginalkosten [Shamshiri *et al.* 2018]. Die Robotersysteme, die derzeit für die Landwirtschaft entwickelt sind, sind für die Arbeit auf dem Feld spezialisiert und unterstützen die Produzenten bei den anstrengenden Aufgaben [Bechar & Vigneault 2016]. Anwendung der Roboter in der Landwirtschaft wächst exponentiell [Shamshiri *et al.* 2018], was eine gut gelungene Lösung für Smart Farming bei der Bewältigung des Arbeitskräftemangels ist. Das fördert permanent die Kostenoptimierung. Beim Ansatz von meisten innovativen Verfahren wie dieser Technologie gibt es jedoch aktuell Einschränkungen z. B. für viele kleine landwirtschaftliche Betriebe aus ökonomischem Grund des Skaleneffekts [Lamborelle & Fernandez Alvarez 2019, Sonka 2014], trotzdem sinken die Technologiekosten mit der Zeit und daher werden die landwirtschaftlichen Roboter sicherlich in der Zukunft als Alternative für eine höhere Produktion eingesetzt [CBINSIGHTS 2019].

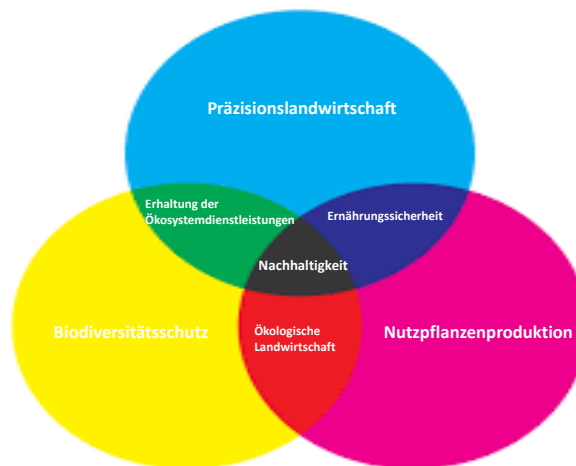
Das Konzept der Agrarrobotik wird zur Überwindung der Herausforderung steigender Nachfrage für den Ernteertrag und zur Deckung dieses Bedarfs eingeführt. Die Agrarroboter werden in der Lage sein, die Aufgaben auf dem Feld im Vergleich zu den Landwirten effizienter zu erledigen [Verified Market Intelligence 2005]. Die aussichtsreichen Unternehmen der Zukunft setzen die Robotik und maschinelles Lernen für Problemlösung des steigenden Produktionsbedarfs mit erweiterten Sensortechnologien ein [Zhang *et al.* 2002]. Autonome

Navigation ist eine Voraussetzung für Feldroboter zur Ausführung der Aufgaben von Präzisionslandwirtschaft. Diese Roboter haben das Potenzial, die landwirtschaftliche Produktivität zu verbessern und Feldmanagement gezielt durchzuführen. Eine beliebte Lösung für die autonome Navigation in Feldern ist derzeit die Verwendung einer hoch-präzisen Dual-Frequenz des RTK-GNSS-Empfängers, um die Roboter entlang vorprogrammierter Bahnen zu führen. Aktuell wurden Robotertechnologien entwickelt, die ohne teure RTK-GPS-Lösungen auskommen. Dieser Ansatz benutzt die Bilder von Kameras an Bord, ohne dass eine explizite Lokalisierung oder die Nutzung einer Karte des Feldes beim Fahren erforderlich ist. Diese Roboter wendet die Tatsache im Reihenkulturanbau und Programmiersprache C++ sowie Roboter-Operationssysteme an, um den Pflanzenreihen genau zu folgen und den Wechsel zur nächsten Reihe nahtlos innerhalb desselben Rahmens zu bewältigen. Das erleichtert den Anbau, das Jäten und andere landwirtschaftliche Tätigkeiten innerhalb mehreren parallelen Reihen [Ahmadi *et al.* 2020].

## 6.6 Managemententscheidungen der Zukunft

Präzisionslandwirtschaft und ökologische Landwirtschaft sind beide Lösungen (siehe Abbildung 13), die dem Problem des Biodiversitätsverlusts, das sich aus der Verwendung Agrochemikalien ergibt, entgegenzuwirken und sie zu mildern, wobei die Präzisionslandwirtschaft gründlicher um die Verbesserung der Nährstoffnutzungseffizienz, Einsparungen der Düngemittel und die Verringerung des ökologischen Fußabdrucks zentriert. Integriertes Nährstoffmanagement in ökologischer Landwirtschaft ist langfristig auf die Verbesserung der Boden- und Pflanzenqualität ausgerichtet, aber das fehlende Potenzial für eine kurzfristige On-the-go-Reaktion im Bereich Bodenfruchtbarkeit und Pflanzenschutz kann nur durch die Techniken der Präzisionslandwirtschaft optimiert werden [Rao *et al.* 2021].

Die sozioökonomische Analyse und Erfassung ökologischen Fußabdrucks der Landwirtschaft ist für eine nachhaltige Nutzpflanzenproduktion von Bedeutung. Universität Bonn gemeinsam mit dem Forschungszentrum Jülich führt von daher Robotik und Phänotypisierung im Rahmen dieses Projekts für nachhaltige Produktion der Nutzpflanzen durch. Integration eines Exzellenzclusters, wie beispielsweise „PhenoRob“ (Robotik und Phänotypisierung für nachhaltige Pflanzenproduktion) spielt eine wesentliche Rolle für die Zukunft der Nutzpflanzenproduktion. Die Präzisionslandwirtschaft und ihrer Methoden und Technologien überwachen und analysieren die Pflanzen, um sie durch Erfassung der grundlegende Parameter zweckgerichtet zu behandeln. Verständnis verschiedener Parameter, wie beispielsweise Biodiversität, Bodenbeschaffenheit und Umweltfaktoren wird durch



**Abbildung 13:** Überlappende Kreisdiagramme, die die nachhaltige Präzisionslandwirtschaft und Biodiversitätsschutz für optimale Nutzpflanzenproduktion darstellen (Quelle: Eigene Erhebung).

Präzisionslandwirtschaft verbessert. Mit Optionen der Präzisionslandwirtschaft kann systematische Beobachtung aller wichtigen Aspekte der Nutzpflanzenproduktion in Form einer Mehrfachaufgabenperformanz erreicht werden. Unterschiedliche Disziplinen, wie beispielsweise Robotik, Digitalisierung und maschinelles Lernen werden integriert, um heterogene Datenmenge über Nutzpflanzenbestände und Biodiversität der Vegetation zu erfassen und zu analysieren. Unterschiedliche Sensornetze aus Bodenroboter und Drohnen stellen gezielteres Management der „Inputs“ zur Optimierung der „Outputs“ bereit. Beispielsweise erkennen autonome Roboter die Nutzpflanzen und Unkräuter in Echtzeit und können die Unkrautbekämpfung durch Laser oder andere Methoden ohne Herbizideinsatz durchführen. Die Düngung der Nutzpflanzen kann ebenfalls individuell für jede Pflanze durch diese innovativen Techniken erfolgen, was zu einem besseren Output für Umweltschutz und Ertrag führt. Die genetischen Ressourcen können außerdem als Ausgangspunkt für ein besseres Output eine wichtige Rolle spielen. Sozioökonomische und ökologische Effekte dieser Innovationen der Landbewirtschaftung werden gleichlaufend durch soziale Netzwerke analysiert, damit die Bilanz der identifizierten Verhältnisse zwischen Input und Output sowohl in der Hochskalierung als auch für Kleinbetriebe zur Markteinführung bewertet wird. Die Vorteile der Präzisionslandwirtschaft können in Betrieben mit größeren Kapitalinvestitionen und Erfahrung mit Informationstechnologien gut umgesetzt werden.

## 7 Fazit

Im Rahmen dieser Literaturrecherche wurde es auf die Bedeutung der Erhaltung der biologischen Vielfalt in intensivierter und industrieller Agrarwirtschaft fokussiert. Es wurde gezeigt, dass die negativen Auswirkungen unpräziser Landbewirtschaftungsmaßnahmen auf Wechselwirkung zwischen verschiedenen Arten zu irreversiblen Rückgang der Biodiversität und auch zu Ertragsverlusten führen. Die heterogene Agrarlandschaft und Vorhandensein der Segetalflora fördert eine Aufrechterhaltung der Ökosystemfunktionen. Räumliche Streuung der Anbausysteme in Agrarlandschaft hilft, einheimische Biodiversität erhalten zu bleiben. Segetalpflanzen sind potenzielle Genquellen zur Modifizierung der Merkmale wie Resistenz in Kulturpflanzen und Segetalflora spielt für zukünftig ansteigende Nachfrage für Bestäuber eine wesentliche Rolle. Klassifizierung der Ökosystemdienstleistungen kann eine richtige Vorgehensweise zum Schutz der Biodiversität und auch gut für Produktion sein. Der aktuelle Stand von Artenverlust in Deutschland und Mitteleuropa verweist an das Modell der ökologischen Präzisionslandwirtschaft. Diese Recherche hat gezeigt, dass die innovativen Methoden und digitale Techniken der Präzisionslandwirtschaft die Anbausysteme an die kleinräumige Variabilität der Standort- und Bestandsparameter anpassen können. Diese tragen zur Qualität und zur Rentabilität der Produktion bei und unterstützen den Ressourcenschutz in einer nachhaltigen Landbewirtschaftung. In Verfahren der Präzisionslandwirtschaft sind Internet der Dinge und Maschinelles Lernen im Rahmen der Digitalisierung der Landwirtschaft von großer Bedeutung. Die Fernerkundung anhand pilotloser Luftfahrzeuge mit moderner Sensortechnologie unterstützen Aufbau der Entscheidungshilfesysteme. Die Investition in umweltspezifische Vorteile innerhalb unprofitabler Teilflächen kann ökonomischer als konventionelle Landbewirtschaftung in diesen Landflächen sein. Dabei hilft Erstellung einer Profitkarte über die Teilschläge. All dies deutet darauf hin, dass die Big-Data-Analyse und Cloud Computing für das Modell einer digitalisierten Agrarwirtschaft genutzt und an ihren Dimensionen orientiert werden können. Dies erfordert aber die Handlung im rechtlichen Rahmen und Data-Governance. Das räumliche und zeitliche Management anhand der Robotik bzw. der Künstlichen Intelligenz spielt in Smart Farming eine wichtige Rolle. Die zukünftig sinkenden Technologiekosten bzw. aktuelle Herausforderung des Arbeitskräftemangels führt zur Weiterentwicklung landwirtschaftlicher Roboter als Alternative für höhere und präzise Produktion. Das Internet der Dinge fördert den zukünftigen Bedarf an erhöhter Produktivität und kann wenigstens die Kosten optimieren. In Anlehnung an diese Techniken kann insgesamt zur ökologischen Landwirtschaft und zur ökonomischen Einsparung der Mittel beigetragen werden. Im Großen und Ganzen wird die Biodiversität durch

