

TEXTE

145/2023

Maßnahmen des integrierten Pflanzenschutzes und deren Wirkung auf umweltbezogene Schlüsselparameter

von:

Björn Scholz-Starke, Darwin Statistics, Aachen
Benjamin Daniels

Herausgeber:
Umweltbundesamt

TEXTE 145/2023

Projektnummer 157330

FB001002

Maßnahmen des integrierten Pflanzenschutzes und deren Wirkung auf umweltbezogene Schlüsselparameter

von

Björn Scholz-Starke, Darwin Statistics, Aachen

Benjamin Daniels

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
service@bmu.bund.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Björn Scholz-Starke, darwin statistics
Von-Broich-Str. 23
52072 Aachen

Abschlussdatum:

September 2022

Redaktion:

Fachgebiet IV 1.3 Pflanzenschutzmittel
Saskia Knillmann, Sally Otto

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Oktober 2023

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Kurzbeschreibung: Maßnahmen des integrierten Pflanzenschutzes und deren Wirkung auf umweltbezogene Schlüsselparameter

Die vorliegende Studie hat die Wirkungen der vorbeugenden und eingreifenden Maßnahmen des Integrierten Pflanzenschutzes auf Kennwerte der Biodiversität und der ökologischen Integrität in Agrarlandschaften untersucht. Zusätzlich ist der Effekt dieser Maßnahmen auf die Häufigkeit der Verwendung und der Menge chemisch-synthetischer Pflanzenschutzmittel betrachtet worden. In einem Literaturreview sind mehr als 12 000 themenbezogene Publikationen gesichtet worden. Mehr als 150 Publikationen sind einer integrierten, gewichtenden Bewertung der ökologischen Vorzugswürdigkeit unterzogen worden. Die Analyse der Veröffentlichungen hat gezeigt, dass eine ökologisch wertvolle, regional-typische naturräumliche Ausstattung einer Agrarlandschaft entscheidend dazu beiträgt, den Schaderregerdruck und gleichzeitig die Umweltrisiken durch die reduzierte Verwendung chemisch-synthetischer Pflanzenschutzmittel zu verringern. Die Entwicklung spezifischer alternativer Bekämpfungsmaßnahmen stellt einen wichtigen Baustein auf dem Weg in eine nachhaltigere Landwirtschaft dar. Dies ist in hohem Maße auch von digitalen Entscheidungshilfesystemen und einer datengetriebenen Optimierung der Bestandsführung zu erwarten. Insbesondere im Bereich der Wirkung von digitalen Werkzeugen des Integrierten Pflanzenschutzes auf die ökologische Qualität von Agrarökosystemen fehlt es aktuell noch an einer adäquaten Auseinandersetzung in wissenschaftlichen Untersuchungen. Dies gilt auch für den kombinierten Einsatz von nicht-chemischen Maßnahmen, wie es im Konzept des Integrierten Pflanzenschutzes grundsätzlich verankert ist. Die ökologische Vorzugswürdigkeit dieser Kombinationswirkungen kann anhand der Studienlage bisher nicht ausreichend eingeschätzt werden. Mit einer niedrigschwelligen Vermittlung von Wissen um effiziente Maßnahmen, die auf die spezifische Situation eines landwirtschaftlichen Betriebes abgestimmt sind, sollte die Akzeptanz und der Einsatz dieser Maßnahmen in der landwirtschaftlichen-Praxis verbessert werden.

Abstract: Measures of integrated pest management and their effect on key environmental parameters

The present study has examined the effects of preventive and interventional measures of Integrated Pest Management on indicators of biodiversity and ecological integrity in agricultural landscapes. In addition, the effect of these measures on the frequency of use and quantity of plant protection products containing synthetic chemicals has been considered. In a literature review, more than 12 000 topic-related have been screened. More than 150 publications have been subjected to an integrated assessment of their impact on ecological indicators.

The analysis of the publications has shown that ecologically valuable, regionally typical semi-natural habitats within agricultural landscapes contribute decisively to reducing pest pressures and, at the same time, the environmental risks from the reduced use of chemical-synthetic plant protection products. Developing specific alternative control measures has been identified as essential for future sustainable agriculture. Positive effects on biodiversity indicators are expected from digital decision support systems and data-driven optimization of crop management. Particularly regarding the effects of digital tools of Integrated Pest Management on the ecological quality of agroecosystems, however, there is still a lack of adequate discussion in scientific studies. This deficit has also been noticed in the combined application of non-chemical measures, as it is fundamentally anchored in Integrated Pest Management. The ecological benefit of these joint effects cannot yet be adequately assessed based on the available studies. The acceptance and use of these measures in agricultural practice should be improved through accessible communication of knowledge about efficient combinations of measures that are adapted to the specific operational situation of a single farm.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
Abbildungsverzeichnis	8
Tabellenverzeichnis	10
Abkürzungsverzeichnis	11
Zusammenfassung	12
Fragestellung und Ziele	12
Methodische Vorgehensweise der Literaturrecherche	13
Deskriptive Beschreibung der gefundenen Literatur	14
Methodische Vorgehensweise zur halbquantitativen Beurteilung der Veröffentlichungen	14
Ergebnisse der Literaturrecherche mit Berücksichtigung der Bewertungsmetrik	15
Schlussfolgerungen und Empfehlungen	16
Summary	18
Research question and objectives	18
Methodological approach literature research	19
Description of the literature corpus	20
Semi-quantitative evaluation metric	20
Semi-quantitative assessment of the literature corpus	21
Conclusions and recommendations	22
1 Hintergrund & Zielsetzung	24
1.1 Verlust der Artenvielfalt	24
1.2 IPS – Historie und Instrumente	24
1.3 Zielsetzung des Literaturreviews	30
1.4 Begriffsbestimmungen IPS	31
1.5 Methodische Vorgehensweise	32
2 Literaturrecherche zu Maßnahmen des IPS	33
2.1 Suchmethodik	33
2.1.1 Systematische Suche	33
2.1.2 Schneeballsuche und Sekundärliteratur	40
2.2 Ergebnisse der systematischen Suche und der Schneeballsuche	41
2.2.1 Ergebnisse der systematischen Suche	41
2.2.1.1 Anzahl der Literaturstellen	41
2.2.1.2 Historie IPS	41

2.2.1.3	Semantischer Überblick über das Themenfeld.....	41
2.2.2	Ergebnisse der begleitenden Schneeballsuche.....	44
2.3	Metaanalyse zur Festlegung der Relevanz der Literatur	44
2.3.1	Eingrenzung der Suchergebnisse aus der systematischen Literatursuche	45
2.3.2	Deskriptive Analyse der extrahierten Literaturstellen.....	46
3	Wissensstand und gewichtende Bewertung.....	50
3.1	Aufbau einer numerischen Bewertungsmetrik.....	50
3.1.1	Relevanz der Aussage: <i>Bewertungs-Score B</i>	50
3.1.2	Stärke der Aussage: <i>Intensitäts-Score I</i>	51
3.1.3	Kombination Relevanz und Stärke der Aussage: Gesamt-Score <i>INTEGER</i>	52
3.2	Gruppierung der Maßnahmen und Effekte	53
3.3	Bewertung der Maßnahmen und Effekte	59
3.4	Bewertung der Wirksamkeit von IPS-Maßnahmen auf die Reduktion der Risiken durch PSM-Einsatz und den Erhalt der Agrar-Biodiversität	61
3.4.1	Maßnahme Biologische Schädlingskontrolle	61
3.4.2	Maßnahme Digitale Entscheidungshilfesysteme.....	63
3.4.3	Maßnahme naturräumliche Infrastruktur - Ökologisches Inventar.....	66
3.4.4	Maßnahme Nützlingsförderung.....	68
3.4.5	Maßnahme Ökolandbau	71
3.4.6	Maßnahme risikoarme PSM & nicht-chemische Alternativen	73
3.4.7	Sonstige Maßnahmen	75
3.4.7.1	Maßnahme standortgerechte Sortenmischungen	75
3.4.7.2	Maßnahme Teilflächenanwendung PSM.....	75
3.4.7.3	Maßnahme vielfältige Fruchtfolgen	76
3.4.7.4	Maßnahme Wissensvermittlung, Akzeptanz und Umsetzung von IPS-Maßnahmen... ..	76
3.4.7.5	Maßnahme Bodenmanagement (pfluglose Bodenbearbeitung und Düngung).....	78
3.4.7.6	Maßnahme der Festlegung von Bekämpfungsschwellen	78
3.5	Realitätscheck durch Befragungen von Landwirtschaftstreibenden und einem Landwirtschaftsberatenden	79
3.5.1	Umkehrung der IPS-Pyramide.....	80
3.5.2	Digitalisierung	80
3.5.3	Genaue Bestimmung des Schaderregerdrucks.....	80
3.5.4	Unabhängigkeit der Beratung.....	81
3.5.5	Low-risk PSM.....	81
3.5.6	Implementierungsgrad der IPS-Konzepte in der landwirtschaftlichen Praxis	81

3.5.7	Umstellung der Betriebe auf Ökolandbau	82
3.5.8	Hürden in der Zulassung von Biostimulanzien und selektiven PSM	82
4	Empfehlungen, Diskussion und Ausblick	83
4.1	Methodik der Bewertung.....	84
4.2	Weiterentwicklung der Instrumente des IPS	85
4.3	Kombinierte, skalenübergreifende und stufenweise Konzepte	87
4.4	Forschungsbedarf und Vorschläge für Forschungsschwerpunkte	88
4.5	Ausblick: Ist der Weg frei für eine nachhaltigere Landwirtschaft?	90
5	Referenzen	94
6	Anhang	102

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Maßnahmenpyramide des Integrierten Pflanzenschutzes (verändert nach LTZ, 2020).....	25
Abbildung 2: Komponenten des Integrierten Pflanzenbaus (entnommen aus Priestel, 1997).....	32
Abbildung 3: Überblick über das Themenfeld IPS, Häufigkeit der Nennungen wichtiger Suchbegriffe im Themenfeld IPS.	42
Abbildung 4: Verlauf der jährlichen Anzahl der Publikationen der Trefferliste <i>systematische Suche</i> , siehe Tabelle 7.	43
Abbildung 5: Globale Verteilung der Ergebnisse der systematischen Suche auf Basis der institutionellen Zugehörigkeit der Erstautoren.	43
Abbildung 6: Eingrenzung der Suchergebnisse der systematischen Suche durch Anwendung von Filterkriterien.....	46
Abbildung 7: Verteilung der Ergebnisse der systematischen Suche auf Basis der institutionellen Zugehörigkeit der Erstautoren in Europa.....	47
Abbildung 8: Verteilung der Ergebnisse der systematischen Suche auf Basis der institutionellen Zugehörigkeit der Erstautoren in Europa für 82 Publikationen aus der systematischen Suche zur eingehenden Analyse.	48
Abbildung 9: Anzahl der Suchphrasenpaare in der Literatur für Maßnahme-Effekt-Kombinationen. In der Matrix sind die Suchworte für die Maßnahmen in den Zeilen festgehalten, die Suchwort für die erwarteten Effekte stehen in Spalten.	49
Abbildung 10: Anzahl der Literaturstellen pro Maßnahme-Effekt-Kombination.	59
Abbildung 11: Bewertungsmetrik der IPS-Maßnahme-Effekt-Kombinationen. In den Zellen sind die berechneten <i>INTEGER-Scores</i> (Bereich –1 bis 1) dargestellt, die Intensität der Einfärbung einer Zelle entspricht der Anzahl der berücksichtigten Literaturstellen in Relation zur Gesamtzahl innerhalb der jeweils betrachteten Kombination.	60
Abbildung 12: Netzdiagramm der <i>INTEGER-Scores</i> (zur Ableitung siehe Kapitel 3.1) der aus der Literatur extrahierten Effekte für die IPS-Maßnahme <i>Biologische Schädlingsbekämpfung</i> . Die fettgedruckten Zahlen an den Eckpunkten des Netzes geben die Anzahl der verarbeiteten Literaturstellen für den jeweiligen Effekt an.....	63
Abbildung 13: Netzdiagramm der <i>INTEGER-Scores</i> (zur Ableitung siehe Kapitel 3.1) der aus der Literatur extrahierten Effekte für die IPS-Maßnahme Digitale Entscheidungshilfesysteme. Die fettgedruckten Zahlen an den Eckpunkten des Netzes geben die Anzahl der verarbeiteten Literaturstellen für den jeweiligen Effekt an.....	65