Ausweitung der Anbauflächen nach unilateralem Fokus auf Ertragssteigerung beeinträchtigt. Auswirkungen intensiver Landnutzung sollten nach außerhalb des Standortes vermieden werden. Diese können durch nachhaltigen Anbauplan verwaltet werden. Es ist wichtig zu betonen, dass die Agroforstsysteme die Ausbeutung der Ressourcen vermeiden. Diese reduzieren Bodenerosion, Nährstoffverlust und Oberflächenabfluss. Die Bäume schützen hierbei das Mikroklima und verringern Winderosion. In idealen Umständen steigern diese das Pflanzenwachstum und den Ernteertrag unter Vorbehalt einer richtigen Baumauswahl. Die Agroforstsysteme können in Deutschland und Europa als nachhaltige Landwirtschaftsform in Kombination mit Präzisionslandwirtschaft mehr Aufmerksamkeit gewinnen, wenn die Interessentengruppen über mögliche Vorteile dieser Anbausysteme informiert werden. Aus dieser Studie wurde ersichtlich, dass es wichtig ist, durch die Abschätzung gesamten Energie- und Materialflusses zwischen Mensch und Umwelt auf globaler Ebene umfassende Skalen zu setzen. Eine Win-win-Strategie zum Schutz und die Erhaltung der Biodiversität kann die Nutzung biologischer Optionen sein. Die Behandlung der Unkräuter oder die Erhöhung des Ernteertrags kann anhand ökologischer Zwischen- und Deckfrüchte oder in Form der Mischkulturen im Pflanzenbau erfolgen. Somit ist es notwendig, die Strategien zur Optimierung von den Mischkulturen für den Einsatz in Kleinbetrieben zu überdenken. Die vorangegangene Diskussion über Agrobiodiversitätsmanagement deutet darauf hin, dass telematische Instrumente mit benutzerfreundlichen Schnittstellen die serviceorientierte Architektur der Landwirtschaft entwickeln können. Die Schritte und Ressourcen für die Entwicklung von Prozessen der Biodiversität und Präzisionslandwirtschaft haben überlappende Ontologien, sodass der Erfolg eines Algorithmus in einer Domäne der Ausgangspunkt für die Analyse in andere Domäne sein kann. Die geografischen Verteilungsmodelle der Biodiversität und Modellierung biologischer Prozesse können sich durch ökologisches Nischenkonzept aus biotischen und abiotischen Umweltdaten entwickeln. Daher kann die präzise Erfassung der Populationsdynamik zur nachhaltigen Agrobiodiversität beitragen. Folglich lautet diese These, dass die Erkenntnis von Komplexität der Interaktion innerhalb der Agrobiodiversität durch ökologische sowie sozialökonomische Netzwerkanalyse und -modellierung zur gemeinsamen Entscheidungsfindung führen kann. Denn der Dialog für Aufbau des Vertrauens ist unter verschiedenen Interessentengruppen eine wesentliche Dimension der Agrobiodiversität, der die Vernetzung der beteiligten Parteien erfordert. Die kollaborativen Modellierungsansätze nach Beschlüssen der Europäischen Union für grünes und digitales Europa können in der zukünftigen Forschung vielversprechende Perspektive der Entwicklung für Biodiversität basierender Präzisionslandwirtschaft entfalten.

## 8 Literaturverzeichnis

- [AAFC 2018] Agriculture and Agri-Food Canada (AAFC), 2018. Agricultural Clean Technology Program. <http://www.agr.gc.ca/eng/programs-and-services/agricultural-cleantechnology-program/?id=1521202868490>.
- [agforward 2016] Article title AGFORWARD online available> <https://www.agforward.eu/index.php/de/news-reader/id-30-november-1-december-2016.html> Website title Agforward Date accessed January 25, 2021
- [Agroforstkampagne] online available: <http://www.agroforstkampagne.net/interessante-projekte>
- [R & D Projekt 2008-2011] online available: <https://www.landschaftsentwicklung.wzw.tum.de/en/research/past-projects/agroforestry/>
- [Ahmadi *et al.* 2020] Ahmadi, A., Nardi, L., Chebrolu, N., Stachniss, C. (2020, May). Visual servoing-based navigation for monitoring row-crop fields. In 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (pp. 4920-4926). IEEE.
- [Aizen & Harder 2009] Aizen MA, Harder LD. The global stock of domesticated honey bees is growing slower than agricultural demand for pollination. *Current Biology* 2009;19:1–4.
- [Akinnifesi *et al.* 2010] Akinnifesi, F.K., Ajayi, O.C., Sileshi, G., Chirwa, P.W., Chianu, J., 2010. Fertiliser trees for sustainable food security in the maize-based production systems of East and Southern Africa. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 30, 615–629.
- [Albrecht *et al.* 2016] Albrecht, H., Cambecèdes, J., Lang, M. & Wagner, M. 2016. Management options for the conservation of rare arable plants in Europe. *Botany Letters* 163: 389–415.
- [Algandabya & El-Darierb 2018] M.M. Algandabya, S.M. El-Darierb, Management of the noxious weed; *Medicago polymorpha* L. via allelopathy of some medicinal plants from Taif region, Saudi Arabia, *Saudi J. Biol. Sci.* 25 (7) (2018) 1339e1347. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.02.013>.
- [Altieri 1994] Altieri MA. 1994. Biodiversity and pest management in agroecosystems. New York: Haworth Press.
- [Altieri 1999] Altieri MA. 1999. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 74: 19-31.
- [Altieri 2004] Altieri MA (2004) Linking ecologists and traditional farmers in the search for sustainable agriculture. *Front Ecol Environ* 2(1):35–42
- [Armitage *et al.* 2009] Armitage DR, Plummer R, Berkes F, Arthur RI, Charles AT, Davidson-Hunt IJ, Diduck AP, Doubleday NC, Johnson DS, Marschke M (2009) Adaptive co-management for social–ecological complexity. *Front Ecol Environ* 7(2):95–102
- [Bah *et al.* 2018] Bah, M. D., Hafiane, A., & Canals, R. (2018). Deep learning with unsupervised data labeling for weed detection in line crops in UAV images. *Remote sensing*, 10(11), 1690.
- [Balvanera *et al.* 2006] Balvanera, P. *et al.* Quantifying the evidence for biodiversity effects on ecosystem functioning and services. *Ecol. Lett.* 9, 1146–1156 (2006).
- [Bandiera & Rasul 2006] Bandiera O, Rasul I (2006) Social networks and technology adoption in northern Mozambique. *Econ J* 116(514):869–902. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0297.2006.01115.x>



- [Barnes *et al.* 2016] Barnes M, Bodin Ö, Guerrero A, McAllister R, Alexander S, Robins G (2017) The social structural foundations of adaptation and transformation in social–ecological systems. *Ecol Soc* 22(4):16. Online available: <https://doi.org/10.5751/ES-09769-220416>
- [Barraquand & Martinet 2011] Barraquand, F., Martinet, V., 2011. Biological conservation in dynamic agricultural landscapes: effectiveness of public policies and trade-offs with agricultural production. *Ecol. Econ.* 70, 910–920.
- [Bazile 2006] Bazile D (2006) State-farmer partnerships for seed diversity in Mali. IIED, Londres
- [Bechar & Vigneault 2016] Bechar, A., Vigneault, C. 2016. Agricultural robots for field operations: Concepts and components. *Biosyst. Eng.* 2016, 149, 94–111.
- [Bellard *et al.* 2012] Bellard, C., Bertelsmeier, C., Leadley, P., Thuiller, W., Courchamp, F., 2012. Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecol. Lett.* 15, 365–377.
- [Benos *et al.* 2021] Benos, L., Tagarakis, A. C., Dolias, G., Berruto, R., Kateris, D., & Bochtis, D. (2021). Machine Learning in Agriculture: A Comprehensive Updated Review. *Sensors*, 21(11), 3758.
- [Bergmeier 2006] Bergmeier E. 2006. The diversity of segetalweeds in Crete (Greece) at species and community levels. *Annali di Botanica* 6:53–64.
- [Berry *et al.* 2005] Berry, J.K., Delgado, J.A., Pierce, F.J., Khosla, R., 2005. Applying spatial analysis for precision conservation across the landscape. *J. Soil Water Conserv.* 60 (6), 363–370.
- [Betzek *et al.* 2017] Betzek, N.M., Godoy De Souza, E., Leones Bazzi, C., Sobjak, R., Bier, V.A., Mercante, E., 2017. Interpolation methods for thematic maps of soybean yield and soil chemical attributes. *Semina Ciên. Agrárias* 38 (2).
- [Biesmeijer *et al.* 2006] Biesmeijer JC, Roberts SPM, Reemer M, Ohlemuller R, Edwards M, Peeters T, et al. Parallel declines in pollinators and insect-pollinated plants in Britain and the Netherlands. *Science* 2006;313:351–4.
- [Bodin 2017] Bodin Ö (2017) Collaborative environmental governance: achieving collective action in social-ecological systems. *Science* 357:eaan1115
- [Bodin & Crona 2009] Bodin Ö (2017) Collaborative environmental governance: achieving collective action in social-ecological systems. *Science* 357:eaan1115
- [Borin *et al.* 2005] Borin M, Vianello M, Morari F, Zanin G (2005) Effectiveness of buffer strips in removing pollutants in runoff from a cultivated field in North-East Italy. *Agric Ecosyst Environ* 105:101–114.
- [Boyette *et al.* 2018] C.D. Boyette, R.E. Hoagland, K.C. Stetina, Bioherbicide enhancement and host range expansion of a mycoherbicide fungus via formulation approaches, *Biocontrol Sci. Technol.* 28 (3) (2018) 307e315. <https://doi.org/10.1080/09583157.2018.1445199>.
- [Brandes *et al.* 2016] Brandes, E., McNunn, G.S., Schulte, L.A., Bonner, I.J., Muth, D.J., Babcock, B.A., ... Heaton, E.A., 2016. Subfield profitability analysis reveals an economic case for cropland diversification. *Environ. Res. Lett.* 11 (1), 014009.
- [Bretagnolle 2018] Bretagnolle V. Biodiversity, ecosystem services and citizen science: the value of long term monitoring in farmland landscapes for sustainable agriculture. *Sci. Total Environ.* 2018;627:822–834
- [Brockhaus 2021] Online available: <https://brockhaus.de/ecs/enzy/article/biodiversität> Biodiversität - Enzyklopädie - Brockhaus.de 2021 Deutsch