- Abbildung 14: Netzdiagramm der *INTEGER-Scores* (zur Ableitung siehe Kapitel 3.1) der aus der Literatur extrahierten Effekte für die IPS-Maßnahme *Naturräumliche Infrastruktur*. Die fettgedruckten Zahlen an den Eckpunkten des Netzes geben die Anzahl der verarbeiteten Literaturstellen für den jeweiligen Effekt an.....67
- Abbildung 15: Netzdiagramm der *INTEGER-Scores* (zur Ableitung siehe Kapitel 3.1) der aus der Literatur extrahierten Effekte für die IPS-Maßnahme *Nützlingsförderung*. Die fettgedruckten Zahlen an den Eckpunkten des Netzes geben die Anzahl der verarbeiteten Literaturstellen für den jeweiligen Effekt an.....70
- Abbildung 16: Netzdiagramm der *INTEGER-Scores* (zur Ableitung siehe Kapitel 3.1) der aus der Literatur extrahierten Effekte für die IPS-Maßnahme (*Aspekte des*) *ökologischen Landbaus*. Die fettgedruckten Zahlen an den Eckpunkten des Netzes geben die Anzahl der verarbeiteten Literaturstellen für den jeweiligen Effekt an.....72
- Abbildung 17: Netzdiagramm der *INTEGER-Scores* (zur Ableitung siehe Kapitel 3.1) der aus der Literatur extrahierten Effekte für die IPS-Maßnahme *Risikoarme PSM & nicht-chemische Alternativen*. Die fettgedruckten Zahlen an den Eckpunkten des Netzes geben die Anzahl der verarbeiteten Literaturstellen für den jeweiligen Effekt an.74
- Abbildung 18: Angepasste Maßnahmenpyramide des IPS (im Vergleich zur Abbildung 1) mit implizierter Darstellung der Stufenweisen Umsetzung innerhalb eines Konzepts der kombinierten Anwendung von IPS-Maßnahmen. Die Pfeile verdeutlichen die Notwendigkeit einer konsequent durchgeführten IPS-Strategie: Anwendung der IPS-Maßnahmen in Kombination innerhalb einer Stufe, dann nach Notwendigkeit stufenweise Hinzufügung weiterer IPS-Maßnahmen aus höheren Stufen. .88
- Abbildung 19: Vorschlag für ein systematisches Monitoring der IPS-Maßnahmenkombinationen unter besonderer Berücksichtigung der Wirkung auf den PSM-Einsatz und der Biodiversität.....90

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Definition der Suchbegriffe für <i>Hauptthemenfelder - topic</i>	34
Tabelle 2: Definition der Suchbegriffe für <i>Hauptkategorien der Effekte des IPS - effect main</i>	34
Tabelle 3: Definition der Suchbegriffe für <i>Unterkategorien der Effekte des IPS - effect sub</i>	35
Tabelle 4: Definition der Suchbegriffe für <i>Hauptkategorien der Maßnahmen des IPS – measure main</i>	36
Tabelle 5: Definition der Suchbegriffe für <i>Unterkategorien der Maßnahmen des IPS – measure sub</i>	36
Tabelle 6: Themen in den Themenfeldern <i>AGRI</i> und <i>ENVI</i>	38
Tabelle 7: Dokumentation des Suchprozesses „Effekte von Maßnahmen des IPS auf Zielgrößen <i>PSM-Reduktion</i> und <i>Schutz der Biodiversität</i> ...	39
Tabelle 8: Liste der EU-Staaten + Großbritannien zur Positivfilterung der Suchtreffer der systematischen Suche (in englischer Sprache).	45
Tabelle 9: Auflistung der Maßnahmengruppen mit den entsprechenden gebräuchlichsten englischen Begriffen. In Klammern hinter der Nummer der Maßnahmenkategorie die vorrangig zugeordneten, übergeordneten Prinzipien des IPS (Beschreibung nach Barzman et al. (2015) siehe Kapitel 1.2) ..	54
Tabelle 10: Auflistung der Effektkategorien mit den entsprechenden gebräuchlichsten englischen Begriffen.	58

Abkürzungsverzeichnis

AMF	Arbuskuläre Mykorrhiza Pilze
API	Application Programming Interface
DOI	Digitaler Objektbezeichner
EU	Europäische Union
F2F	Farm-to-Fork
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GAP	Gemeinsame Agrarpolitik in der EU
GIS	Geographisches Informationssystem
HNV	High Nature Value (dt.: Hoher Naturwert)
IPS	Integrierter Pflanzenschutz
ISIP	Informationssystem für die integrierte Pflanzenproduktion
KI	Künstliche Intelligenz
KMU	Kleines und Mittleres Unternehmen
NAP	Nationale Aktionsplan
NGO	Nichtregierungsorganisation
P	Prinzip
PAN	Pesticide Action Network
PflSchG	Pflanzenschutzgesetz
PPP	Plant Protection Product(s)
PS	Pflanzenschutz
PSM	Pflanzenschutzmittel
RMS	Rapporteur Member State
SRU	Sachverständigenrat für Umweltfragen
SUD	Sustainable Use Directive
SUR	Sustainable Use Regulation
ZKL	Zukunftskommission Landwirtschaft

Zusammenfassung

Fragestellung und Ziele

Agrarökosysteme können mit ihrem ökologischen Inventar und ihrer Leistungs- und Funktionsfähigkeit langfristig nur erhalten werden, wenn sie eine regional-typische, strukturell und funktionell vielfältige Ausprägung besitzen. Die Vielfalt bezieht sich auf alle Aspekte einer modernen Landwirtschaft. Sie umfasst die Diversität der Anbausysteme, der Nutztiere und der Anbaukulturen, aber auch die Diversität stabiler Populationen von Wildtieren und -pflanzen. Der Artenrückgang vieler Organismengruppen, wie Insekten, Feldvögel oder Wildpflanzen in den Agrarlandschaften, ist auf den Verlust von Lebensräumen und auf die vorherrschende intensive Bewirtschaftungspraxis zurückzuführen. Der damit einhergehende Einsatz von Pflanzenschutzmitteln (PSM) mit unterschiedlichen Wirkmechanismen, die im Laufe einer Anbausaison oft als Mischungen in enger Abfolge angewendet werden, spielt dabei eine entscheidende Rolle.

Um die Auswirkungen des PSM-Einsatzes zu verringern, hat sich die Europäische Kommission (EU) bei der Formulierung der Ziele des Green Deals (dazu gehören die Farm-to-Fork (F2F) Strategie und die Nachhaltigkeitsstrategie für Chemikalien) auf deutliche Reduktionsziele festgelegt. Die Verwendung von PSM und die dadurch verursachten Umweltrisiken sollen bis zum Jahr 2030 halbiert werden. Eine Umsetzung der Regelungen und Zielsetzungen soll über die neue, derzeit noch nicht verabschiedete EU-Verordnung zur nachhaltigen Verwendung von PSM (Sustainable Use Regulation, SUR) festgelegt und nach ihrem Inkrafttreten im Jahr 2025 in verbindlichen Nationalen Aktionsplänen (NAP) der Mitgliedsstaaten konkretisiert und umgesetzt werden. Dabei stellt der Integrierte Pflanzenschutz (IPS) das wichtigste Instrument zur Erreichung der Reduktionsziele dar. Eine konsequente Umsetzung des IPS soll wesentlich zum Schutz der Biodiversität innerhalb der konventionellen Anbausysteme beitragen.

Das Konzept des IPS ist in den meisten Anbausystemen in Europa als *Gute Landwirtschaftliche Praxis* verankert. Im Ackerbau hat der IPS das Ziel, den Einsatz chemisch-synthetischer PSM bei der Bekämpfung von Schadorganismen auf das ökonomisch notwendige Maß zu minimieren. Dies geschieht, indem vorbeugende ökologische Maßnahmen sowie biologische, mechanische und thermische Schädlingsbekämpfungsmethoden vorrangig gegenüber dem chemischen Pflanzenschutz (PS) zum Einsatz kommen. Der IPS setzt auf Prinzipien der Prävention und Beobachtung von Schaderregerpopulationen sowie den Einsatz von Entscheidungshilfesystemen für Landwirte und Landwirtinnen, um Interventionen (z. B. den Einsatz von PSM) zu vermeiden. Lassen sich bei der Überschreitung von definierten Schadschwellen weitere Maßnahmen nicht vermeiden, geschieht dies unter Anwendung folgender Grundsätze: (1) Nicht-chemische Methoden werden zwingend bevorzugt, (2) PSM, deren Anwendung ein geringes Umweltrisiko darstellt, werden ausgewählt und (3) der Einsatz von PSM wird auf ein möglichst geringes Maß beschränkt. Bisher wird dieses Konzept, obwohl es bereits in der EU-Richtlinie zur Nachhaltigen Verwendung von PSM implementiert ist, europaweit nur unzureichend angewendet. Ein Grund für den geringen Umsetzungserfolg liegt darin, dass in der Gemeinsamen Agrarpolitik der EU (GAP), trotz zahlreicher Fördermaßnahmen, nur geringe Anreize für Landwirte und Landwirtinnen zur Umsetzung des IPS gesetzt werden.

In der vorliegenden Studie sind achtzehn Maßnahmenkategorien des IPS identifiziert und den Literaturstellen zugeordnet worden, die nach der Recherche als relevant klassifiziert worden sind.

1. Alternative PSM & Pflanzenstärkung ~ *alternative Plant Protection Products*
2. Aussaattermin ~ *sowing date*
3. Bekämpfungsschwelle ~ *economic threshold*
4. Biologische Schädlingskontrolle ~ *biocontrol agents*
5. Boden- und Landschaftsschutz ~ *land conservation*
6. Digitale Entscheidungshilfesysteme & Präzisionsackerbau ~ *digital support systems & precision farming*
7. Mechanische Schädlingsbekämpfung & physikalische Barrieren ~ *mechanical pest control & physical barriers*
8. Naturräumliche Infrastruktur ~ *semi-natural habitats*
9. Nützlingsförderung ~ *natural enemies*
10. Ökologischer Landbau & Management ~ *ecological farming & management*
11. Prävention ~ *prevention*
12. Risikoarme PSM ~ *low-risk Plant Protection Products*
13. Schädlingsresistente Sorten ~ *pest resistant varieties*
14. Bodenmanagement – pfluglose Bodenbearbeitung ~ *conservation – no tillage*
15. Standortgerechte Sortenwahl und Mischanbau ~ *site-specific varieties & intercropping*
16. Teilflächenanwendung & Reduktion PSM-Einsatz ~ *partial area application*
17. Vielfältige Fruchtfolgen ~ *diverse crop rotation*
18. Wissensvermittlung ~ *knowledge transfer*

Die vorliegende Studie hat das Ziel, den aktuellen Wissensstand zur ökologischen Wirksamkeit und Vorzugswürdigkeit von einzelnen und kombinierten Maßnahmen des IPS zusammenzustellen und in einem Bewertungssystem zu gewichten. Der Fokus liegt auf Anbaukulturen, die in der EU und insbesondere in Deutschland relevant sind. Es sind Maßnahmen des IPS identifiziert worden, die in der aktuellen landwirtschaftlichen Praxis Anwendung finden und deren Wirksamkeit für einen effizienten PS anerkannt wird.

Die bewerteten Maßnahmen sollen eine nachgewiesene Wirksamkeit für die Verbesserung der ökologischen Qualität und Artenvielfalt der Agrarlandschaften besitzen und zur PSM-Reduktion beitragen. Es wird grundsätzlich angenommen, dass der IPS in konventionellen Anbausystemen mit seinen vielfältigen, spezifischen Methoden das Potenzial besitzt, den Erhalt eines wichtigen Teils der Biodiversität und der daraus resultierenden Ökosystemfunktionen in intensiv genutzten Agrarlandschaften zu sichern.

Methodische Vorgehensweise der Literaturrecherche

Der Fokus der Literaturrecherche liegt auf dem übergreifenden Themenfeld IPS. Die Literaturrecherche hat spezifisch Methoden und Maßnahmen identifiziert, die Schlüsselparameter einer ökologischen Vorzugswürdigkeit positiv beeinflussen und ein deutliches Potenzial zur Reduktion der Umweltrisiken durch PSM aufweisen. In einem systematischen Suchansatz ist die internationale, bibliographische Zitations- und Abstract-Datenbank SCOPUS® mit Hilfe von Suchphrasen verwendet worden. Die Suchphrasen sind aus je drei Suchbegriffen kombiniert worden: (1) Informationen zum übergeordneten Themenbereich, (2) Informationen zu einer Maßnahme des IPS und (3) Informationen zur jeweiligen Wirkung auf die Biodiversität oder die Reduktion des PSM-Einsatzes. Die Suchbegriffe sind sowohl in deutscher als auch in englischer Sprache und mit entsprechenden Synonymen definiert worden, um zunächst einen breiten Überblick der Fachliteratur und damit des wissenschaftlichen Wissensstandes zum Themenfeld zu geben.

Neben der systematischen Suchstrategie ist auf Grundlage einiger besonders relevanter Übersichtsartikel die Recherchestrategie der Rückwärts- und Vorwärts-Schneeballsuche angewendet worden. Dabei ist in den zitierten Referenzen nach themenbezogen relevanten Veröffentlichungen gesucht worden (Rückwärtssuche, *backward snowballing*, bezogen auf das Veröffentlichungsdatum der zitierten Publikationen), um den Kenntnisstand zielgerichtet zu erweitern. Aktuelle Literatur ist mit dieser Methode ebenfalls abgedeckt worden, indem systematisch die besonders relevanten gefundenen Quellen als Zitatstellen in Veröffentlichungen aktuelleren Datums gesucht worden sind (Vorwärtssuche, *forward snowballing*).

Durch die Suche in beide Richtungen und die Kombination der Suchstrategien hat sich ein Gesamtbild der IPS-Maßnahmen und ihrer Effekte auf die Biodiversität ergeben.

Deskriptive Beschreibung der gefundenen Literatur

Im Ergebnis sind mit Hilfe der systematischen Suche 12 000 Publikationen gefunden worden. Etwa ein Drittel stammt aus dem Bereich der Umweltwissenschaften, zwei Drittel lassen sich dem Forschungsfeld der Agrarwissenschaften zuordnen. Aus den Daten wird die historische Entwicklung deutlich, denn das wissenschaftliche Interesse am Themenbereich IPS steigt seit den 1990er-Jahren stark an. Die Entwicklung erklärt sich aus politischen Weichenstellungen der Epoche, da 1987 der IPS als Leitbild der modernen Anbaupraxis im deutschen PS-Gesetz und 1991 in die Europäische Richtlinie über das Inverkehrbringen von PSM (91/414/EWG) aufgenommen worden ist.

In der Agenda 21 der Konferenz für Umwelt und Entwicklung der Vereinten Nationen, die im Jahr 1991 in Rio de Janeiro stattgefunden hat, wird der IPS die *optimale Lösung der Zukunft* genannt. Die globale Verteilung der Publikationen spiegelt ein hohes wissenschaftliches Interesse an der Umsetzbarkeit der Methoden des IPS auf allen Kontinenten wider. Zu den Ländern mit der weltweit intensivsten Forschungstätigkeit gehören die USA, China, Indien und Australien, wie auch Brasilien in Südamerika und Kanada auf dem nordamerikanischen Kontinent. Vor der inhaltlichen Beurteilung der Ergebnisse der systematischen Literatursuche ist die Anzahl der Literaturstellen anhand definierter Kriterien schrittweise auf eine handhabbare Anzahl von 80 Publikationen eingegrenzt worden. Um zunächst die *geographische Relevanz* für die landwirtschaftliche Praxis in Europa abzubilden, ist die Erstautorenschaft mit einer Institution aus den Ländern der Europäischen Union verbunden. Die Trefferliste der Originalartikel ist zur Abbildung der *historischen Entwicklung* des IPS und zur stärkeren Gewichtung neuer Entwicklungen in einem zweiten Schritt auf die Jahre 2017-2021 beschränkt worden. Für Übersichtsartikel (Reviews) ist ein längerer Zeitraum zwischen den Jahren 1990 und 2021 gewählt worden. Die Relevanz der Studien ist anhand der Anzahl der Zitationen bestimmt worden, wobei für Originalartikel 5 % und für Reviews 10 % der meistzitierten Publikationen für weitere Auswertungen herangezogen worden sind. Zusätzlich sind über die Schneeballsuche etwa 70 weitere Publikationen, vor allem aktuelle Übersichtsartikel, in die Auswertungen einbezogen worden. Insgesamt sind 150 Studien gewichtet und bewertet worden.

Methodische Vorgehensweise zur halbquantitativen Beurteilung der Veröffentlichungen

Unsere Studie hat das Ziel verfolgt, Maßnahmen zur Bekämpfung von Schaderregern im Ackerbau aus unterschiedlichen Bereichen des IPS vergleichbar zu machen. Die Wirksamkeit der Maßnahmen zur Verbesserung von Kennwerten der Biodiversität und der Reduktion des PSM-Einsatzes ist bewertet und Empfehlungen für besonders wirksame einzelne Maßnahmen oder Maßnahmen-Kombinationen sind abgeleitet worden. Dazu ist eigens eine einheitliche Maßzahl, der *INTEGER-Score*, entwickelt worden. Der INTEGER-Score integriert die ökologische Wirksamkeit einer Maßnahme im Vergleich zu einer *Referenzsituation*, der konventionellen

Pflanzenschutzpraxis in intensiven Anbausystemen. Der *INTEGER-Score* setzt sich aus dem *Bewertungs-Score B* und dem *Intensitäts-Score I* zusammen. Er fasst die Erkenntnisse aus der Gesamtheit der Literaturstellen, die für eine Maßnahme-Effekt-Kombination identifiziert worden ist, zusammen.

Für den *Bewertungs-Score B* gilt: Wenn die jeweilige Publikation eine überwiegend negative Veränderung durch die Maßnahme konstatiert hat, werden Änderungen der betrachteten Parameter durch die Nutzung von nicht-chemischen Verfahren des IPS im Vergleich zur Referenz pro Studie als negativer Score mit diskreten Werten im Bereich von - 1 bis - 3 beschrieben. Positive Scores mit diskreten Werten zwischen 1 und 3 zeigen eine Verbesserung des jeweiligen Parameters auf. Die Experten-Bewertung erfolgt nur für Maßnahme-Effekt-Kombinationen, die eine messbare Änderung durch nicht-chemische IPS-Methoden erfahren haben, so dass der *Bewertungs-Score B* nicht den Wert 0 annehmen kann.

Ergänzend zum Score *B* wird für jede relevante Literaturstelle ein *Intensitäts-Score I* definiert, der die Stärke der Aussage reflektiert. Die Stärke der Aussage wird wie der *Score B* durch Expertenmeinung abgeleitet. Die zu Grunde liegenden Kriterien umfassen die Robustheit der zum Beleg der Schlussfolgerungen in der Publikation genutzten Datenbasis, die Aktualität der Studie und die Passgenauigkeit für die untersuchte Maßnahme-Effekt-Kombination. Der *Intensitäts-Score I* kann Werte zwischen 1 und 5 annehmen. Ein Score von 5 stellt die höchstmögliche Aussagekraft dar, Studien mit einem *I-Score* von 1 besitzen eine sehr geringe Aussagekraft für die Bewertung der ökologischen Vorzugswürdigkeit.

Für jede Maßnahme-Effekt-Kombination erhält man den normierten Gesamt-Score durch Multiplikation der Teil-Scores *B* und *I* und durch Division mit dem maximal möglichen Gesamtscore (für $I_{max}: 3 \times B_{max}: 5 = 15$). Der *INTEGER-Score* liegt im Bereich zwischen - 1 und 1. Der maximale Wert von 1 bedeutet, dass die betrachtete IPS-Maßnahme den bestmöglichen positiven Einfluss auf die jeweils betrachtete ökologische Dimension hat. Durch Aufsummierung der Gesamt-Scores von allen Literaturstellen einer Maßnahme-Effekt-Kombination und Division durch die Anzahl *n* dieser betrachteten Literaturstellen wird ein mittlerer *INTEGER-Score* für jede betrachtete Kombination berechnet. Ein negativer Wert von - 1 entspricht einer negativen Wirkung auf den betrachteten umweltbezogenen Parameter.

Ergebnisse der Literaturrecherche mit Berücksichtigung der Bewertungsmetrik

Aus der Datenanalyse wird deutlich, dass ein hoher Anteil der betrachteten Forschungsarbeiten eine Reduktion der PSM-Menge durch die Anwendung von nicht-chemischen PS-Methoden festgestellt haben. Die PSM-Reduktion hat in vielen Fällen nicht im Mittelpunkt der Forschung gestanden und ist daher selten exakt quantifiziert worden. Trendmäßig konnte jedoch beobachtet werden, dass eine Vielzahl von Maßnahmen zu einem verminderten PSM-Einsatz führen kann. Dabei werden Maßnahmen der biologischen Schädlingskontrolle, der Nutzung von alternativen PSM, der Auswahl schädlingsresistenter Sorten und der Verwendung digitaler Entscheidungshilfesysteme und des Präzisionsackerbaus als besonders wirksam angesehen. Die Erfahrungen vieler Generationen von Landwirtschaftstreibenden haben gezeigt, dass die Etablierung vielgliedriger Fruchtfolgen die ertragsmindernde Wirkung der kulturtypisch dominanten Schaderreger mildert. Es ergibt sich somit eine effiziente Möglichkeit, eine Reduktion der Umweltrisiken durch die Anwendung von PSM zu erzielen. Jedoch wurde die Wirkung von Fruchtfolgen in lediglich einer Publikation quantitativ bewertet.

Die Effekte nicht-chemischer PS-Methoden des IPS auf das Resistenzmanagement von Kulturpflanzen und auf die Förderung von Biodiversität werden von einer großen Anzahl der ausgewerteten Publikationen beschrieben. Die Förderung der Biodiversität wird dabei vor allem auf eine verbesserte naturräumliche Infrastruktur (Randstrukturen und semi-natürliche Habitate in der Agrarlandschaft) zurückgeführt. Die Nützlingsförderung als Effekt von nicht-

chemischen-Maßnahmen wird vorrangig in Kombination mit der Entwicklung der naturräumlichen Infrastruktur in Zusammenhang gebracht und wird durch diese Maßnahme positiv beeinflusst. In der Literaturanalyse sind überraschende Lücken bei der Beschreibung der Wirksamkeit von Methoden des IPS auf die Bodenqualität und die Bodenfunktion aufgetreten, die essenzielle Bestandteile einer nachhaltig funktionsfähigen und ertragreichen Landwirtschaft sind.

In Bezug auf andere Maßnahmen, wie Entscheidungshilfesystemen zur Früherkennung und der gezielten Bekämpfung von Schaderregern, konnten nur wenige Informationen gesammelt werden. Insbesondere in der Grauliteratur wird der Nutzen dieser Methoden für eine effiziente, moderne Landwirtschaft bei möglichst geringem Einsatz chemischer PSM suggeriert. Zu den Wirkungen dieser Maßnahmen auf den Naturhaushalt ist nach aktueller Studienlage bisher jedoch wenig bekannt.

Als Ergänzung zur Literaturrecherche und um zentrale Aspekte der praktischen Umsetzbarkeit und der Anreizkulisse auf der Ebene eines einzelnen landwirtschaftlichen Betriebes zu beleuchten, ist ein Realitätscheck durch Befragungen und Gesprächen mit Landwirten und Landwirtinnen aus der Region Aachen durchgeführt worden. Es ist deutlich geworden, dass die Maßnahmen-Pyramide des IPS in vielen Acker-Anbausystemen systematisch auf den Kopf gestellt ist. Das bedeutet, dass vor der Aussaat keine präventiven Maßnahmen zur Beikrautunterdrückung zur Anwendung kommen, sondern chemische Maßnahmen mit der Anwendung von Totalherbiziden Vorrang haben. Die Ursache liegt im Zielkonflikt zwischen der pfluglosen, schonenden Bodenbearbeitung zum Humusaufbau und der (tradierten) Notwendigkeit eines bedingungslos sauberen Saatbettes. Digitale und datengetriebene Innovationen, von einfachen, kameragesteuerten Hacke-Bandspritze-Systemen über genauere Bestimmung des Schaderregerdrucks zur Vermeidung hoher Aufwandmengen von PSM bis hin zum Einsatz von mit künstlicher Intelligenz (KI) ausgestatteten Drohnen, bedeuten für den landwirtschaftlichen Betrieb einen erheblichen Mehraufwand zur Bereitstellung von Daten und hohe Investitionskosten, die lediglich für große Betriebe wirtschaftlich sind. Darüber hinaus ergab sich aus der Umfrage, dass sich viele Betriebe, nach eingehender Beratung durch die Landwirtschaftskammer des Landes Nordrhein-Westfalen, gegen eine Umstellung auf einen Ökolandbau ohne chemisch-synthetische PSM entschieden haben: Die Vermarktung der Produkte in einem gesättigten Umfeld ist schwierig und es mangelt am Markt an den notwendigen zusätzlichen Arbeitskräften. Die grundlegende strategische Umstellung der Betriebe (zum Beispiel auf Gemüsebau mit Tierhaltung statt reinem Ackerbau) ist finanziell nicht darstellbar. Insgesamt ist der Grad der Implementierung der eigentlichen Grundsätze des IPS in den einzelnen landwirtschaftlichen Betrieben sehr unterschiedlich. Die Spanne reicht von der Umsetzung einzelner Maßnahmen und der konsequenten Anwendung als gesamtbetriebliches Konzept.

Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Aus der Vielzahl und Vielfalt der Studien lassen sich durch systematische Analyse und mit Hilfe der neuentwickelten Bewertungsmetrik allgemeine Schlussfolgerungen und Empfehlungen ableiten.

Es ist deutlich geworden, dass die Entwicklung einer an der Ökologie der typischen Arten ausgerichteten naturräumlichen Infrastruktur der Agrarlandschaften das größte Potenzial zur Verbesserung der Situation der Biodiversität haben. Es müssen naturnahe Lebensräume in direkter Umgebung der landwirtschaftlichen Flächen als Kern-Komponenten geschaffen werden. Eine solche strategische Entwicklung bedingt gleichzeitig eine Verminderung der Abhängigkeit von chemisch-synthetischen PSM. Viele der nicht-chemischen Maßnahmen des IPS sind zwar grundsätzlich in den landwirtschaftlichen Betrieben bekannt, es fehlt aber sowohl dort als auch

in den beratenden Institutionen neben finanziellen Anreizen an Wissen, Überzeugung und Akzeptanz, die bestehenden Konzepte konsequent umzusetzen. Die Vermittlung des Wissens ist von zentraler Bedeutung, weil die nicht-chemischen PS-Methoden des IPS und darüberhinausgehende Konzepte eines nachhaltigen Agrarlandschafts-Managements davon leben, dass die Einzelmaßnahmen effektiv miteinander kombiniert werden. Zahlreiche übergreifende Studien haben gezeigt, dass Anbausysteme mit stark verringerten Umwelt- und Gesundheitsrisiken durch die reduzierte Verwendung von PSM bei sehr geringen Ertragseinbußen umsetzbar sind.