- [Bruinsma 2009] Bruinsma, J., 2009. The Resource Outlook to 2050: by How Much Do Land, Water and Crop Yields Need to Increase by 2050? Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy
- [Burger *et al.* 2012] Burger, J.R., Allen, C.D., Brown, J.H., Burnside, W.R., Davidson, A.D., Fristoe, T.S., Hamilton, M.J., Mercado-Silva, N., Nekola, J.C., Okie, J.G., Zuo, W., 2012. The macroecology of sustainability. *PLoS Biol.* 10 (6), e1001345.
- [Butchart *et al.* 2010] Butchart, S.H.M., Walpole, M., Collen, B., van Strien, A., Scharlemann, J.P.W., Almond, R.E.A., Baillie, J.E.M., Bomhard, B., Brown, C., Bruno, J., Carpenter, K.E., Carr, G.M., Chanson, J., Chenery, A.M., Csirke, J., Davidson, N.C., Dentener, F., Foster, M., Galli, A., Galloway, J.N., Genovesi, P., Gregory, R.D., Hockings, M., Kapos, V., Lamarque, J.F., Leverington, F., Loh, J., McGeoch, M.A., McRae, L., Minasyan, A., Morcillo, M.H., Oldfield, T.E.E., Pauly, D., Quader, S., Revenga, C., Sauer, J.R., Skolnik, B., Spear, D., Stanwell-Smith, D., Stuart, S.N., Symes, A., Tierney, M., Tyrrell, T.D., Vie, J.C., Watson, R., 2010. Global biodiversity: indicators of recent declines. *Science* 328, 1164–1168.
- [Busvine 1993] Busvine, J. R. 1993. Disease Transmission by Insects: Its Discovery and 90 Years of Effort to Prevent It. Springer-Verlag, Berlin. 361 pp.
- [Büchs 2012] Büchs, w. 2012. Bewertung der Evertebraten-Biodiversität landwirtschaftlicher Nutzflächen – Möglichkeiten und Grenzen der Nutzung biotischer Elemente als Indikatoren für Biodiversität der Agrarlandschaft 10.5073/JKA.2012.436.006Corpus ID: 83510557
- [Bybee-Finley & Ryan 2018] Bybee-Finley, K.A.; Ryan, M. Advancing Intercropping Research and Practices in Industrialized Agricultural Landscapes. *Agriculture* 2018, 8, 80.
- [Cameron *et al.* 2011] Cameron SA, Lozier JD, Strange JP, Koch JP, Cordes N, Solter LF, et al. Patterns of widespread decline in North American bumble bees. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 2011;108:662–7.
- [Capmourteres *et al.* 2018] Virginia Capmourteres, Justin Adams, Aaron Berg, Evan Fraser, Clarence Swanton, Madhur Anand Precision conservation meets precision agriculture: A case study from southern Ontario November 2018, Pages 176-185
- [Candiago *et al.* 2015] Candiago, S., Remondino, F., De Giglio, M., Dubbini, M., & Gattelli, M. (2015). Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images. *Remote sensing*, 7(4), 4026-4047.
- [Cardinale *et al.* 2012] Cardinale, B., Duffy, J.E., Gonzalez, A., Hooper, D., Perrings, C., Venail, P., Narwani, A., Mace, G., Tilman, D., Wardle, D., Kinzig, A., Daily, G., Loreau, M., Grace, J., Larigauderie, A., Srivastava, D., Naeem, S., 2012. Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature* 486, 59-67
- [Carson 1963] Carson, R., 1963. Silent Spring. Hamish Hamilton, London.
- [Carton *et al.* 2020] Carton, N.; Naudin, C.; Piva, G.; Corre-Hellou, G. Intercropping Winter Lupin and Triticale Increases Weed Suppression and Total Yield. *Agriculture* 2020, 10, 316.
- [Cassman 1999] Cassman, K.G., 1999. Ecological intensification of cereal production systems: yield potential, soil quality, and precision agriculture. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 86, 5952–5959.
- [NSB 2007] Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt vom Bundeskabinett am 7. November 2007 beschlossen online available:<https://www.cbd.int/doc/world/de/de-nbsap-01-de.pdf>.

- [CBINSIGHTS 2019] CBINSIGHTS. 2019. Ag Tech Deal Activity More Than Triples. Available online: <https://www.cbinsights.com/research/agriculture-farm-tech-startup-funding-trends/> (accessed on 18 February 2019).
- [Chalmin & Mastel 2009] Chalmin A, Mastel K (2009) Moderne Agroforstsysteme in Deutschland—Aspekte der landwirtschaftlichen Produktion von Agroforstsystemen. In: Spiecker H et al. (ed) Neue Optionen für eine nachhaltige Landnutzung. Schlussbericht des Projektes agroforst. Onlin available: <http://www.agroforst.uni-freiburg.de/download/BMBF0330621-24-11-09.pdf>
- [Chable *et al.* 2020] Chable V, Nuijten E, Costanzo A, Goldringer I, Bocci R, Oehen B, Rey F, Fasoula D, Feher J, Keskitalo M, Koller B, Omirou M, Mendes- Moreira P, van Frank G, Naino J, Thomas M, Rossi A (2020) Embedding cultivated diversity in society for agro-ecological transition. *Sustainability* 12(3):784
- [Chapin *et al.* 1997] Chapin, F.S. III, Walker, B.H., Hobbs, R.J., Hooper, D.U., Lawton, J.H., Sala, O.E. Tilman, D. (1997) Biotic control over the functioning of ecosystems. *Science* 277, 500–504.
- [Chapman *et al.* 2005] Chapman, A. D., Muñoz, M. E. S., and Koch, I., 2005. Environmental information: placing biodiversity phenomena in an ecological and environmental context. *Biodiversity Informatics* 2, 24-41.
- [Cherney *et al.* 2020] Cherney, J. H., Smith, S. R., Sheaffer, C. C., Cherney, D. J. (2020). Nutritive value and yield of reduced-lignin alfalfa cultivars in monoculture and in binary mixtures with perennial grass. *Agronomy Journal*, 112(1), 352-367.
- [Cock *et al.* 2012] Cock, M. J. W., J. C. Biesmeijer, R. J. C. Cannon, P. J. Gerard, D. Gillespie, J. J. Jiménez, P. M. Lavelle and S. K. Raina. 2012. The positive contribution of invertebrates to sustainable agriculture and food security. *CAB Reviews* 7: 1-27.
- [Coolsaet 2015] Coolsaet B (2015) Transformative participation in agrobiodiversity governance: making the case for an environmental justice approach. *J Agric Environ Ethics* 28(6):1089–1104
- [Clements *et al.* 2016] Clements, H.S., Baum, J., Cumming, G.S., 2016. Money and motives: an organizational ecology perspective on private land conservation. *Biol. Conserv.* 197, 108–115.
- [Clough *et al.* 2011] Clough, Y., Barkmann, J., Juhrendt, J., Kessler, M., Wanger, T.C., Anshary, A., Buchori, D., Cizussa, D., Darras, K., Dwi, D.P., Erasmi, S., Pitopang, R., Schmidt, C., Schulze, C.H., Seidel, D., Steffan-Dewenter, I., Stenchly, K., Vidal, S., Weist, M., Wielgoss, A.C., Tschardt, T., 2011. Combining high biodiversity with high yields in tropical agroforests. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 108, 8311–8316.
- [Coops & Tooke 2017] Coops N C, Tooke T R 2017 Introduction to Remote Sensing. In: Gergel S., Turner M. (eds) *Learning Landscape Ecology*. Springer New York NY
- [Corre-Hellou 2011] Corre-Hellou, G.; Dibet, A.; Hauggaard-Nielsen, H.; Crozat, Y.; Gooding, M.; Ambus, P.; Dahmann, C.; von Fragstein, P.; Pristeri, A.; Monti, M.; et al. The competitive ability of pea–barley intercrops against weeds and the interactions with crop productivity and soil N availability. *Field Crop. Res.* 2011, 122, 264–272.
- [Creissen *et al.* 2013] Creissen, H. E., Jorgensen, T. H., & Brown, J. K. (2013). Stabilization of yield in plant genotype mixtures through compensation rather than complementation. *Annals of botany*, 112(7), 1439-1447.
- [Crepet 1979] Crepet, W. L. 1979. Insect pollination: a paleontological perspective. *BioScience* 29:102-108.
- [Crepet 1983] Crepet, W. L. 1983. The role of insect pollination in the evolution of angiosperms. Pp. 31-50. In L. Real (ed). *Pollination Biology*. Academic Press, New York.