Die vorliegende Studie zeigt, dass eine erhebliche Informationsmenge für die meisten Methoden des IPS vorhanden ist. In einzelnen, wichtigen Bereichen sind dennoch Defizite des Wissens identifiziert worden. Es fehlt an validen, aussagekräftigen und systematischen Studien, die IPS-Maßnahmen im Freiland unter den realen Bedingungen landwirtschaftlicher Praxis untersuchen. Ebenfalls mangelt es an Informationen zu den Effekten von kombinierten Maßnahmen in Bezug auf die Anwendungsflächen mit ihrer standortspezifischen ökologischen Ausstattung. Wir schlagen vor, diesen Forschungsbedarf in bestehende oder in der Entwicklung befindliche Monitoringprogramme der Biodiversität und des PSM-Einsatzes zu integrieren, um Synergien und bestehende Strukturen nutzen zu können. Wir sind überzeugt, dass die Ziele des Europäischen Green Deals und der F2F-Strategie mit dem vorhandenen Instrumentarium an Methoden und Konzepten erreichbar sind. Eine nachhaltige Landwirtschaft braucht weit umfassendere und multifunktionale Konzepte der Flächennutzung und des naturnahen Landschaftsmanagements, ein wirtschaftlich solides Geschäftsmodell und eine gesamtgesellschaftliche Anstrengung. Ein insgesamt verringerter Konsum der Güter aus Land- und Ernährungswirtschaft muss darin eingeschlossen sein.

Summary

Research question and objectives

Agroecosystems can only be preserved in the long term in their ecological inventory, performance, and functional capacity if they have a regionally typical, structurally, and functionally diverse character. Diversity refers to all aspects of modern agriculture. It includes the diversity of farming systems, livestock and crops, and wild-animal and -plant populations. The decline of species diversity within most groups of organisms, such as insects, farmland birds and wild plants in agricultural landscapes, is due to the loss of habitats and the prevailing intensive farming practices. The associated use of plant protection products with different modes of action often applied as mixtures in close succession over a cropping season, plays a decisive role in this.

To reduce the impact of pesticide use, the European Commission has committed itself to clear reduction targets when formulating the European Green Deal objectives and core strategies (such as the F2F-Strategy and Sustainability Strategy for Chemicals). The risks from plant protection products and the number of highly hazardous pesticides are to be reduced by fifty per cent by 2030 at the latest. Legally binding legislation (in the form of regulations) for implementing these targets in the European member states has been laid down in the new regulation on the sustainable use of pesticides (SUR) and must be concretely implemented in National Action Plans.

The concept of Integrated Pest Management is anchored in most European farming systems as *Good Agricultural Practice*. It is an essential instrument for achieving reduction targets and protecting biodiversity within conventional farming systems. Integrated Pest Management in arable farming has the primary objective of minimising the use of chemical-synthetic plant protection products to control harmful organisms to the economically necessary level. The control is realized using preventive ecological measures and biological, mechanical, and thermal pest control in preference to chemical plant protection. Integrated Pest Management is based on the principles of prevention, monitoring of pest populations and using decision support systems for farmers to avoid interventions as far as possible. If pest density exceeds defined thresholds, further measures cannot be avoided. Integrated Pest Management is implemented according to the following principles: (1) a mandatory preference for non-chemical methods, (2) the selection of pesticide products that pose only low environmental risk, and (3) the reduction of the quantity of plant protection products used to the lowest possible level. However, member states have implemented the reduction targets formulated by the European Commission insufficiently so far. Despite numerous support measures and subsidies, the Common Agricultural Policy provides limited incentives for farmers to fully implement Integrated Pest Management concepts.

In the present study, eighteen categories of measures of Integrated Pest Management were defined and assigned to the literature references.

1. Alternative *Plant Protection Products*
2. Sowing date
3. Economic threshold
4. Biocontrol agents
5. Land conservation
6. Digital support systems & precision farming
7. Mechanical pest control & physical barriers
8. Semi-natural habitats
9. Natural enemies
10. Ecological farming & management
11. Prevention
12. Low-risk *Plant Protection Products*
13. Pest resistant varieties
14. Conservation – no tillage
15. Site-specific varieties & intercropping
16. Partial area application
17. Diverse crop rotation
18. Knowledge transfer

The present study aims to compile the current state of knowledge on the ecological effectiveness and preferability of individual and combined *Integrated Pest Management* measures and to weight them in an evaluation system. The focus is on relevant crops in the EU, especially in Germany. Integrated Pest Management measures that are applied in current agricultural practice and whose effectiveness is recognised for efficient plant protection have been identified.

The evaluated measures should have proven effective for improving ecological quality and species diversity of agricultural landscapes. It is assumed that *Integrated Pest Management*, with its diverse methods of plant protection without using chemical-synthetic plant protection products, has the potential to ensure the conservation of an essential part of biodiversity and the connected ecosystem functions in intensively used agricultural landscapes. This study focuses on measures of integrated pest management that are suitable for reducing the use of pesticides or promoting biodiversity in agroecosystems.

Methodological approach literature research

Searching the available literature refers to the overarching topic of *Integrated Pest Management*. The study has specifically identified topical methods and measures that impact key parameters causing ecological benefit and a clear potential for reducing the environmental risks posed by plant protection products. The international bibliographic citation and abstract database SCOPUS® was searched using search phrases applying a systematic approach. The search phrases have been combined from three search terms each: (1) information on the superordinate topic area, (2) information on a measure of Integrated Pest Management and (3) information on the effects of a given measure evaluated on indicators of biodiversity or of the reduction of pesticide use. The search terms have been defined in German and English with corresponding synonyms to supply a broad overview of the peer-reviewed literature and, thus, scientific knowledge on the topic.

In addition to the systematic search strategy, the backward and forward snowball search strategy has been applied based on highly relevant review articles. The strategy involves

searching for publications relevant to the topic in the references cited therein (*backward snowballing*, referring to the publication date of the cited publications) to expand knowledge in a targeted manner. Up-to-date literature can be covered with this method by systematically searching for the relevant sources found as citations in publications of more recent date (*forward snowballing*).

Searching both directions while combining the search strategies builds an overall picture of the Integrated Pest Management measures and their effects on biodiversity.

Description of the literature corpus

As a result, the systematic search found 12 000 publications. About one-third came from the research field of environmental sciences, and two-thirds from agricultural sciences. The historical development becomes clear from the data, as scientific interest in Integrated Pest Management has increased massively since the 1990s. This development can be explained by the political course set in the era when Integrated Pest Management was included as a guiding principle of modern cultivation practice in the German Plant Protection Act in 1987 and the European Directive on the placing of plant protection products on the market (91/414/EEC) in 1991.

Within the *Agenda 21* of the United Nations Conference on Environment and Development in Rio de Janeiro in 1991, Integrated Pest Management was called the *optimal solution for the future*. These national and international developments led in the 1990s to the establishment of various funding programmes in the Federal States in Germany. The programmes should support Integrated Crop Management and Integrated Plant Protection. The global distribution of publications reflects a high scientific interest in the feasibility of Integrated Pest Management methods on all continents. The countries with the most intensive research activity worldwide include the USA, China, India and Australia, and Brazil in South America and Canada on the North American continent. Before assessing the content of the results of the systematic literature search, the number of literature references had to be narrowed down to a manageable number of eighty publications using defined criteria. The first authorship should be associated with an institution from the countries of the European Union to exhibit the geographical relevance of the agricultural practice in Europe. The hit list was limited in a second step to the years 2017-2021 for original articles and to a more extended period between 1990 and 2021 for review articles. The hit list has been reduced to reflect the historical development of *Integrated Pest Management* and the weighting of more recent developments. The relevance of a study has been determined based on the number of citations.

Further evaluation has been conducted for the upper 5 % of most-cited publications for original articles and the upper 10 % for reviews. In addition, about seventy publications, recent review articles, have been included in the evaluations in the snowball search. Overall, 150 publications have been evaluated.

Semi-quantitative evaluation metric

Our study intends to make measures for controlling pests in arable farming from different areas of the overall *Integrated Pest Management* concept comparable. In this way, their effectiveness in improving biodiversity parameters and reducing the use of plant protection products has been evaluated, and recommendations for individual measures or combinations of measures have been developed. A standardised measure, the *INTEGER-score*, has been developed specifically for this purpose. The *INTEGER-score* integrates the ecological effectiveness of a measure in comparison to a reference situation, that is, the conventional plant protection practice in intensive farming systems.

The *INTEGER-score* comprises the *evaluation-score B* and the *intensity-score I*. The *INTEGER-score* summarises all findings from the literature identified for a distinct measure-effect combination.

For the *evaluation-score B* applies: Compared to the reference situation, changes in the considered parameters using *Integrated Pest Management* methods are described as a negative score with discrete values of - 1 to - 3 if the respective publication has detected a negative change through the measure. Positive scores with discrete values between 1 and 3 reflect an improvement of the respective indicator. The expert evaluation is only conducted for measure-effect combinations that have experienced a change through *Integrated Pest Management* practice, so the *evaluation-score B* cannot take the value 0.

In addition to score *B*, an *intensity-score I* is defined for each relevant literature piece, reflecting the statement's strength. The strength of the statement is also derived from expert opinion; the main criteria used are the data basis that supports the publication's conclusions, the study's timeliness and the fit for the measure-effect combination examined. The intensity score *I* can take on values between 1 and 5. A score of 5 stands for the highest possible significance; studies with an *I*-score of 1 have an exceptionally low significance for adding value to the assessment of the ecological preferability of a measure-effect combination.

The normalised total score is obtained by multiplying the partial scores *B* and *I* for each measure-effect combination and dividing by the maximum possible total score (for $I_{max}: 3 \times B_{max}: 5 = 15$). The *INTEGER-score* lies in the range between - 1 and 1. By summing the total scores of all pieces of literature of a measure-effect combination and dividing by the number *n* of these considered pieces of literature, a mean *INTEGER-score* is calculated for each considered combination. The maximum value of 1 means that the considered IPM measure has the best possible positive impact on the considered ecological dimension. A negative value of - 1 corresponds to a negative impact on the judged environmental parameter.

Semi-quantitative assessment of the literature corpus

From the data analysis, it becomes clear that a high proportion of the research papers considered have found a reduction in plant protection products due to non-chemical plant protection measures. This reduction has usually not been the focus of the research, and the authors rarely quantified it precisely. The trend became obvious that various measures can reduce plant protection products use. Measures of biological pest control, alternative plant protection products, the selection of pest-resistant varieties, the use of digital decision support systems and methods of precision tillage have been considered particularly effective. The experience of many generations of farmers has shown that establishing a multipartite crop rotation offers a particularly efficient way to achieve the reduction targets concerning the environmental risks caused by plant protection products. However, only one study supports this statement by a quantitative evaluation.

Many publications describe the effects of *Integrated Pest Management's* non-chemical methods on crops' resistance management and the promotion of biodiversity. Promoting biodiversity is attributed to improved natural infrastructure (marginal structures, semi-natural habitats in the agricultural landscape). Surprising gaps have appeared in the literature analysis for the effectiveness of *Integrated Pest Management* on soil quality and function, which are essential components of sustainably functioning, productive agriculture. Promoting beneficial insects as an effect of *Integrated Pest Management* measures is also primarily associated with developing natural infrastructure and is positively influenced by this measure. Concerning other measures, only limited information has been collected. This applies to digital tools such as decision support systems for early detection and targeted control of pests. Notably, the grey literature suggested these methods as beneficial for efficient, modern agriculture with the lowest possible use of

chemical-synthetic plant protection products. However, according to recent studies, little is known about the practical effects of these measures on the natural balance.

As a supplement to the literature review and in order to shed light on key aspects of practical feasibility and incentive setting at the level of an individual farm, a reality check shed light through interviews and discussions with farmers from the wider Aachen region in Western Germany on the equally important aspect of practical feasibility and incentives at an individual farm level. It has become clear that the pyramid of measures of *Integrated Pest Management* has been systematically turned upside down in many arable farming systems. This means that farmers do not prioritise the preventive measures, e.g., weed suppression before sowing but chemical measures with the application of total herbicides. The reason is the trade-off between no-tillage systems for better humus build-up and the (traditionally transmitted) need for an unconditionally clean seedbed. Digital, data-driven innovations, from simple, camera-controlled hoe-band sprayer systems over more precise determinations of economic thresholds to avoid high pesticide application rates to using drones equipped with artificial intelligence software, mean considerable added work for the farm to provide data. Additionally, high investment costs are only valuable for large farms. Many farms have decided against converting to organic farming after receiving detailed advice from the Chamber of Agriculture of the Federal State of North Rhine-Westphalia: Marketing the products in an economically saturated environment is complex, and there is a lack of the necessary added personnel. The actual strategic conversion of the farms (for example, to vegetable production with livestock instead of pure arable farming) is not financially possible. Overall, the degree of anchoring and implementation of the principles of *Integrated Pest Management* in agriculture varies significantly between the implementation of a few individual measures to the application of a whole-farm concept.