- [Cunningham *et al.* 2013] Saul A. Cunningham, Simon J. Attwood, Kamal S. Bawa, Tim G. Benton, Linda M. Broadhurst, Raphael K. Didham, Sue McIntyre, Ivette Perfecto, Michael J. Samways, Teja Tscharntke, John Vandermeer, Marc-André Villard, Andrew G. Young, David B. Lindenmayer To close the yield-gap while saving biodiversity will require multiple locally relevant strategies Volume 173, 1 July 2013, Pages 20-27
- [Curtis *et al.* 2018] Curtis, P.G., Slay, C.M., Harris, N.L., Tyukavina, A., Hansen, M.C., 2018. Classifying drivers of global forest loss. *Science* 361 (6407), 1108–1111
- [Daily 1997] Daily, G.C., 1997. *Natures Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Island Press, Washington, DC.
- [DBU 2010] DBU (2010) Multifunktionale Bewertung von Agroforstsystemen. DBU Schlussbericht. online available: <http://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-25786.pdf>. Accessed 25 July 2012.
- [Dainese *et al.* 2019] Dainese M, Martin EA, Aizen MA, Albrecht M, Bartomeus I, Bommarco R, et al. 2019. A global synthesis reveals biodiversity-mediated benefits for crop production. *Science Advances* 5(10):eaax0121.
- [DeBach 1974] DeBach, P. 1974. *Biological Control by Natural Enemies*. Cambridge University Press, London. 323 pp.
- [Demeulenaere *et al.* 2017] Demeulenaere É, Rivière P, Hyacinthe A, Baltassat R, Baltazar S, Gascuel JS, Lacanette J, Montaz H, Pin S, Ranke O (2017) Participatory plant breeding and scale issues. On a collaboration between farmer plant breeders and field geneticists. *Nat Sci Soc* 25(4):336–346
- [DeFAF] Deutscher Verband für Agroforst online Available: <https://agroforst-info.de/arten/baeume-und-acker/>
- [Dimitriadis & Goumopoulos 2008] Dimitriadis, S., Goumopoulos, C., (2008) Applying Machine Learning to Extract New Knowledge in Precision Agriculture Applications, *Proceedings of the 2008 Panhellenic Conference on Informatics* August, 100-104.
- [Ditzler *et al.* 2021] Ditzler, L., van Apeldoorn, D. F., Schulte, R. P., Tittone, P., Rossing, W. A. (2021). Redefining the field to mobilize three-dimensional diversity and ecosystem services on the arable farm. *European Journal of Agronomy*, 122, 126197.
- [Doak *et al.* 1998] Doak, D. F. et al. The statistical inevitability of stability-diversity relationships in community ecology. *Am. Nat.* 151, 264–276 (1998).
- [Döring *et al.* 2013] Döring, T. F., Baddeley, J. A., Brown, R., Collins, R., Crowley, O., Cuttle, S. P., ... Wolfe, M. S. (2013). Using legume-based mixtures to enhance the nitrogen use efficiency and economic viability of cropping systems-Final report (LK09106/HGCA3447).
- [Duffy *et al.* 2007] Duffy, J. E. et al. The functional role of biodiversity in ecosystems: Incorporating trophic complexity. *Ecol. Lett.* 10, 522–538 (2007).
- [Durán *et al.* 2014] Durán, A.P., Duffy, J.P., Gaston, K.J., 2014. Exclusion of agricultural lands in spatial conservation prioritization strategies: consequences for biodiversity and ecosystem service representation. *Proc. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* 281 (1792), 20141529.
- [Duru *et al.* 2015b] Duru M, Therond O, Martin G, Martin-Clouaire R, Magne MA, Justes E, Journet EP, Aubertot JN, Savary S, Bergez JE (2015b) How to implement biodiversity-based agriculture to enhance ecosystem services: a review. *Agron Sustain Dev* 35(4):1259–1281. Online available: <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0306-1>
- [Ehrlich & Ehrlich 1992] Ehrlich, P.R. & Ehrlich, A.H. (1992) The value of biodiversity. *Ambio* 21, 219–226.

- [Effah *et al.* 2019] Effah, E., Holopainen, J. K., McCormick, A. C. (2019). Potential roles of volatile organic compounds in plant competition. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 38, 58–63.
- [Ellenberg & Leuschner 2010] Ellenberg, H.; Leuschner, C. *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen*. In *Ökologischer, Dynamischer und Historischer Sicht*; UTB: Stuttgart, Germany, 2010; p. 1357.
- [Ellis *et al.* 2010] Ellis, E.C., Goldewijk, K.K., Siebert, S., Lightman, D., Ramankutty, N., 2010. Anthropogenic transformation of the biomes, 1700 to 2000. *Global Ecol. Biogeogr.* 19, 589–606.
- [Elsalahy *et al.* 2020] Elsalahy, H. H., Bellingrath-Kimura, S. D., Roß, C. L., Kautz, T., Döring, T. F. (2020). Crop Resilience to Drought With and Without Response Diversity. *Frontiers in Plant Science*, 11, 721.
- [Elsalahy *et al.* 2021] Elsalahy, H., Bellingrath-Kimura, S., Kautz, T., Döring, T. (2021). Effects of mixing two legume species at seedling stage under different environmental conditions. *PeerJ*, 9, e10615.
- [Erb *et al.* 2009] Erb, K., Krausmann, F., Gaube, V., Gingrich, S., Bondeau, A., Fischer-Kowalski, M., Haberl, H., 2009. Analyzing the global human appropriation of net primary production – processes, trajectories, implications. An introduction. *Ecol. Econ.* 69, 250–259.
- [Estes *et al.* 2011] Estes, J. A. *et al.* Trophic downgrading of planet earth. *Science* 333, 301–306 (2011).
- [FAO 2004] FAO (Food and Agriculture Organization), 2004. *The Ethics of Sustainable Agricultural Intensification*. FAO Ethics Series, vol. 3. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- [Fanfarillo *et al.* 2019] Fanfarillo E, Scoppola A, Lososová Z, Abbate G. 2019a. Segetal plant communities of traditional agroecosystems: a phytosociological survey in central Italy. *Phytocoenologia* 49(2):165–183.
- [Fenesi *et al.* 2020] Fenesi, A., Kelemen, K., Sándor, D., Ruprecht, E. (2020). Influential neighbours: Seeds of dominant species affect the germination of common grassland species. *Journal of Vegetation Science*, 31(6), 1028–1038.
- [Fincheira *et al.* 2017] Fincheira, P., Parada, M., Quiroz, A. (2017). Volatile organic compounds stimulate plant growing and seed germination of *Lactuca sativa*. *Journal of soil science and plant nutrition*, 17(4), 853–867.
- [Florin *et al.* 2009] Florin, M.J., McBratney, A.B., Whelan, B.M., 2009. Quantification and comparison of wheat yield variation across space and time. *European Journal of Agronomy*, 30, 212–219.
- [Folke *et al.* 2005] Folke C, Hahn T, Olsson P, Norberg J (2005) Adaptive governance of social-ecological systems. *Annu Rev Environ Resour* 30(1):441–73
- [Foley *et al.* 2011] Foley, J.A., Ramankutty, N., Brauman, K.A., Cassidy, E.S., Gerber, J.S., Johnston, M., Mueller, N.D., O'Connell, C., Ray, D.K., West, P.C., Balzer, C., Bennett, E.M., Carpenter, S.R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., Tilman, D., Zaks, D.P.M., 2011. Solutions for a cultivated planet. *Nature* 478, 337–342.
- [Foresight 2011] Foresight, 2011. *The Future of Food and Farming: Challenges and Choices for Global Sustainability*. The Government Office for Science, London.
- [Fox 1957] Fox, C. J. S. 1957. Remarks on influence of insects on the floristic composition of grassland. *Rapport de la Societe de Quebec pour la Protection des Plantes* 39: 49–51.
- [Fraser 2018] Fraser, A., 2018. Land grab/data grab: precision agriculture and its new horizons. *J. Peasant Stud.* 1–20.

- [Frazier *et al.* 1997] Frazier, B.E., C.S. Walters and E.M. Perry. 1997. Role of remote sensing in site-specific management. In: The State of Site-Specific Management for Agriculture, pp 149-160. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI.
- [Fried *et al.* 2009] Fried G, Petit S, Dessaint F, Reboud X. 2009. Arable weed decline in Northern France: Crop edges as refugia for weed conservation? *Biol Conserv* 142: 238–243.
- [Galil 1977] Galil, J. 1977. Fig biology. *Endeavour* (n. s.) 1 (2): 52-56.
- [Gandorfer *et al.* 2017] Gandorfer, M., Schleicher, S., Heuser, S., Pfeiffer J., und Demmel, M., (2017) Landwirtschaft 4.0 – Digitalisierung und ihre Herausforderungen, In *Ackerbau-technische Lösungen für die Zukunft*, 9, 2017.
- [Gaston & Spicer 2013] Gaston, Kevin J. and Spicer, John I. (22 April 2013). *Biodiversity: An Introduction*. John Wiley & Sons
- [Gevers *et al.* 2019] Gevers C, van Rijswijk HF, Swart J (2019) Peasant seeds in France: fostering a more resilient agriculture. *Sustainability* 11(11):3014. <https://doi.org/10.3390/su11113014>
- [Getzin *et al.* 2012] Getzin, S., Wiegand, K. and Schöning, I., 2012. Assessing biodiversity in forests using very high-resolution images and unmanned aerial vehicles. *Methods in Ecology and Evolution*, 3(2), pp.397- 404.
- [Gnanavel & Nataraja 2014] I. Gnanavel, S.K. Natarajan, Eco-friendly weed control options for sustainable agriculture, *Sci. Int.* 35 (3) (2014) 172e183. <https://doi.org/10.17311/sciintl.2015.37.47>.
- [Godfray *et al.* 2010] Godfray, H.C.J., Beddington, J.R., Crute, I.R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J.F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S.M., Toulmin, C., 2010. Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *Science* 327, 812-818.
- [Goldberg & Landa 1991] Goldberg, D. E., & Landa, K. (1991). Competitive effect and response: hierarchies and correlated traits in the early stages of competition. *The Journal of Ecology*, 1013-1030.
- [Gonzalez & Loreau 2009] Gonzalez, A. & Loreau, M. The causes and consequences of compensatory dynamics in ecological communities. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 40, 393–414 (2009).
- [Gonzalez *et al.* 2019] J.L. Gonzalez-Andujar, M.J. Aguilera, A.S. Davis, L. Navarrete, Disentangling weed diversity and weather impacts on long-term crop productivity in a wheatlegume rotation, *Field Crop. Res.* 232 (2019) 24e29. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.12.005>.
- [Goodbody *et al.* 2017] Goodbody, T.R., Coops, N.C., Marshall, P.L., Tompalski, P. and Crawford, P., 2017. Unmanned aerial systems for precision forest inventory purposes: A review and case study. *The Forestry Chronicle*, 93(1), pp.71-81.
- [Gottwald & Stein-Bachinger] Gottwald, F., Stein-Bachinger, K. Monitoring und Evaluation der Segetalflora. Berichte aus dem Projekt Landwirtschaft für Artenvielfalt, Zwischenergebnisse Segetalflora 2016. Available online: <http://www.landwirtschaft-artenvielfalt.de> (accessed on 19 September 2019).
- [Grand View Research 2019] Grand View Research. 2019. Precision Farming Market Analysis. Estimates and Trend Analysis; Grand View Research Inc.: San Francisco, CA, USA, 2019; pp. 1–58
- [Green *et al.* 2005] Green, R.E., Cornell, S.J., Scharlemann, J.P., Balmford, A., 2005. Farming and the fate of wild nature. *Science* 307 (5709), 550–555.
- [Grimaldi & Engel 2005] Grimaldi, D. and M. S. Engel. 2005. *Evolution of the Insects*. Cambridge University Press, New York. 755 pp.

- [Groot *et al.* 2020] Groot, S. P. (2020). Seed Science and Technology. Volume 48 Issue 1 (2020). Seed Science and Technology, 48(1), 133-142.
- [Gurevitch *et al.* 2018] Gurevitch, J., Koricheva, J., Nakagawa, S. Stewart, G. (2018). Metaanalysis and the science of research synthesis. *Nature*, 555, 175–182.
- [Hammond 1992] Hammond, P. 1992. Species inventory. pp. 17-39. In B. Groombridge (ed). *Global Biodiversity. Status of the Earth's Living Resources. A Report Compiled by the World Conservation Monitoring Centre.* Chapman and Hall, London.
- [Härtel 2019] Härtel, I. (2019) Agrar-Digitalrecht für eine nachhaltige Landwirtschaft 4.0 . NuR 41, 577–586.
- [Hauck *et al.* 2016] Hauck J, Schmidt J, Werner A (2016) Using social network analysis to identify key stakeholders in agricultural biodiversity governance and related land-use decisions at regional and local level. *Ecol Soc* 21(2):49. <https://doi.org/10.5751/ES-08596-210251>
- [Heaphy *et al.* 2017] Heaphy, M., Watt, M.S., Dash, J.P. and Pearse, G.D., 2017. UAVs for data collection-plugging the gap. *New Zealand Journal of Forestry*, 62(1), pp.23-30.
- [Herrero *et al.* 2010] Herrero, M., Thornton, P.K., Notenbaert, A.M., Wood, S., Msangi, S., Freeman, H.A., Bossio, D., Dixon, J., Peters, M., van de Steeg, J., Lynam, J., Parthasarathy Rao, P., Macmillan, S., Gerard, B., McDermott, J., Seré, C., Rosegrant, M., 2010. Smart investments in sustainable food production: revisiting mixed crop-livestock systems. *Science* 327, 822-825.
- [Heywood *et al.* 1995] Heywood, V.H., Baste, I. and Gardner, K.A. (lead authors). 1995. Introduction, in Heywood, V.H., Watson, R.T. and Baste, I. (eds.). *Global biodiversity assessment.* Cambridge University Press. Cambridge. Pp. 1–19.
- [Hodgson *et al.* 2010] Hodgson, J.A., Kunin, W.E., Thomas, C.D., Benton, T.G., Gabriel, D., 2010. Comparing organic farming and land sparing: optimizing yield and butterfly populations at a landscape scale. *Ecol. Lett.* 13, 1358–1367.
- [Hofmeister & Garve 2006] Hofmeister, H. and E. Garve (2006): *Lebensraum Acker*. Reprint der 2. Auflage. - Verlag Kessel, Remagen.
- [Hooper *et al.* 2005] Hooper, D.U., Chapin, F.S., Ewel, J.J., Hector, A., Inchausti, P., Lavorel, S., Lawton, J.H., Lodge, D.M., Loreau, M., Naeem, S., Schmid, B., Setälä, H., Symstad, A.J., Vandermeer, J., Wardle, D.A., 2005. Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge. *Ecol. Monogr.* 75, 3-35.
- [Huete *et al.* 2000] Huete, A.; Didan K., Miura T., Rodriguez E. P., Gao X. & Ferreria L. G. (2000). "Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices". *Remote Sensing of Environment*. 83: 195–213.
- [Huston 1997] Huston, M. A. Hidden treatments in ecological experiments: Re-evaluating the ecosystem function of biodiversity. *Oecologia* 110, 449–460 (1997).
- [Ikeh *et al.* 2019] A.O. Ikeh, E.I. Udoh, A.C. Opara, Effect of mulching on weed, fruit yield and economic returns of garden egg (*Solanum melongena*) in Okigwe southeastern Nigeria, *J. Res. Weed Sci.* 2 (1) (2019) 52e64. <https://dx.doi.org/10.26655/jrweedsci.2019.1.5>.
- [Isaac *et al.* 2018] Isaac ME, Matous P (2017) Social network ties predict land use diversity and land use change: a case study in Ghana. *Reg Environ Chang* 17(16):1823–1833

- [Jannoura *et al.* 2015] Jannoura, R., Brinkmann, K., Uteau, D., Bruns, C., & Joergensen, R. G. (2015). Monitoring of crop biomass using true colour aerial photographs taken from a remote controlled hexacopter. *Biosystems Engineering*, 129, 341-351.
- [Kangalawe & Noe 2012] Kangalawe, R.Y.M., Noe, C., 2012. Biodiversity conservation and poverty alleviation in Namtumbo District, Tanzania. *Agric. Ecoyst. Environ.* 162, 90–100
- [Kevan 1999] Kevan PG. Pollinators as bioindicators of the state of the environment: species, activity and diversity. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 1999;74:373–93.
- [Kleijn & Raemakers 2008] Kleijn D, Raemakers I. A retrospective analysis of pollen host plant use by stable and declining bumblebee species. *Ecology* 2008;89:1811–23.
- [Köhler 1979] Köhler, E. Moderne Landwirtschaft und Herbizide/Modern Agriculture and Herbicides. *Zeitschrift für Naturforschung C* 1979, 34, 895–899.
- [Korduan *et al.* 2004] Korduan, P., Bill, R., Böling, S., 2004. An Interoperable Geodata Infrastructure for Precision Agriculture. *Agile Conference on Geographic Information Science Proceedings* 7. Greece. 747-751.
- [Kovacs-Hostyánszki *et al.* 2017] Kovács-Hostyánszki, A., Espíndola, A., Vanbergen, A. J., Settele, J., Kremen, C., Dicks, L. V. (2017). Ecological intensification to mitigate impacts of conventional intensive land use on pollinators and pollination. *Ecology Letters*, 20(5), 673-689.
- [Klein *et al.* 2007] Klein AM, Vaissiere BE, Cane J, Steffan-Dewenter I, Cunningham SA, Kremen C, et al. Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 2007;274:303–13.
- [Kleijn *et al.* 2009] Kleijn, D., Kohler, F., Baldi, A., Batary, P., Concepcion, E.D., Clough, Y., Diaz, M., Gabriel, D., Holzschuh, A., Knop, E., Kovacs, A., Marshall, E.J.P., Tscharntke, T., Verhulst, J., 2009. On the relationship between farmland biodiversity and land-use intensity in Europe. *Proc. R. Soc. B* 276, 903–909.
- [Krebs *et al.* 2009] Krebs, J.R., Wilson, J.D., Bradbury, R.B., Siriwardena, G.M., 1999. The second silent spring? *Nature* 400, 611–612.
- [Kremen *et al.* 2015] Kremen, C., 2015. Reframing the land-sparing/land-sharing debate for biodiversity conservation. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1355 (1), 52–76.
- [Kugbe *et al.* 2018] Kugbe, X.J.; Yaro, R.N.; Soyel, J.K.; Kofi, E.S.; Ghaney, P. Role of Intercropping in Modern Agriculture and Sustainability: A Review. *Br. J. Sci.* 2018, 16, 67–75.
- [Kunin & Lawton 1996] Kunin, W.E. & Lawton, J.H. (1996) Does biodiversity matter? Evaluating the case for conserving species. In: *Biodiversity: A Biology of Numbers and Difference* (ed. K.J. Gaston), pp. 283–308. Blackwell Science, Oxford.
- [Lamborelle & Fernandez Alvarez 2019] Lamborelle, A., Fernández Álvarez, L. 2019. Farming 4.0: The Future of Agriculture? Available online: <https://www.euractiv.com/section/agriculture-food/infographic/farming-4-0-the-future-of-agriculture/> (accessed on 21 November 2019).
- [Leverett *et al.* 2018] Leverett, L. D., Schieder IV, G. F., Donohue, K. (2018). The fitness benefits of germinating later than neighbors. *American Journal of Botany*, 105(1), 20-30.
- [Leach 1940] Leach, J. G. 1940. *Insect Transmission of Plant Diseases*. McGraw-Hill Book Co., New York. 615 pp.



- [Lemerle *et al.* 2014] D. Lemerle, D.J. Luckett, P. Lockley, E. Koetz, H. Wu, Competitive ability of Australian canola (*Brassica napus*) genotypes for weed management, *Crop Pasture Sci.* 65 (12) (2014) 1300e1310. <https://doi.org/10.1071/CP14125>.
- [Leuschner *et al.* 2015] Dr. Stefan Meyer und Prof. Dr. Christoph Leuschner Georg-August-Universität Göttingen Albrecht-von-Haller-Institut für Pflanzenwissenschaften Abteilung Ökologie und Ökosystemforschung Untere Karspüle 2, 37073 Göttingen Online available: <http://www.uni-goettingen.de/de/sh/71395.html>
- [Liakos *et al.* 2018] Liakos, K.G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., Bochtis, I.D., (2018) Machine Learning in Agriculture: A Review, *Sensors*, 18, 267
- [Liebmann & Dyck 1993] Liebmann, M.; Dyck, E. Crop Rotation and Intercropping Strategies for Weed Management. *Ecol. Appl.* 1993, 3, 92–122. [CrossRef] [PubMed]
- [Liebman *et al.* 2016] M. Liebman, B. Baraibar, Y. Buckley, D. Childs, S. Christensen, R. Cousens, H. Eizenberg, S. Heijting, D. Loddio, A. Merotto, M. Renton, M. Riemens, Ecologically sustainable weed management: how do we get from proof-of-concept to adoption? *Ecol. Appl.* 26 (5)(2016) 1352e1369. <https://doi.org/10.1002/15-0995>.
- [Lisein *et al.* 2013] Lisein, J., Pierrot-Deseilligny, M., Bonnet, S. and Lejeune, P., 2013. A photogrammetric workflow for the creation of a forest canopy height model from small unmanned aerial system imagery. *Forests*, 4(4), pp.922-944.
- [Lithourgidis *et al.* 2011] Lithourgidis, A.S.; Dordas, C.A.; Damalas, C.A.; Vlachostergios, D.N. Annual intercrops: An alternative pathway for sustainable agriculture. *Aust. J. Crop Sci.* 2011, 5, 396–410.
- [Lobell *et al.* 2009] Lobell, D.B., Cassman, K.G., Field, C.B., 2009. Crop yield gaps: their importance, magnitudes, and causes. *Annu. Crop Yield Gaps: Their Importance, Magnitudes, and Causes Rev. Environ. Resour.* 334, 1–26.
- [Loreau & Hector 2001] Loreau, M. & Hector, A. Partitioning selection and complementarity in biodiversity experiments. *Nature* 412, 72–76 (2001).
- [López-Granados *et al.* 2016] López-Granados, F., Torres-Sánchez, J., Serrano-Pérez, A., de Castro, A. I., Mesas-Carrascosa, F. J., & Pena, J. M. (2016). Early season weed mapping in sunflower using UAV technology: variability of herbicide treatment maps against weed thresholds. *Precision Agriculture*, 17(2), 183-199.
- [Luhmer *et al.* 2021] Luhmer, K., Blum, H., Kraska, T., Döring, T., Pude, R. (2021). Poppy (*Papaver somniferum* L.) Intercropping with Spring Barley and with White Clover: Benefits and Competitive Effects. *Agronomy*, 11(5), 948.
- [Lutman *et al.* 2013] P.J.W. Lutman, S.R. Moss, S. Cook, S.J. Welham, A review of the effects of crop agronomy on the management of *Alopecurus myosuroides*, *Weed Res.* 53 (5) (2013) 299e313. <https://doi.org/10.1111/wre.12024>.
- [Mahal & Callaway 1992] Mahal, B.E. Callaway, R.M. (1992). Root Communication mechanisms and intracommunity distributions of 2 Mojave desert shrubs. *Ecology*, 73, 2145–2151.
- [Mallik 2008] Mallik A.U. (2008) Allelopathy: Advances, Challenges and Opportunities. In: Zeng R.S., Mallik A.U., Luo S.M. (eds) *Allelopathy in Sustainable Agriculture and Forestry*. Springer, New York, NY. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-77337-7-2>.
- [Manfreda *et al.* 2018] Manfreda, S., McCabe, M. F., Miller, P. E., Lucas, R., Pajuelo Madrigal, V., Mallinis, G., ... & Toth, B. (2018). On the use of unmanned aerial systems for environmental monitoring. *Remote sensing*, 10(4), 641.