Conclusions and recommendations

From the multitude and diversity of individual studies, general conclusions and recommendations have been derived from the newly developed evaluation metrics.

It has become clear that the development of a natural infrastructure of agricultural landscapes oriented towards the ecology of typical species has the greatest potential for improving the situation of biodiversity. Near-natural habitats in the immediate vicinity of agricultural land must be created as core components. Such strategic development simultaneously requires reducing dependence on chemical-synthetic plant protection products. Although many of the non-chemical measures of *Integrated Pest Management* are known in principle on farms, there is a lack of knowledge, conviction, and acceptance, both there and in the advisory institutions, in addition to financial incentives, to consistently implement the existing concepts. The transfer of knowledge is of crucial importance because the non-chemical plant protection methods of the *Integrated Pest Management* and concepts of sustainable agricultural landscape management go beyond this from the fact that the individual measures are effectively combined. Numerous overarching studies have shown that farming systems with reduced environmental and health risks through the reduced use of chemical-synthetic plant protection products can be implemented with very low yield losses.

The present study shows that a wealth of information is available for most of the methods of *Integrated Pest Management*. Nevertheless, deficits in knowledge have been identified in important areas. There is a lack of good, meaningful, and systematic studies that examine *Integrated Pest Management* measures in the field under the real conditions of agricultural practice. There is also a lack of information on the effects of combined measures concerning the application areas with their site-specific communities. We propose to integrate this research need into existing or developing monitoring programmes of biodiversity and plant protection product use in order to be able to use synergies and existing structures. We are convinced that

the goals of the European Green Deal and the F2F-Strategy are achievable with the existing toolbox of methods and concepts. Sustainable agriculture needs far more comprehensive and multifunctional concepts of land use and nature-based landscape management, an economically sound business model and a society-wide effort. An overall reduction in the consumption of goods from agriculture and the food industry must be included.

1 Hintergrund & Zielsetzung

1.1 Verlust der Artenvielfalt

Der Rückgang der floristischen und faunistischen Artenvielfalt in allen wasser- und landlebenden Organismengruppen ist wissenschaftlich gut belegt, weithin anerkannt und als drängendes Problem längst von politischen Entscheidungsträgern in den Fokus genommen worden. So ist die Insektenvielfalt in dramatischer Weise durch die Intensivierung der landwirtschaftlichen Flächennutzung, die zunehmende Urbanisierung und durch zahlreiche weitere anthropogene Stressoren gefährdet. Zwei Drittel der weltweiten Insektenpopulationen nehmen rapide ab und ein Drittel ist bereits akut vom Aussterben bedroht (Sánchez-Bayo & Wyckhuys, 2019, Van Klink et al., 2020). Die Belege für den Artenschwund sind eindeutig und rechtfertigen sofortigen, politisch gestalteten Handlungsbedarf in Zusammenarbeit mit der Wirtschaft und der Zivilgesellschaft, ohne dass weitere Forschungsergebnisse abgewartet werden müssen (Forister et al., 2019).

PSM spielen in den meisten veröffentlichten Studien, die sich eingehender mit den Ursachen und den einzelnen Faktoren des Artenrückgangs in Agrarlandschaften befassen, eine signifikante Rolle (Schäffer et al., 2018). Sie wirken auf alle Komponenten der Agrarbiodiversität, wie beispielsweise auf Pflanzen, auf terrestrische Arthropoden, auf aquatische Organismen, auf Bodenorganismen, auf Vögel und auf andere Wirbeltiere, und dies sowohl auf den Produktionsflächen als auch in angrenzenden nicht-agrarisch genutzten Strukturen (Freier et al., 2017, Outhwaite et al., 2022).

In der wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Wahrnehmung ist ein weltweiter Meinungstrend zu beobachten, der die Transformation der Landwirtschaft von der heutigen intensiven, umweltschädlichen Form in nachhaltigere, aber trotzdem produktive Anbaukonzepte fordert.

Die Dringlichkeit einer tiefgreifenden Reform der aktuellen landwirtschaftlichen Praxis wird am Kabinettsbeschluss der Deutschen Bundesregierung vom Juli des Jahres 2020 deutlich. Dabei ist die Erarbeitung von Empfehlungen für die nachhaltige Transformation der Landwirtschaft unter Berücksichtigung ökologischer, ökonomischer und sozialer Aspekte in einer *Zukunftskommission Landwirtschaft* (ZKL) angestoßen worden. In der ZKL arbeiten erfahrene Persönlichkeiten aus den Bereichen Landwirtschaft, Wirtschaft und Verbraucher, Umwelt und Tierschutz sowie der Wissenschaft zusammen. Im Juni 2021 empfiehlt die ZKL abschließend grundsätzliche, direkt umzusetzende Maßnahmen, die dem Erhalt der Biomasse und der Biodiversität in Agrarökosystemen dienen sollen. So sollen biodiversitätsfördernde Landnutzungssysteme etabliert, Habitatstrukturen in der Agrarlandschaft angelegt, die Belastungen durch PSM und Nährstoffeinträge minimiert und in die landwirtschaftlichen Produktionssysteme (im Sinne des IPS) eingebettete Maßnahmen zur Förderung der Biodiversität implementiert werden (ZKL, 2021).

1.2 IPS – Historie und Instrumente

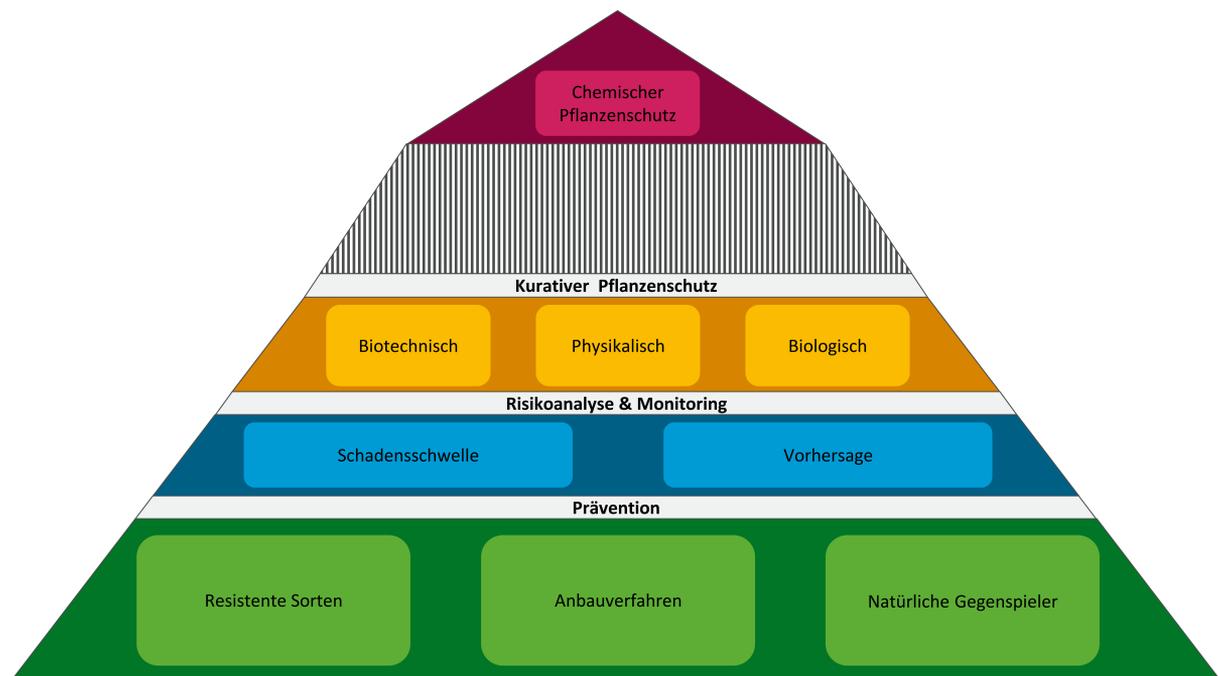
Das seit den 1950er Jahren ursprünglich von Entomologen zur Bekämpfung von Insekten als Pflanzenschädlingen vorgeschlagene Konzept des Integrierten Pflanzenschutzes (*Integrated Pest Control*, *Integrated Pest Management*, im Folgenden immer als IPS abgekürzt) vereint ökologische Prinzipien und ökosystemare Zusammenhänge mit einem multidisziplinären Ansatz. Der IPS soll praktikabel und ökonomisch, sowie effektiv und protektiv für die menschliche Gesundheit und die Umwelt sein (Smith et al., 1976). Das Konzept findet als *Gute Landwirtschaftliche Praxis* bei der Bekämpfung aller Schädlinge im Pflanzenbau seine Anwendung und soll den landwirtschaftlichen PS-Ratgebern zufolge dem chemischen PS vorangestellt werden (zum Beispiel LWK-NRW, 2015). Das vorrangige Ziel einer modernen

Ausprägung des IPS im Ackerbau ist es, den Einsatz chemisch-synthetischer PSM zu minimieren (auf das *notwendige Maß* beschränkt und als *ultima ratio*), wobei vorbeugende Maßnahmen sowie biologische, mechanische und thermische Schädlingsbekämpfung zum Einsatz kommen (Freier & Dachbrodt-Saaydeh, 2018).

In Deutschland ist der IPS bereits seit 1987 mit seinen alternativen Ansätzen gesetzlich verankert (§3 PflSchG mit Verweis auf die Richtlinie 2009/128/EG zur nachhaltigen Verwendung von PSM).

Entwicklungen im Obstbau markieren den Startpunkt eines angewandten IPS. In den neunzehnhundertfünfziger Jahren ist im Rheintal die gebietsfremde San-José-Schildlaus (*Quadraspidiotus perniciosus* Comstock, Hemiptera, Homoptera, Diaspidinae) mit einem spezifischen Endoparasiten (der parasitischen Wespe *Prospaltella perniciosi*, Hymenoptera, Aphelinidae) bekämpft worden. Vertreter*innen aus Wissenschaft, Behörden und der Praxis haben dies in Kooperation und einer gemeinsamen Aufbauarbeit geschafft (Galli, 2005). Das Resultat ist die Maßnahmenpyramide des IPS (Abbildung 1). Vorrangig sind präventive Maßnahmen (im grünen Balken von Abbildung 1) umzusetzen und erst nach sorgfältiger Beobachtung des Bestandes und der Erreichung der ökonomischen Schadschwelle (auch *Bekämpfungsschwelle*, im blauen Balken von Abbildung 1) sollen direkte PS-Maßnahmen mit den notwendigen Interventionen ergriffen werden (in den gelben und dem roten Balken von Abbildung 1).

Abbildung 1: Maßnahmenpyramide des Integrierten Pflanzenschutzes (verändert nach LTZ, 2020).



Quelle: Eigene Darstellung, Darwin Statistics 2023

Direkte, kurative Pflanzenschutzmaßnahmen umfassen alle nicht-chemischen Verfahren, die zur Anwendung kommen, nachdem die ökonomische Schadschwelle überschritten worden ist. Im Obstbau sind auch biotechnische Verfahren etabliert. Dabei werden beispielsweise Larven schädlicher Wickler-Arten mit Pheromonzerstäubern verwirrt, um deren Paarung zu verhindern. Physikalische Verfahren zur Abwehr von Schadinsekten kommen in besonders wertvollen Kulturen zum Einsatz. Kulturschutznetze oder Vliese in Kirschen-Plantagen und im Gemüsebau oder Hack- und Striegelgeräte zur mechanischen Unkrautbekämpfung in Reihenkulturen wie Mais, Rübe oder Kartoffel im Ackerbau zählen zu den physikalischen

Verfahren. Biologische Maßnahmen können nicht-chemisch-synthetische PSM (Mikroorganismen, Pflanzenöle, teils als low-risk PSM eingestuft) oder die Freisetzung natürlicher Gegenspieler der Schädlinge umfassen. Natürliche Gegenspieler kommen sehr oft in Gewächshauskulturen zum Einsatz. Im Freiland werden Schlupfwespen der Gattung *Trichogramma* zur Bekämpfung von Maiszünslern eingesetzt. Die Förderung der natürlichen Gegenspieler im Landschaftskontext sollte als präventive, indirekte Maßnahme ohnehin ein Baustein eines umfassenden IPS-Konzeptes sein.

In einer viel zitierten Publikation strukturieren Barzman et al. (2015) die Maßnahmen des IPS, ähnlich wie in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Sie unterteilen den IPS in acht aufeinander aufbauende Prinzipien (siehe unten). Barzman et al. (2015) nehmen dabei die gesamteuropäische Situation in den Blick und beziehen sich auf die Bestimmungen zum IPS aus dem umfassenden PS-Regelungs-Paket zweier europäischer Richtlinien (2009/128/EC - Aktionsrahmen der Gemeinschaft für die nachhaltige Verwendung von Pestiziden, 2009/127/EC - Maschinen zur Ausbringung von Pestiziden) und zweier europäischer Verordnungen (EC/1107/2009 - Inverkehrbringen von PSM, EC/1185/2009 - Statistiken zu Pestiziden). Die Richtlinie 2009/128/EC enthält eine Definition für den Begriff *Pestizid*, der im Sinne der Verordnung 1107/2009/EG ein PSM und im Sinne der Richtlinie 98/8/EG ein Biozidprodukt sein kann.