- [Marshall *et al.* 2003] Marshall EJP, Brown VK, Boatman ND, Lutman PJW, Squire GR, Ward LK. 2003. The role of weeds in supporting biological diversity within crop fields. *Weed Research* 43:77-89.
- [Marin & Weiner 2014] C. Marin, J. Weiner, Effects of density and sowing pattern on weed suppression and grain yield in three varieties of maize under high weed pressure, *Weed Res.* 54 (5) (2014) 467e474. <https://doi.org/10.1111/wre.12101>.
- [Martin *et al.* 2019] Martin, E. A., Dainese, M., Clough, Y., Báldi, A., Bommarco, R., Gagic, V., Steffan-Dewenter, I. (2019). The interplay of landscape composition and configuration: new pathways to manage functional biodiversity and agroecosystem services across Europe. *Ecology letters*, 22(7), 1083-1094.
- [McGuire & Sperling 2016] McGuire S, Sperling L (2016) Seed systems smallholder farmers use. *Food Secur* 8(1):179–195
- [McNeely *et al.* 1993] McNeely, J. A., K. R. Miller, W. V. Reid, R. A. Mittermeier, and T. B. Werner. 1990. Conserving the world's biological diversity. International Union for Conservation of Nature and Natural Resources. World Resource Institute, Conservation International, World Wildlife Fund, World Bank, Washington, DC.
- [MEA 2005] MEA (Millennium Ecosystem Assessment), 2005. *Ecosystems and Human Wellbeing: Synthesis*. Island Press, Washington, DC.
- [Mehdizade & Mushtaq 2020] Mehdizadeh, M., Mushtaq, W. (2020). Biological control of weeds by allelopathic compounds from different plants: a bioherbicide approach. In *Natural Remedies for Pest, Disease and Weed Control* (pp. 107-117). Academic Press.
- [Mehrabian *et al.* 2020] Mehrabi, Z., Gill, M., Wijk, M. et al. Livestock policy for sustainable development. *Nat Food* 1, 160–165 (2020)
- [Meiners 2012] Meiners, S.J., Kong, C.-H., Ladwig, L.M., Pisula, N.L. Lang, K.A. (2012). Developing an ecological context for allelopathy. *Plant Ecol.*, 213, 1221–1227.
- [Meng *et al.* 2020] Meng, T., Jing, X., Yan, Z., & Pedrycz, W. (2020). A survey on machine learning for data fusion. *Information Fusion*, 57, 115-129.
- [Mertz & Mertens 2017] Mertz, O., Mertens, C.F., 2017. Land sparing and land sharing policies in developing countries—drivers and linkages to scientific debates. *World Dev.* 98, 523–535.
- [Meyer *et al.* 1993] Meyer, K.S., Soltwedel, T., Bergmann, M., 2014. High biodiversity on a deep-water reef in the eastern Fram Strait. *PLoS One* 9, e105424.
- [Meyer *et al.* 2013] Meyer, S.; Hilbig, W.; Steffen, K.; Schuch, S. Ackerwildkrautschutz—Eine Bibliographie. Bundesamt für Naturschutz. BfN-Skripten 2013, 351, 1–224.
- [Millennium Ecosystem Assessment 2005] MEA (Millennium Ecosystem Assessment), 2005. *Ecosystems and Human Wellbeing: Synthesis*. Island Press, Washington, DC.
- [Miao *et al.* 2018] Miao, Y., Mulla, D.J., Robert, P.C. 2018. An integrated approach to site-specific management zone delineation. *Front. Agric. Sci. Eng.* 2018, 5, 432–441.
- [Mohler & Liebmann 1987] Mohler, C.L.; Liebmann, M. Weed Productivity and Composition in Sole Crops and Intercrops of Barley and Field Pea. *J. Appl. Ecol.* 1987, 24, 685–699
- [Moller *et al.* 2008] Moller, H., MacLeod, C.J., Haggerty, J., Rosin, C., Blackwell, G., Perley, C., Meadows, S., Weller, F., Gradwohl, M., 2008. Intensification of New Zealand agriculture: implications for biodiversity. *N. Z. J. Agric. Res.* 51, 253–263.

- [Molisch 1937] Molisch, H. (1937). The influence of one plant on another. The influence of one plant on another.
- [Moraine *et al.* 2015] A social-ecological framework for analyzing and designing integrated crop–livestock systems from farm to territory levels Marc Moraine\*, Michel Duru and Olivier Therond Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), UMR 1248 AGIR, Chemin de Borde Rouge, CS 52627, 31326 Castanet-Tolosan cedex, France \*Corresponding authors: marc.moraine@gmail.com or olivier.therond@toulouse.inra.fr
- [Moreno *et al.* 2019] A Moreno, A., Bhattacharyya, A., Jansen, L., Arkeman, Y., Hartanto, R. and Kleinke, M., 2019, Environmental engineering and sustainability for smart agriculture: The application of UAV-based remote sensing to detect biodiversity in oil palm plantations. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 335 012008
- [Mortlock 2017] The Off-Site Impacts of Soil Erosion Favis-Mortlock online available: <http://soilerosion.net/off-site-impacts.html>
- [Morton & Hill 2014] Morton, SR. & Hill, R., 2014. What is biodiversity, and why is it important? In: Morton SR, Sheppard AW & Lonsdale WM (eds), Biodiversity: science and solutions for Australia, CSIRO Publishing, Collingwood, Melbourne, 1–12.
- [Murakami 2006] Murakami, E. 2006. Uma infra-estrutura de desenvolvimento de sistemas de informação orientados a serviços distribuídos para agricultura de precisão. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. Brazil. (In Portuguese)
- [Muth *et al.* 2014] Muth, D., 2014. Profitability versus environmental performance: are they competing? J. Soil Water Conserv. 69 (6), 203A–206A.
- [Myklevy *et al.* 2016] Myklevy, M., Doherty, P., Makower, J. 2016. The New Grand Strategy; St. Martin's Press: New York, NY, USA, 2016; p. 271.
- [Naeem *et al.* 2009] Naeem, S., Bunker, D.E., Hector, A., Loreau, M., Perrings, C. (Eds.), 2009. Biodiversity, Ecosystem Functioning, and Human Wellbeing. Oxford University Press, New York.
- [Neumann *et al.* 2005] Neumann, M., Restle, J., Alves Filho, D. C., Pellegrini, L. G. de, Souza, A. N. M. de, Kuss, F., 2005. Evaluation performance of the steers and heifers calves in elephant grass (*Pennisetum purpureum*, Schum) associated with different sources of supplements. Ciencia Rural, 35 (1): 157-163
- [New 1988] New, T. R. 1988. Associations between Insects and Plants. New South Wales University Press, Kensington, NSW. 113 pp.
- [Ning *et al.* 2016] Ning, L., Yu, F.-H. van Kleunen, M. (2016). Allelopathy of a native grassland community as a potential mechanism of resistance against invasion by introduced plants. Biol. Invasions, 18, 3481–3493.
- [Norton & Swinton 2018] Norton, G.W., and Swinton, S.M., 2018, April. Precision agricul Ning, L., Yu, F.-H. van Kleunen, M. (2016). Allelopathy of a native grassland community as a potential mechanism of resistance against invasion by introduced plants. Biol. Invasions, 18, 3481–3493. ture: global prospects and environmental implications. In Tomorrow's Agriculture: Incentives, Institutions, Infrastructure, and Innovations- Proceedings of the Twenty-fourth International Conference of Agricultural Economists: Incentives, Institutions, Infrastructure and Innovations- Proceedings of the Twentyfourth International Conference of Agricultural Economists (p. 269).
- [Nowak *et al.* 2014] Nowak A, Nowak S, Nobis M, Nobis A. 2014. A report on the conservation status of segetal weeds in Tajikistan. Weed Research 54(6):635–648.