Es wird insgesamt deutlich, dass im Garten- und Gemüsebau, ganz besonders in Gewächshauskulturen, die zu 90 % ohne chemisch-synthetischen PS auskommen, der IPS weitgehend implementiert ist. Im Ackerbau bestehen Defizite in der konkreten und vollständigen Umsetzung der Konzepte des IPS.

Die acht Prinzipien des IPS teilen sich in Maßnahmen, die vor einer Intervention durch biologische, biotechnische, mechanische oder chemische PS-Verfahren notwendig werden (Prinzipien 1 bis 3) und in Maßnahmen, die den Charakter einer Intervention haben (Prinzipien 4 bis 7). Der Erfolg von IPS-Maßnahmen wird durch eine rückblickende Bewertung überprüft (Prinzip 8).

In der vorliegenden Arbeit sind Kategorien zur Klassifizierung verschiedener Maßnahmen des IPS verwendet worden, die sich aus der Literaturrecherche ergeben haben. Im Kapitel 3.2 finden sich die Definitionen und Maßnahmen-Klassen, für die eine quantitative Bewertung durch *INTEGER-Score* erfolgte. In Tabelle 9 sind die acht Prinzipien P1 bis P8 des IPS den Kategorien zugeordnet und indiziert.

► **Prinzip 1 (P1) → Prävention** (keine Intervention)

Ein positives Beispiel für erfolgreiche Präventionskonzepte in Deutschland bietet das Demonstrationsnetzwerk IPS (Helbig et al., 2021). Es ist vom Demonstrationsnetzwerk gezeigt worden, dass durch die konsequente Anwendung von präventiv wirksamen IPS-Maßnahmen, die Anwendungshäufigkeiten von PSM signifikant reduziert werden können. Besonders hervorzuheben ist die Förderung der Diversität durch *intercropping*. *Intercropping* bezeichnet die räumliche Nähe mehrerer alternierender Kulturarten oder -sorten auf einem Schlag. Dadurch kann der Schaderregerdruck deutlich vermindert werden. Weitere effizient wirksame Präventionsmaßnahmen sind von Barzman et al. (2015) anhand von Beispielen vom afrikanischen Kontinent erläutert worden. Eine *push-pull*-Strategie gegen Stengelbohrer-Arten als Schädlinge in Mais ist erfolgreich angewendet worden. Bei dieser Methode sind durch die Anpflanzung einer abschreckend wirkenden Leguminosen-Art die Stengelbohrer aus dem Feld vertrieben und gleichzeitig durch die Pflanzung einer anziehend wirkenden Grassorte in den angrenzenden Randstreifen gelockt worden. Zusätzlich ist eine allelopathische Wirkung gegen

eine weitere problematische Grasart in den Randstreifen ausgenutzt worden (Cook et al., 2007, Khan et al., 2010).

Ergänzend zu den manipulativen Bekämpfungsstrategien, unterstreichen empirische Überprüfungen ökologischer Hypothesen die Wirksamkeit präventiver Maßnahmen. Die Hypothese, dass eine hohe regionale Biodiversität von Pflanzenarten oder das Vorhandensein standort-typischer Pflanzengesellschaften die schädlichen Effekte herbivorer Arthropoden verringern können, haben Barnes et al. (2020) erfolgreich experimentell bestätigt.

► **Prinzip 2 (P2) → Monitoring** (keine Intervention)

Die Beobachtung der Schaderregerpopulationen dient dazu, Frühwarnsysteme mit Daten zu füttern, um über Prognosemodelle und die zusätzliche schlagspezifische Bonitur bessere Entscheidungen zur Behandlung des Bestandes zu treffen. Ein solches Frühwarnsystem bietet in Deutschland das Informationssystem für die Integrierte Pflanzenproduktion (ISIP). Die Ergebnisse der Bonituren werden mit Wetterdaten und Computermodellen gekoppelt und können gute Vorhersagen zur Entwicklung der Schädlingspopulationen treffen.

► **Prinzip 3 (P3) → Entscheidungshilfesysteme** (keine Intervention)

Entscheidungshilfesysteme auf nationaler Ebene sind in mehreren europäischen Ländern zum Monitoring und zur Modellierung der aktuellen Belastung mit Schaderregern entwickelt worden. Sie dienen dazu, Überschreitungen ökonomischer (oder zukünftig ökologischer) Schadschwellen zu detektieren. Die Methode zur Festlegung der ökonomischen Schadschwelle wird in Abschnitt 3.2 besprochen. Systeme zur Bilanzierung einer ökonomischen Schadschwelle sind zum Beispiel in Dänemark, Deutschland, der Schweiz, in Frankreich oder multi-national zwischen verschiedenen EU-Mitgliedsstaaten (**EUROBlight**) etabliert worden. Eine ökologische Schadschwelle würde die zusätzlichen Kosten des PSM-Einsatzes durch die Auswirkungen auf die Biodiversität oder der damit verbundenen Ökosystemleistungen in die Entscheidung für oder gegen PS-Maßnahmen integrieren. Eine Bewertung mittels ökologischer Schadschwellen könnte im Vergleich zu einer rein ökonomisch ausgerichteten Schadschwellenbilanzierung einen höheren Schädlingsdruck oder eine höhere Toleranz gegenüber *Unkräutern* zulassen und somit seltener zur Entscheidung für einen PSM-Einsatz führen (Steinmann et al., 2021, siehe auch Abschnitt 3.4.2). Sie werden derzeit nicht zur Entscheidung über eine PSM-Behandlung einbezogen.

Eine wichtige Einschränkung des Schadschwellen-Prinzips besteht in der Notwendigkeit der wissenschaftlich fundierten Ableitung der Schwellenwerte. Solange noch keine Schwellenwerte definiert sind oder deren Festlegung wissenschaftlich umstritten ist, müssen andere Kriterien zur Festlegung der Strategie zur Schädlingsbekämpfung angewendet werden. Dies ist beispielsweise für Gräser der Fall, die in komplexen Lebensgemeinschaften, mit unregelmäßiger räumlicher Verteilung auftreten und langlebige Samenbanken im Boden ausbilden (Keller et al., 2014). Eine ähnliche Situation findet sich für pilzliche Schaderreger, die von einem eher harmlosen saprophytischen in einen pathogenen Zustand übergehen können. Hierbei sollte ein besonderes Augenmerk auf alle zur Verfügung stehenden IPS-Maßnahmen zur Prävention, auf das Monitoring und die Entwicklung eindeutiger Entscheidungsregeln gelegt werden. Generell wird der Vorschlag gemacht, dass neue Entscheidungshilfesysteme nicht nur auf *Spritzen-oder-nicht-Spritzen* geeicht werden, sondern dass die gesamte Bandbreite der IPS-Maßnahmen in einem integrierten Modell abgebildet werden muss.

► **Prinzip 4 (P4) → nicht-chemische Alternativen** (Intervention notwendig)

Der Einsatz nicht-chemischer Alternativen zu chemisch-synthetischen PSM kann forciert werden, indem die Kosten für den PSM-Einsatz von politischer Seite erhöht werden. Dies kann in

Form einer PSM-Abgabe oder Steuer, die derzeit in mehreren EU-Mitgliedstaaten diskutiert wird (Studie der [Europäischen Kommission, 2001](#), siehe auch Möckel et al., 2021), erreicht werden. Pheromone zur Verwirrung haben bisher unter den nicht-chemischen, biologischen Methoden die größte Wirkung im PS erzielt und in Apfelplantagen in der Schweiz zu Einsparungen PSM-Mengen um bis zu zwei Dritteln geführt. Nützlinge, die zur Kontrolle der Schädlinge in die Bestände eingeführt werden, sind in Gewächshauskulturen gut etabliert, ihre Anwendbarkeit birgt in Ackerbaukulturen noch großes Potenzial (Barzman et al., 2015). Die präventiven und nicht-chemischen Verfahren bieten auch in Kombination und bei konsequenter Anwendung nicht in jedem Fall eine ausreichende Erhöhung der Schadschwelle bzw. wenden den wirtschaftlichen Schaden vom landwirtschaftlichen Betrieb nicht vollständig ab. Nur nach Ausschöpfung aller Alternativen ist als letztes Mittel der Einsatz von chemisch-synthetischen PSM in Betracht zu ziehen.

► **Prinzip 5 (P5) → Auswahl der PSM** (Intervention notwendig)

Die Auswahl umweltverträglicher PSM ist ein weiteres Instrument des IPS, das allerdings eine Intervention erfordert. Ein Negativbeispiel aus der Schweiz hat in den späten 1970er-Jahren gezeigt, dass die Raubmilben-Populationen als natürliche Antagonisten von Schädlingen durch den Einsatz von nicht-selektiven PSM nahezu ausgerottet worden sind und verdeutlicht die Relevanz einer angepassten und möglichst spezifischen PSM-Anwendung (Barzman et al., 2015). Damals sind alle Milben-Schädlinge gegen die verfügbaren Akarizide resistent geworden und Nützlinge sind nachträglich wieder angesiedelt worden. Nach diesen Erfahrungen ist es notwendig, beim Einsatz von PSM darauf zu achten, dass möglichst spezifisch wirkende Substanzen zum Einsatz kommen, um die Populationen von Nützlingen zu schonen. Zum Zweck der Auswahl selektiver PSM stehen Datenbanken zur Verfügung, wie zum Beispiel die [IOBC-WPRS Pesticide Side Effect Database](#), [IPM Impacts Side Effects Database](#), [PPDB](#) und [BPDB der University of Hertfordshire](#), oder die [pesticideinfo.org](#) des Pesticide Action Network (PAN).

Das Inverkehrbringen von Bio-PSM, die entweder aus anderen Organismen extrahierte, natürliche Wirkstoffe oder Mikroorganismen (wie Viren, Bakterien oder niedere Pilze) enthalten, wird als sehr schwierig angesehen. Deren Zulassung ist mit ähnlichem administrativem Aufwand, wie für chemisch-synthetische PSM verbunden und nur für Anwendungen in großen Flächenkulturen wirtschaftlich darstellbar.

► **Prinzip 6 (P6) → Reduzierter PSM-Einsatz** (Intervention notwendig)

Reduzierte absolute Mengen und geringere Risiken für Mensch und Umwelt durch PSM sind ein erklärtes Ziel der EU-Politik (siehe unten). Eine mögliche Folge eines reduzierten PSM-Einsatzes bei einer erfolgreichen Implementierung des IPS kann ein Trend zu effektiveren, also toxischeren PSM sein. Dies kann zur Folge haben, dass trotz geringerer Absatzmengen Risikoindikatoren gleichbleibend hoch sind. Es sind daher aussagekräftige Indikatoren zu wählen. Allerdings ist die Auswahl der Risikoindikatoren bisher in den EU-Mitgliedsstaaten uneinheitlich.

► **Prinzip 7 (P7) → Anti-Resistenz Strategie** (Intervention notwendig)

Hier wird eine kontroverse Diskussion angeführt, ob geringe PSM-Aufwandmengen zu verstärkter Resistenzbildung führen. Die von den Autoren der Studie Barzman et al. (2015) aus den aktuellen Erkenntnissen (Neve et al., 2014, Owen et al., 2015) abgeleitete Schlussfolgerung lautet, dass die Resistenz-Ausbildung nicht allein vom Muster des Herbizid- oder Insektizid-Einsatzes abhängt. Die ausschlaggebenden Faktoren sind vielmehr eine übermäßige Vereinfachung der Bewirtschaftungssysteme (Monokulturen, kurze Fruchtfolgen) und fehlende biodiversitätserhaltende Landschaftsstrukturen.

► **Prinzip 8 (P8) → Evaluation** (keine Intervention)

Die Bewertung des Erfolgs von IPS-Maßnahmen berührt die Notwendigkeit der Wissensvermittlung in Netzwerken aus Landwirtschaft, Wissenschaft und Politik. Die Evaluation soll zwingend mehrere Anbauperioden abdecken und nicht, wie bisher üblich, auf die aktuelle Anbaukultur abzielen. Es müssen verschiedene Anbaukulturen, mehrgliedrige Fruchtfolgen und komplexe Anbausysteme in die Bewertung einbezogen werden, um den nicht-interventionellen Maßnahmen und deren mittelfristig wirksamen Effekten Rechnung zu tragen.