- [Oliver & Webster 1990] Oliver, M.A., Webster, R., 1990. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. *Int. J. Geogr. Inform. Syst.* 4 (3), 313–332.
- [OMAFRA 2018a] Ontario Ministry of Agriculture, Food, and Rural Affairs (OMAFRA), 2018a. Corn Production in Ontario. Online available: <http://www.omafra.gov.on.ca/english/crops/field/corn.html>.
- [Onyia *et al.* 2018] Onyia, N.N., Balzter, H. and Berrio, J.C., 2018. Normalized Difference Vegetation Vigour Index: A New Remote Sensing Approach to Biodiversity Monitoring in Oil Polluted Regions
- [O'Toole 1993] O'Toole, C. (1993) Diversity of native bees and agroecosystems. In: Hymenoptera and Biodiversity (eds. J. LaSalle & I.D. Gauld), pp. 169–196. CAB International, Wallingford.
- [Park *et al.* 1994] Park J, Newman SM, Cousins SH (1994) The effect of poplar (*P. trichocarpa* x *deltoides*) on soil biological properties in a silvoarable system. *Agrofor Syst* 25:111–118.
- [Pautasso *et al.* 2013] Pautasso M, Aistara G, Barnaud A, Caillon S, Clouvel P, Coomes OT, Delêtre M, Demeulenaere E, de Santis P, Döring T, Eloy L, Emperaire L, Garine E, Goldringer I, Jarvis D, Joly HI, Leclerc C, Louafi S, Martin P, Massol F, McGuire S, McKey D, Padoch C, Soler C, Thomas M, Tramontini S (2013) Seed exchange networks for agrobiodiversity conservation. A review. *Agron Sustain Dev* 33(1):151–175. Online available: <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0089-6>
- [Padua *et al.* 2017] Padua, L., Vanko, J., Hruška, J., Adão, T., Sousa, J.J., Peres, E. and Morais, R., 2017. UAS, sensors, and data processing in agroforestry: a review towards practical applications. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8-10), pp.2349-2391.
- [Paulsen *et al.* 2006] Paulsen, H.M.; Schochow, M.; Ulber, B.; Kühne, S.; Rahmann, G. Mixed cropping systems for biological control of weeds and pests in organic oilseed crops. *Asp. Appl. Biol.* 2006, 79, 215–219.
- [Pelosi *et al.* 2010] Pelosi, C., Goulard, M., Balent, G., 2010. The spatial scale mismatch between ecological processes and agricultural management: do difficulties come from underlying theoretical frameworks? *Agric. Ecosyst. Environ.* 139, 455–462.
- [Peng *et al.* 1993] Peng RK, Incoll LD, Sutton SL, Wright C, Chadwick A (1993) Diversity of airborne arthropods in a silvoarable agroforestry system. *J Appl Ecol* 30:551–562 Return to ref 1993 in article.
- [Perfecto *et al.* 2009] Perfecto, I., Vandermeer, J., Wright, A., 2009. *Nature's Matrix: Linking Agriculture, Conservation and Food Sovereignty*. Earthscan, London.
- [Phalan *et al.* 2011] Phalan, B., Onial, M., Balmford, A., Green, R.E., 2011. Reconciling food production and biodiversity conservation: land sharing and land sparing compared. *Science* 333, 1289–1291.
- [Plant 2001] Plant, R. E., 2001. Site-specific management: the application of information technology to drop production. *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 30, 9-29.
- [Potts *et al.* 2010] Potts, S. G., Biesmeijer, J. C., Kremen, C., Neumann, P., Schweiger, O., Kunin, W. E. (2010). Global pollinator declines: trends, impacts and drivers. *Trends in ecology evolution*, 25(6), 345-353.
- [Pretty 2008] Pretty, J., 2008. Agricultural sustainability: concepts, principles and evidence. *Philos. Trans. R. Soc. B* 363, 447–465.
- [Ortiz *et al.* 2021] Ortiz, Andrea Monica D., et al. A review of the interactions between biodiversity, agriculture, climate change, and international trade: research and policy priorities. *One Earth* 4.1 (2021): 88-101. online available: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.12.008>

- [Radoglou-Grammatikis *et al.* 2020] Radoglou-Grammatikis, P., Sarigiannidis, P., Lagkas, T., & Moscholios, I. (2020). A compilation of UAV applications for precision agriculture. *Computer Networks*, 172, 107148.
- [Ramankutty *et al.* 2018] N. Ramankutty, Z. Mehrabi, K. Waha, L. Jarvis, C. Kremen, M. Herrero, L.H. Rieseberg Trends in global agricultural land use: implications for environmental health and food security *Annu. Rev. Plant Biol.*, 69 (2018), pp. 789-815, 10.1146/annurev-arplant-042817-040256
- [Rand *et al.* 2006] Rand, T.A., Tylianakis, J.M., Tscharrntke, T., 2006. Spillover edge effects: the dispersal of agriculturally subsidized insect natural enemies into adjacent natural habitats. *Ecol. Lett.* 9, 603–614.
- [Rao *et al.* 2021] Rao, D. L. N., Dey, P., Reddy, K. S. (2021). Plant Demand Adapted Fertilization in Organic and Precision Farming. *Soil and Recycling Management in the Anthropocene Era*, 137-166.
- [Rapoport & Drausal 2001] Rapoport, E.H. & Drausal, B.S. (2001) Edible plants. In: *Encyclopedia of Biodiversity*, Vol. 2 (ed. S.A. Levin), pp. 375–382. Academic Press, San Diego, CA.
- [Rasmont *et al.* 2005] Rasmont P, Pauly A, Terzo M, Patiny S, Michez D, Iserbyt S, et al. The Survey of Wild Bees (Hymenoptera, Apoidea) in Belgium and France. *FAO, Rome, Italy*; 2005. 18 pp.
- [Renard & Tilman 2019] Renard D, Tilman D (2019) National food production stabilized by crop diversity. *Nature* 571(7764):257–260
- [Rice 1984] E.L. Rice, *Allelopathy*, second ed., Academic Press, Inc., Orlando, F.L., 1984.
- [Richardson 1993] Richardson, J. S. 1993. Limits to productivity in streams: evidence from studies of macroinvertebrates. Pp. 9–15. In R. J. Gibson and R. E. Cutting (eds). *Production of Juvenile Atlantic Salmon, Salmo salar*, in Natural Waters. Canada Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences 118. National Research Council of Canada and Department of Fisheries and Oceans, Ottawa.
- [Richner *et al.* 2014] Richner N, Holderegger R, Linder H P, Walter T, Reviewing change in the arable flora of Europe: a meta-analysis, *Weed Research: An International Journal of Weed Biology, Ecology and Vegetation Management*, 2014.
- [Robert 2002] Robert, P.C., 2002. Precision agriculture: a challenge for crop nutrition management. *Plant and Soil*. Volume 247, # 1. November.
- [Rockenbach & Sakdapolrak 2017] Rockenbach T, Sakdapolrak P (2017) Social networks and the resilience of rural communities in the Global South: a critical review and conceptual reflections. *Ecol Soc* 22(1):10. <https://doi.org/10.5751/ES-09009-220110>
- [Rockström *et al.* 2009] Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F.S., Lambin, E.F., Lenton, T.M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H.J., Nykvist, B., de Wit, C.A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P.K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R.W., Fabry, V.J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P., Foley, J.A., 2009. A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 472–475.
- [Rohleder & Krüsken 2016] Rohleder, B., Krüsken, B. (2016). *Digitalisierung in der Landwirtschaft*. Bitkom, Berlin, 2. November 2016
- [Rovira-Mas 2019] Rovira-Más, F. (Coordinator). *VineScout European Project*. Available online: [www.vinescout.eu](http://www.vinescout.eu) (accessed on 21 November 2019).
- [Samways 1993] Samways, M. J. 1993. Insects in biodiversity conservation: some perspectives and directives. *Biodiversity and Conservation* 2: 258–282.

- [Sanchez-Bayo & Wyckhuys 2019] Sánchez-Bayo, F., Wyckhuys, K. A. (2019). Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers. *Biological conservation*, 232, 8-27.
- [Santana *et al.* 2007] Fabiana S. Santana , Edson Murakami , Antonio M. Saraiva , Pedro L. P. Correa A Comparative Study between Precision Agriculture and Biodiversity Modelling Information Systems Fabiana S. Santana a, Edson Murakami b, Antonio M. Saraiva b , Pedro L. P. Correa
- [Sarini *et al.* 2019] Sarni, W., Mariani, J., Kaji, J. 2019. From Dirt to Data: The Second Green Revolution and IoT. Deloitte insights. Available online: <https://www2.deloitte.com/insights/us/en/deloitte-review/issue-18/second-greenrevolution-and-internet-of-things.html#endnote-sup-9> (accessed on 18 September 2019).
- [Sarker *et al.* 2020] Sarker, I.H., Alqahtani, H., Alsolami, F. et al. Context pre-modeling: an empirical analysis for classification based user-centric context-aware predictive modeling. *J Big Data* 7, 51 (2020). online available: <https://doi.org/10.1186/s40537-020-00328-3>
- [Saiz-Rubio & Rovira-Mas 2020] Saiz-Rubio, V. and Rovira-Más, F., 2020. From Smart Farming towards Agriculture 5.0: A Review on Crop Data Management. *Agronomy* 2020, 10, 207.
- [Schwarzländer *et al.* 2018] M. Schwarzländer, V.C. Moran, S. Raghu, Constraints in weed biological control: contrasting responses by implementing nations, *BioControl* 63 (3) (2018) 313e317. <https://doi.org/10.1007/s10526-018-9888-2>. 114 PART II Biological Control Measures
- [Scholz 2007] Scholz H (2007) Questions about indigenous plants and anecophytes. *Taxon* 56(4):1255–1260
- [Schrijver *et al.* 2016] Schrijver, R., Poppe, K., Daheim, C. (2016): Präzisionslandwirtschaft und die Zukunft der Landwirtschaft in Europa. Referat Wissenschaftliche Vorausschau (STOA, Hrsg.). Euro-päisches Parlament, Brüssel.
- [Selinske *et al.* 2015] Selinske, M.J., Coetzee, J., Purnell, K., Knight, A.T., 2015. Understanding the motivations, satisfaction, and retention of landowners in private land conservation programs. *Conserv. Lett.* 8 (4), 282–289.
- [Shamshiri *et al.* 2018] Shamshiri, R.R., Weltzien, C., Hameed, I.A., Yule, I.J., Grift, T.E., Balasundram, S.K., Pitonakova, L., Ahmad, D., Chowdhary, G. 2018. Research and development in agricultural robotics: A perspective of digital farming. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 2018, 11, 1–14.
- [Sheppard *et al.* 2006] A.W. Sheppard, R.H. Shaw, R. Sforza, Top 20 environmental weeds for classical biological control in Europe: a review of opportunities, regulations and other barriers to adoption, *Weed Res.* 46 (2) (2006) 93e117. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2006.00497.x>.
- [Shiva 2012] Shiva V., 2012. Stolen harvest: the hijacking of the global food supply. *Agriculture and Human Values* volume 29, pages433-434.
- [Shurin *et al.* 2002] Shurin, J. B. et al. A cross-ecosystem comparison of the strength of trophic cascades. *Ecol. Lett.* 5, 785–791 (2002).
- [Siebert & Teizer 2014] Siebert, S. and Teizer, J., 2014. Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system. *Automation in Construction*, 41, pp.1-14.
- [Smith *et al.* 2012a] Smith J, Pearce BD, Wolfe MS (2012a) Reconciling productivity with protection of the environment:is temperate agroforestry the answer? *Renew Agric Food Syst.* Online available: [doi:10.1017/S1742170511000585](https://doi.org/10.1017/S1742170511000585).
- [Sonka 2014] Sonka, S. 2014. Big Data and the Ag Sector: More than Lots of Numbers. *Int. Food Agribus. Manag. Rev.* 2014, 17, 1–20.

- [Sorensen *et al.* 2002] Sorensen, C. G., Fountas, S., Pedersen, H. H., Blackmore, S., 2002. Informationsquellen und Entscheidungsfindung zur Präzisionslandwirtschaft. Internationale Konferenz über Präzisionslandwirtschaftsverfahren 6. Wisconsin. Madison, ASA / CSSA / SSSA, 1683-1695
- [Sposito *et al.* 2021] Esposito, M., Crimaldi, M., Cirillo, V., Sarghini, F., & Maggio, A. (2021). Drone and sensor technology for sustainable weed management: a review. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 8(1), 1-11.
- [Stamps & Linit 1998] Stamps WT, Linit MJ (1998) Plant diversity and arthropod communities: implications for temperate agroforestry. *Agrofor Syst* 39:73–89 Return to ref 1998 in article.
- [Stork 1993] Stork, N. E. 1993. How many species are there? *Biodiversity and Conservation* 2: 215–232.
- [Storkey & Neve 2018] Storkey J, Neve P. 2018. What good is weed diversity? *Weed Research* 58:239-243.
- [Speckle *et al.* 2020] Speckle, J., Angermair, W., Brohmeyer, F., Brüggemann, L., Spicker, A., & Pauli, S. A. (2020). Teilflächenspezifische Düngung als Reaktion auf wachsende gesellschaftliche Anforderungen und als Beitrag zur Entspannung des Widerspruches zwischen Ökonomie und Ökologie. 40. GIL-Jahrestagung, Digitalisierung für Mensch, Umwelt und Tier.
- [Sudduth 2000] Sudduth K.A. 2000. Engineering technologies for precision farming, CiteSeer.
- [Suding *et al.* 2008] Suding, K. N. et al. Scaling environmental change through the community-level: a trait-based response-and-effect framework for plants. *Glob. Change Biol.* 14, 1125–1140 (2008).
- [Swaine 1933] Swaine, J. M. 1933. The relation of insect activities to forest development as exemplified in the forests of eastern North America. *Forestry Chronicle* 9 (4): 5-32.
- [Swift & Anderson 1993] Swift, M. J. and J. M. Anderson. 1993. Biodiversity and ecosystem function in agricultural systems. In *Biodiversity and ecosystem function*, pp. 15-22. E. D. Scholze and H. Mooney, eds. Springer, Berlin, Germany.
- [Swift *et al.* 1979] Swift MJ, Heal OW, Anderson JM. *Decomposition in Terrestrial Ecosystems*. Blackwell Scientific, Oxford, UK; 1979. 372 pp.
- [Szumigalski & van Acker 2005] Szumigalski, A.; van Acker, R. Weed suppression and crop production in annual intercrops. *Weed Sci.* 2005, 53, 813–825.
- [Tielbörger 2009] Tielbörger, K., Prasse, R. (2009). Do seeds sense each other? Testing for density-dependent germination in desert perennial plants. *Oikos*, 118(5), 792-800.
- [Tobe 2019] Tobe, F. The Ultimate Guide to Agricultural Robotics. Available online: [https://www.roboticsbusinessreview.com/agriculture/the\\_ultimate\\_guide\\_to\\_agricultural\\_robotics/](https://www.roboticsbusinessreview.com/agriculture/the_ultimate_guide_to_agricultural_robotics/) (accessed on 21 November 2019).
- [Thompson *et al.* 2011] Thompson, I.D., Okabe, K., Tylianakis, J.M., Kumar, P., Brockerhoff, E.G., Schellhorn, N.A., Parrotta, J.A., Nasi, R., 2011. Forest biodiversity and the delivery of ecosystem goods and services: translating science into policy. *Bioscience* 61, 972–981.
- [Torresan *et al.* 2017] Torresan, C., Berton, A., Carotenuto, F., Di Gennaro, S.F., Gioli, B., Matese, A., Miglietta, F., Vagnoli, C., Zaldei, A. and Wallace, L., 2017. Forestry applications of UAVs in Europe: A review. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8-10), pp.2427-2447.

- [Tscharniske *et al.* 2011] Tscharniske, T., Clough, Y., Bhagwat, S.A., Buchori, D., Faust, H., Hertel, D., Holscher, D., Juhrbandt, J., Kessler, M., Perfecto, I., Scherber, C., Schroth, G., Veldkamp, E., Wanger, T.C., 2011. Multifunctional shade-tree management in tropical agroforestry – a review. *J. Appl. Ecol.* 48, 619–629.
- [Tzounis *et al.* 2017] Tzounis, A.; Katsoulas, N.; Bartzanas, T.; Kittas, C. 2017. Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges. *Biosyst. Eng.* 2017, 164, 31-48.
- [Tyler *et al.* 1997] Tyler, D.A., D.W. Roberts, and G.A. Nielsen. 1997. Location and guidance for site-specific management. In: *The State of Site-Specific Management for Agriculture*, pp. 161-181. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI.
- [Tyler *et al.* 2007] Taylor, J. A., Mcbratney, A. B., & Whelan, B. M., 2007. Establishing Management Classes for Broadacre Agricultural Production. *Agronomy Journal*, 99, 1366–1376.
- [Tyleur *et al.* 2017] C. Tayleur, A. Balmford, G.M. Buchanan, S.H.M. Butchart, H. Ducharme, R.E. Green, J.C. Milder, F.J. Sanderson, D.H.L. Thomas, J. Vickery, B. Phalan: Global coverage of agricultural sustainability standards, and their role in conserving biodiversity *Conserv. Lett.*, 10 (2017), pp. 610-618, 10.1111/conl.12314
- [Umweltbundesamt 2018] Umwelt Bundesamt, Environment and agriculture 2018.
- [Valko *et al.* 2016] Valkó, O., Deák, B., Török, P., Kelemen, A., Miglécz, T., Tóth, K., Tóthmérész, B., 2016. Abandonment of croplands: problem or chance for grassland restoration? Case studies from Hungary. *Ecosyst. Health Sustain.* 2 (2).
- [Vandermeer 2012] Vandermeer, J.H. *The Ecology of Intercropping*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2012; ISBN 9780521345927.
- [Van Elsen 1996] Van Elsen, T., 1996. Wirkungen des ökologischen Landbaues auf die Segetalflora—Ein Übersichtsbeitrag. In: Deipenbrock, W., Hülsbergen, K.-J. (Eds.), *Langzeiteffekte des ökologischen Landbaus auf Fauna, Flora und Boden*. Halle/Saale, Germany, pp. 143–152.
- [Verified Market Intelligence 2005] Verified Market Intelligence. *Global Agriculture Robots. Market Size, Status and Forecast to 2025*; Verified Market Intelligence Inc.: Boonton, NJ, USA, 2018; pp. 1–79.
- [Wachendorf & Taube 2001] Wachendorf M, Taube F. 2001. Plant species diversity, features of productivity and soil characteristics in grass-land from conventional and organic agriculture in northwest Germany (Artenvielfalt, Leistungsmerkmale und bodenchemische Kennwerte des Dauergrünlands im konventionellen und ökologischen Landbau in Nordwestdeutschland). *Pflanzenbauwissenschaften*. 5(2):75–86. German. English summary
- [Walch 2020] Walch, K. 2020. How AI Is Transforming Agriculture. Available online: <https://www.forbes.com/sites/cognitiveworld/2019/07/05/how-ai-is-transforming-agriculture/> (accessed on 1 January 2020).
- [West & Marland 2002] West, T.O., Marland, G., 2002. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States. *Agric. Ecosyst. Environ.* 91, 1–3.
- [Whelan & James 2010] Whelan, B. and James T., *An introduction to Precision Agriculture for Australian grains*, Australian Centre for Precision Agriculture, 2010. Change for Harvard citation.
- [Westman 1977] Westman, W.E. (1977) How much are nature's services worth? *Science* 197, 960–964.



- [Wiebes 1979] Wiebes, J. T. 1979. Co-evolution of figs and their pollinators. *Annual Review of Ecology and Systematics* 10: 1-12.
- [Winfree 2010] Winfree, R., 2010 The conservation and restoration of wild bees, *Annals of the New York Academy of Sciences*,
- [Wood 2000] Wood, A., 2000. An emerging consensus on biodiversity loss. In: Wood, A., Stedman- Edwards, P., Mang, J. (Eds.), *The Root Causes of Biodiversity Loss*. Earthscan, London, pp. 1–10.
- [Wolfert *et al.* 2017] Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., Bogaardt, M.-J. 2017. Big Data in Smart Farming—A review. *Agric. Syst.* 2017, 153, 69–80.
- [Xue *et al.* 2017] Xue, J., & Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of sensors*, 2017.
- [Xiao *et al.* 2018] Xiao, J., Yin, X., Ren, J., Zhang, M., Tang, L., & Zheng, Y. (2018). Complementation drives higher growth rate and yield of wheat and saves nitrogen fertilizer in wheat and faba bean intercropping. *Field Crops Research*, 221, 119-129.
- [Xue & Su 2017] Xue, J. and Su, B., 2017. Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of Sensors*, 2017.
- [Yin *et al.* 2020] Yin, W.; Chai, Q.; Zhao, C.; Yu, A.; Fan, Z.; Hu, F.; Fan, H.; Guo, Y.; Coulter, J.A. Water utilization in intercropping: A review. *Agric. Water Manag.* 2020, 241, 106335.
- [Young 1999] Young, A., 1999. Is there really spare land? A critique of estimates of available cultivable land in developing countries. *Environ. Dev. Sustain.* 1, 3–18.
- [Yu *et al.* 2015] Yu, Y.; Stomph, T.-J.; Makowski, D.; van der Werf, W. Temporal niche differentiation increases the land equivalent ratio of annual intercrops: A meta-analysis. *Field Crop. Res.* 2015, 184, 133–144.
- [Zambon *et al.* 2002] Zambon, I., Cecchini, M., Egidi, G., Saporito, M.G., Colantoni, A. (2019) Revolution 4.0: Industry vs. Agriculture in a Future Development for SMEs. *Processes* 7, 36.
- [Zhang *et al.* 2002] Zhang, N., Wang, M., Wang, N., 2002. Precision agriculture - a worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 36, 113-132.
- [Zhang *et al.* 2015] Zhang, Y.J., Tang, S.M., Liu, K.S., Li, X.F., Huang, D. Wang, K. (2015). The allelopathic effect of *Potentilla acaulis* on the changes of plant community in grassland, northern China. *Ecol. Res.*, 30, 41–47.
- [Zhang *et al.* 2021] Zhang, Z., Liu, Y., Yuan, L., Weber, E., van Kleunen, M. (2021). Effect of allelopathy on plant performance: a meta-analysis. *Ecology Letters*, 24(2), 348-362.
- [Zohary 1950] Zohary M. 1950. The segetal plant communities of Palestine. *Vegetatio* 2(6):387–411.