Die Erfahrung aus der Zusammenarbeit mit Landwirtschaftstreibenden und aus den Empfehlungen zum PS (Warndiensthinweise) zeigt, dass die IPS-Pyramide in der Praxis oft auf den Kopf gestellt wird. Die positive Wirkung der pfluglosen Bodenbearbeitung, durch die Schonung der Bodenstruktur und dem Erhalt des Humusgehaltes, wird beispielsweise durch den obligatorischen Einsatz von Breitbandherbiziden (Glyphosat) zur Saatbettbereitung ausgehebelt. Direkte Effekte auf typische Ackerwildkräuter und indirekte Wirkungen durch eine geringere Nahrungsverfügbarkeit oder Habitatqualität für verschiedene Organismengruppen, führen zum Verlust der Diversität auf Nicht-Zielflächen wie, Randstreifen, Wegraine (Ottermanns et al., 2010). Die Warndiensthinweise der föderalen Landwirtschaftsinstitutionen enthalten zum großen Teil prophylaktische Empfehlungen zum Fungizideinsatz, ohne den individuellen Zustand des Bestandes und die Schadschwellen zu berücksichtigen. Schleswig-Holsteins Landwirtschaftskammer führt ein Beispiel für anlasslose Empfehlungen zur fungiziden Vollblütenbehandlung gegen Weißstängeligkeit, trotz geringen Befallsdrucks als *absichernde* Behandlungen in Wintergetreide und obligatorisch ausgesprochene Empfehlungen für Herbizideinsatz in Maiskulturen an (LWK-SH, 2011). Die EU-Kommission hat ebenfalls festgestellt, dass die Umsetzung des IPS in vielen Mitgliedstaaten, auch in Deutschland, unzureichend ist. Es ist ein *begrenzter Fortschritt bei der Messung und Verringerung von Risiken* beobachtet worden (Aussagen der EU-Kommission werden im Bericht des Europäischen Rechnungshofes zitiert, Europäischer Rechnungshof, 2020). Aufgrund dieser Defizite ist seit dem Jahr 2021 obligatorisch von jedem landwirtschaftlichen Betrieb in Deutschland ein Fragebogen zur Umsetzung des IPS auszufüllen und bei der PS-Kontrolle vorzulegen. Mit diesen Pflichtangaben wird lediglich die Umsetzung der acht Prinzipien des IPS im Betrieb dokumentiert, wohingegen bei Nichteinhaltung keine Sanktionen vorgesehen sind. Das Ausfüllen eines Fragebogens, der danach im Betrieb verbleibt und nicht für übergreifende Datenanalysen verwendet werden kann, lässt keine Änderung der Anwendungspraxis des IPS erwarten.

In den USA hat das Landwirtschaftsministerium USDA (United States Department of Agriculture) im Jahre 1998 die Strategie für einen IPS festgelegt. Die Strategie besagt, dass die Vorbeugung, Vermeidung, Beobachtung und Unterdrückung (Prevention, Avoidance, Monitoring, Suppression: PAMS) von Schädlingen und Pflanzenkrankheiten im Vordergrund stehen. Die Ziele, die mit der Festlegung der Strategie verbunden sind, wie zum Beispiel den IPS auf 75 % der Agrarfläche der USA in die Praxis umzusetzen, sind bei Weitem nicht erreicht worden. In den USA (Fläche unter IPS 4-8 %), wie auch in vielen weiteren Staaten von Brasilien bis Zimbabwe ist der Anteil der konsequent nach den IPS-Prinzipien bestellten Flächen verschwindend gering, obwohl die Konzepte allorts bekannt sind (Ehler & Bottrell, 2000).

In Deutschland gibt der Nationale Aktionsplan Pflanzenschutz (NAP) die Ziele und Erwartungen an einen IPS vor (BMELV, 2013). Die Grundsätze und das Leitbild sind für alle Anwender*innen von PSM gültig.

1.3 Zielsetzung des Literaturreviews

Es sind zahlreiche Methoden im IPS für den Aufbau einer nachhaltigen Landwirtschaft in der Praxis verfügbar. Nach wie vor mangelt es jedoch an einer systematischen Untersuchung und Gegenüberstellung hinsichtlich der Frage, welche Ansätze insbesondere aus ökologischen Erwägungen empfohlen werden können. Solche Maßnahmen tragen erwiesenermaßen zu einer erhöhten Artenvielfalt und Resilienz von Nichtzielorganismen-Populationen bei und haben zudem einen verringerten PSM-Einsatz im und neben den Anbauflächen zur Folge.

Das Ziel dieser Studie ist es, den Wissensstand aus national und international verfügbarer Literatur zur ökologischen Wirksamkeit von IPS-Maßnahmen für in Deutschland relevante Kulturen systematisch zusammenzutragen. Dabei sollen die Maßnahmen des IPS untersucht werden, die in der landwirtschaftlichen Praxis Anwendung finden, und somit ihre Wirksamkeit für einen effektiven PS allgemein anerkannt und akzeptiert wird. Neben der Praxistauglichkeit, die nicht in allen wissenschaftlichen Publikationen im Vordergrund steht und berichtet wird, sollen IPS-Maßnahmen eine nachgewiesene Wirksamkeit für die Verbesserung der ökologischen Qualität und für die Erhöhung der Artenvielfalt besitzen, ohne dass es systematisch zu Ertragsminderungen kommt.

Die hypothetische Annahme gilt: Der IPS mit seinen vielfältigen Maßnahmen jenseits des Einsatzes chemisch-synthetischer PSM hat Potenzial, den Erhalt der Biodiversität, die daraus resultierenden Ökosystemfunktionen und eine insgesamt verbesserte Umweltqualität in intensiv genutzten Agrarlandschaften zu sichern.

In der vorliegenden Studie werden vornehmlich IPS-Maßnahmen identifiziert, die geeignet sind, (1) den Einsatz von PSM zu reduzieren oder (2) die Biodiversität in Agrarökosystemen zu fördern. Beide Faktoren werden in dieser Studie als Schlüsselparameter einer ökologischen Vorzugswürdigkeit angesehen. Die Informationen zur ökologischen Vorzugswürdigkeit von IPS-Maßnahmen stellen die Grundlage dar, um die Erreichbarkeit der Ziele des Green Deal (mit seiner F2F-Strategie) und der neuen Gemeinsamen Agrarpolitik in der EU einzuordnen und den Handlungsbedarf in Bezug auf die Auswahl der IPS-Maßnahmen zu konkretisieren.

Die Suchstrategie der Recherche ist breit angelegt und umfasst ausgewählte Maßnahmen aus dem weiter gefassten Bereich *Integrierter Pflanzenbau* (siehe Kapitel 1.4, Begriffsbestimmung). Nationale und internationale Vorgaben der Mitgliedstaaten und der EU, wie sie sich zum Beispiel aus der Richtlinie 2009/128/EC zur nachhaltigen Verwendung von PSM ergeben (European Union, 2009A), sollen eine Reduktion der Einsatzmengen und Risiken von PSM zur Folge haben. Da die nachhaltige Verwendung von PSM bisher mit dem Rechtsakt einer Richtlinie sichergestellt werden soll, obliegt die Umsetzung von Maßnahmen zur Erreichung der Reduktionsziele den Mitgliedsstaaten. Eine umfassende Umsetzung der Richtlinie 2009/128/EC lässt insgesamt positive Wirkungen auf die Biodiversität verschiedener Organismengruppen in intensiv genutzten Agrarlandschaften und der unmittelbaren Umgebung der Anbauflächen erwarten. Eine fundierte Einschätzung der Wirksamkeit von Maßnahmen des IPS im Sinne einer ökologischen Vorzugswürdigkeit sind bedarf dennoch einer Übersicht über die wissenschaftliche Evidenz. Die Umsetzung der ökologisch wirksamsten Maßnahmen sollte zukünftig weiter ausgebaut werden. Umgekehrt sollen Maßnahmen mit einer geringen Effizienz zur Erreichung der Umweltschutzziele identifiziert werden, damit diese im weiteren politischen Diskurs nicht prioritär weiterverfolgt werden. Ebenfalls wird geprüft, welche Maßnahmen zu Zielkonflikten führen können. Ein Zielkonflikt aus Sicht der Landwirtschaftstreibenden kann zum Beispiel entstehen, wenn die Reduktion der Intensität des chemischen Pflanzenschutzes mit wirtschaftlich relevanten Ertragseinbußen einhergeht. Offen bleibt, wie Effekte auf die Biodiversität auf und um landwirtschaftlich genutzte Flächen quantifiziert und nach ihrer umweltschutzfachlichen Wirkung priorisiert werden können. In dieser Studie wird untersucht,

welche innovativen Maßnahmen erfolgreich im IPS angewendet und welche ökologischen Wirkungen in der wissenschaftlichen und grauen Literatur beschrieben werden. Für welche alternativen und PSM-freien IPS-Maßnahmen gibt es ausreichende Hinweise auf ihre Wirksamkeit zum Schutz der Kulturpflanze bei gleichzeitiger ökologischer Vorzugswürdigkeit? Für welche Maßnahmen gibt es noch keine glaubwürdigen wissenschaftlichen Belege?

Die Ergebnisse der Literaturstudie werden zu einer integrierten, semi-quantitativen Bewertung zusammengefasst und erlauben vergleichende Rückschlüsse auf die Wirksamkeit einzelner IPS-Maßnahmen und deren Kombination bezogen auf die beiden Faktoren *Biodiversitätsschutz* und *PSM-Reduktion*.

1.4 Begriffsbestimmungen IPS

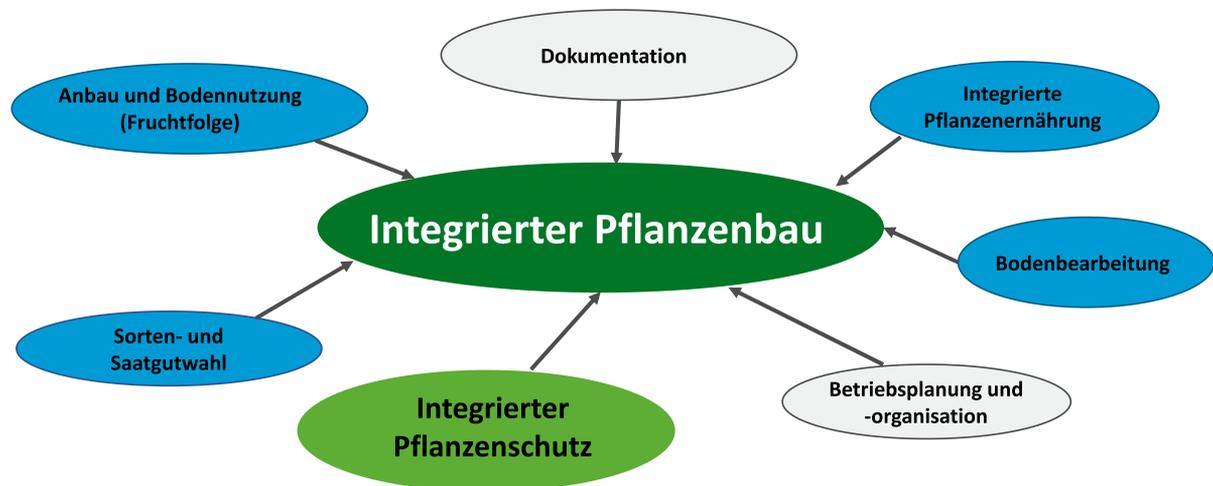
Zur begrifflichen Eingrenzung der in diesem Literaturreview untersuchten Maßnahmen des IPS, ist die historische Einordnung des IPS als wesentlicher Bestandteil des Integrierten Pflanzenbaus herangezogen worden. Unter dem Integrierten Pflanzenbau wird dabei die Betrachtung und optimale Kombination verschiedener Bausteine des *ganzheitlichen Systems der Pflanzenproduktion* verstanden (Abbildung 1), die zu einer umweltschonenden und nachhaltigen Landbewirtschaftung führen (Priestel, 1997). Neben biologischen und biotechnologischen Maßnahmen werden dabei auch betriebsplanerische, wirtschaftliche und verwaltungstechnische Prozesse berücksichtigt.

In den Beschreibungen des IPS in der Literatur seit den 1960er-Jahren finden sich zahlreiche Definitionen des Konzeptes, die sich über die Zeit immer wieder geändert und angepasst haben. Im Jahr 2002 fanden Bajwa und Kogan schon 67 unterschiedliche Definitionen des IPS, während Deguine et al. (2021) geschätzt haben, dass es aktuell mehr als 100 abgrenzbare Definitionen in der Literatur gebe. Die meisten IPS-Konzepte zielen auf eine sozio-ökonomische Durchführbarkeit der spezifischen Maßnahmen, auf die Integration verschiedener Schädlingsbekämpfungstechniken und auf eine Entwöhnung der Landwirtschaft von chemisch-synthetischen PSM ab (Deguine et al., 2021).

Eine umfassend formulierte Definition des IPS berücksichtigt eine Kombination von unterschiedlichen biologischen, biotechnischen, pflanzenzüchterischen sowie anbau- und kulturtechnischen Maßnahmen (in Abbildung 2 blau gekennzeichnet), die zu einer Reduktion des chemischen PS auf das *notwendige Maß* führen können (so auch definiert im deutschen PS-Gesetz, PflSchG 1987, aktuelle Fassung vom 6. Februar 2012). Der IPS wird somit für die vorliegende Studie als Bestandteil des Integrierten Pflanzenbaus als einer erweiterten Begriffsdefinition des IPS (grüne Bausteine in Abbildung 2) unter Berücksichtigung weiterer pflanzenbaulicher Maßnahmen (blaue Bausteine *Anbau und Bodennutzung (Fruchtfolge)*, *Sorten- und Saatgutauswahl*, *Pflanzenernährung* und *Bodenbearbeitung* in Abbildung 2) definiert. Die grau hinterlegten Bausteine *Dokumentation* und *Betriebsplanung und -organisation* in Abbildung 2 finden als allein betriebswirtschaftlich relevante Komponenten keine besondere Berücksichtigung in der Literaturrecherche.

In der vorliegenden Studie bildet diese erweiterte Definition die Grundlage für die Benennung von IPS-Maßnahmen und deren Klassifikation, die im Weiteren zur Gewichtung ihrer Bedeutung und Wirksamkeit verwendet wird (Kapitel 3.2). Im Anhang III der Richtlinie 2009/128/EC (Europäische Union, 2009A) werden mögliche Maßnahmen für die Zielerreichung eines IPS spezifiziert.

Abbildung 2: Komponenten des Integrierten Pflanzenbaus (entnommen aus Priestel, 1997).



Quelle: Eigene Darstellung, Darwin Statistics 2023

Dabei werden unter anderem eine geeignete Fruchtfolge, die Anwendung standortspezifischer Kultivierungsverfahren, Düngeverfahren und der Schutz sowie die Förderung von Nutzorganismen, zum Beispiel durch den Aufbau einer ökologischen Infrastruktur (innerhalb und außerhalb der Anbaufläche), genannt. Wenn die Schädlingsbekämpfung *zufriedenstellend* mit biologischen, physikalischen und anderen nicht-chemischen Methoden durchgeführt werden kann, so sollten diese Maßnahmen dem chemischen PS vorgezogen werden.

Die Richtlinie 2009/128/EC definiert in einer mit den vorgenannten Begriffsbestimmungen äquivalenten Formulierung den IPS als *die sorgfältige Abwägung aller verfügbaren PS-Methoden und die anschließende Einbindung geeigneter Maßnahmen, die der Entstehung von Populationen von Schadorganismen entgegenwirken und die Verwendung von PSM und anderen Abwehr- und Bekämpfungsmethoden auf einem Niveau halten, das wirtschaftlich und ökologisch vertretbar ist und Risiken für die menschliche Gesundheit und die Umwelt reduziert oder minimiert. Der IPS stellt auf das Wachstum gesunder Nutzpflanzen bei möglichst geringer Störung der landwirtschaftlichen Ökosysteme ab und fördert natürliche Mechanismen zur Bekämpfung von Schädlingen.*

1.5 Methodische Vorgehensweise

Die Vorgehensweise bei der Evaluierung des Wissensstandes zur Wirkung von IPS-Maßnahmen auf umweltbezogene Schlüsselparameter besteht aus zwei aufeinander folgenden Schritten. Zunächst ist eine umfassende Literatursuche durchgeführt worden, bei der sowohl automatisierte Suchalgorithmen angewendet als auch eine manuelle, themenspezifische Suchstrategie genutzt worden sind. Die Herangehensweise wird in den Teilkapiteln 2.1.1 und 2.1.2 beschrieben. Anschließend ist eine Eingrenzung auf die für die Fragestellung relevantesten Studien erfolgt (Kapitel 2.3). Die im zweiten Schritt folgende inhaltliche und semi-quantitative Bewertungsstrategie der gefilterten Literatur ist in Kapitel 3 dargestellt (Wissensstand, gewichtende Bewertung & Bilanzierung). Hierbei sind die IPS-Strategien nach spezifischen Maßnahmen und den in den Publikationen betrachteten ökologischen Effekten (als umweltbezogene Schlüsselparameter) gruppiert und die entstehenden Maßnahme-Effekt-Kombinationen evaluiert worden. Um eine Einschätzung der verschiedenen Maßnahmen-Effekt-Kombinationen zu ermöglichen, sind Erkenntnisse aus den Studien in eine numerische Bewertungsmatrix überführt worden (siehe Kapitel 3.1). Schlussfolgerungen zum Wissensstand und Ableitungen hinsichtlich weiteren Forschungsbedarfes werden in Kapitel 4.4 beschrieben.

2 Literaturrecherche zu Maßnahmen des IPS

Relevante Literaturstellen zum Themenfeld *ökologisch wirksame Maßnahmen des IPS* sind mittels einer umfassenden Suchstrategie erfasst und anhand transparenter Kriterien für eine nachfolgende gewichtende Bewertung eingegrenzt worden.

2.1 Suchmethodik

Die Suche nach relevanten Publikationen, die Schlussfolgerungen zur Wirksamkeit der IPS-Maßnahmen erlauben, folgt zwei unterschiedlichen, komplementären Ansätzen: einer systematischen Suche in der internationalen wissenschaftlichen Literatur und einer fortpflanzenden, spezifischen Suchstrategie (Schneeballsuche). Die systematische Suche ist über Suchphrasen erfolgt, die aus zielgenau gewählten Suchbegriffen zusammengesetzt und in wissenschaftlichen Veröffentlichungen aus Online-Datenbanken abgefragt worden sind (Kapitel 2.1.1). Im Unterschied zur systematischen Suche pflanzt sich die Schneeballsuche ausgehend von besonders relevanten Beiträgen und Übersichtsartikeln immer weiter im Themengebiet fort (Kapitel 2.1.2). Die Schneeballsuche ermöglicht somit auch eine Orientierung über die graue Literatur (Stellungnahmen von Behörden, Vereinen und Nichtregierungsorganisationen -NGO), die mit der systematischen Suche nicht gefunden werden kann. Sie muss möglichst fokussiert durchgeführt werden, um die Umweltperspektive, also die Effekte der Maßnahmen des IPS auf die Biodiversität zu behalten. Das Instrument der Schneeballsuche kann effektiv eingesetzt werden, um eine fundierte Überprüfung der Relevanz und Qualität der Publikationen für diese Studie vorzunehmen und um den thematischen Rahmen weiter zu fassen. Auf diese Weise sind auch indirekte Zusammenhänge zwischen IPS-Methoden und einer ökologisch nachhaltigen Landwirtschaft, die nicht im unmittelbaren Fokus der meisten Publikationen stehen, für die vorliegende Studie identifiziert worden.

2.1.1 Systematische Suche

Die systematische Suche ist in der bibliographischen Zitations- und - Abstrakt-Datenbank SCOPUS® durchgeführt worden (Elsevier, 2021). Im Mai 2021 listet diese Datenbank mehr als 41 000 Zeitschriften und bietet Zugriff auf viele Kurzzusammenfassungen und Volltexte. Die Datenbank umfasst insgesamt mehr als 80 Millionen durchsuchbare bibliographische Einträge, die täglich aktualisiert werden. Jede Suchanfrage stellt eine Momentaufnahme der umfangreichen wissenschaftlichen Publikationstätigkeit dar und ist daher zu einem späteren Zeitpunkt nicht vollständig reproduzierbar.

Bei der methodischen Herangehensweise zur Zusammenstellung der Suchphrasen und der Dokumentation der Suche ist der entsprechende Ansatz des EFSA-Leitfadens für die Einreichung von wissenschaftlicher Literatur zum Zweck der Zulassung von PSM-Wirkstoffen genutzt worden (EFSA, 2009 als Vorlage für Tabelle 6).

Die systematische Suche in SCOPUS® ist über das R Paket *fulltext* implementiert worden (Chamberlain, 2021) und bis zur Ausgabe einer Excel-Tabelle, die alle bibliographischen Angaben der Treffer und möglichst die Kurzzusammenfassungen der Publikationen enthalten hat, weiter in der integrierten Entwicklungsumgebung RStudio prozessiert worden (RStudio Version 2021.09.0, build 351, *Ghost Orchid* Release (077589bc, 2021-09-20) for Windows, R Version 4.1.1 (2021-08-10) - *Kick Things*, R Core Team, 2021). Die Suchfunktionen sind über die Programmierschnittstelle (Application Programming Interface - API) *SCOPUS® RESTFUL API* erreichbar.

Suchbegriffe, die das Themenfeld IPS, die darin konzeptionell verankerten Maßnahmen und deren potenzielle Effekte auf die formulierten Zielgrößen abdecken, sind vor der Suche definiert

worden. Dazu sind drei Suchwortkategorien *Themenbereich – topic*, *Maßnahme des IPS – measure* und *Effekte der Maßnahmen des IPS- effect* gebildet worden. Die letztgenannte Kategorie ist zur Übersicht hierarchisch in Haupt- und Unterkategorien geteilt und schließlich zu Suchphrasen kombiniert worden. Zusätzlich sind jedem Suchbegriff ausgewählte Synonyme zur Seite gestellt und die Suchbegriffe sind in deutscher und englischer Sprache angelegt worden (Spaltenüberschriften der folgenden Tabellen mit Suffixen *de* und *en* gekennzeichnet). Es hat sich gezeigt, dass Suchbegriffe in deutscher Sprache nicht zu Treffern in der internationalen Fachliteratur, sondern im Gegenteil zu syntaktischen Fehlern im Zusammenspiel der Programmiersprache R und der API führen. Daher ist entschieden worden, die Entwicklung der systematischen Suche ausschließlich mit den englischen Suchbegriffen zu betreiben (siehe Tabelle 1 bis Tabelle 5).

Die Hauptthemenfelder (*topic*) sind durch die Begriffe *Integrierter Pflanzenschutz* und *Integrierter Pflanzenbau* eingegrenzt worden (die Synonyme und englische Suchbegriffe finden sich in Tabelle 1).

Suchwörter für die Effekte der IPS-Maßnahmen und für die Maßnahmen des IPS sind in Haupt- und Unterkategorien eingeteilt worden (Tabelle 2 und Tabelle 3, sowie Tabelle 4 und Tabelle 5).

Tabelle 1: Definition der Suchbegriffe für Hauptthemenfelder - topic

topic_id	topic_de	topic_de_synonym	topic_en	topic_en_synonym
topic_001	{integrierter pflanzenschutz}		{integrated pest management}	{integrated crop protection}; {pest management}
topic_002	{integrierter landbau}		{integrated crop management}	

Begriffe in geschweiften Klammern {} werden als Phrase gesucht, *ist ein Platzhalter für beliebig viele Zeichen am Anfang, in der Mitte oder am Ende eines Suchstrings. Suchwörter, die nicht mit Sonderzeichen ausgezeichnet sind, werden als exakte Zeichenfolge gesucht.

Tabelle 2: Definition der Suchbegriffe für Hauptkategorien der Effekte des IPS - effect main

effectmain_id	effectmain_de	effectmain_de_synonym	effectmain_en	effectmain_en_synonym
effectmain_id_001	Biodiversität	Artenvielfalt	biodivers*	*divers*; {biodiversity-inclusive}
effectmain_id_002	Indikatorarten		{indicator* spec*}	
effectmain_id_003	{PSM Reduktion}		{pesticid* reduc*}	
effectmain_id_004	{ökologischer Zustand}		{ecol* stat*}	

Begriffe in geschweiften Klammern {} werden als Phrase gesucht, *ist ein Platzhalter für beliebig viele Zeichen am Anfang, in der Mitte oder am Ende eines Suchstrings. Suchwörter, die nicht mit Sonderzeichen ausgezeichnet sind, werden als exakte Zeichenfolge gesucht.

Tabelle 3: Definition der Suchbegriffe für Unterkategorien der Effekte des IPS - effect sub

effectmain	effectsub_id	effectsub_de	effectsub_de synonym	effectsub_en	effectsub_en synonym
Biodiversität	effectsub_id_001	Agrobiodiversität		agrobio-diversity	
Biodiversität	effectsub_id_003	Feldvögel		{farmland birds}	
Biodiversität	effectsub_id_004	Insekten	Insekten-population*	insect*	{insect* popul*}
Biodiversität	effectsub_id_005	Bodenbio-diversität		soil	
Biodiversität	effectsub_id_006	{Summarische Indices}		indicator*	
Biodiversität	effectsub_id_007	{Rote Liste* Arten}		{red list species}	{Red list species}; {Red list Index}
{PSM Reduktion}	effectsub_id_008	Menge		amount	{application rate*}
{PSM Reduktion}	effectsub_id_009	Exposition		exposure	
{ökologischer Zustand}	effectsub_id_010	HNV	{HNV Farmland* Indikator}; {hoher naturwert}; {High Nature Value Farmland-Indikator}	{High Nature Value}	{High Nature Value Farmland-Indikator}
{ökologischer Zustand}	effectsub_id_011	Bodenfunktionen		{soil function*}	
{ökologischer Zustand}	effectsub_id_012	Naturhaushalt		ecosystem	{habitat loss}; habitat
{ökologischer Zustand}	effectsub_id_013	Nährstoff-kreislauf		{nutrient cycle}	
{ökologischer Zustand}	effectsub_id_014	Bodenqualität		{soil quality}	{soil degradation}
{ökologischer Zustand}	effectsub_id_015			{ecological resilience}	

Begriffe in geschweiften Klammern {} werden als Phrase gesucht, *ist ein Platzhalter für beliebig viele Zeichen am Anfang, in der Mitte oder am Ende eines Suchstrings. Suchwörter, die nicht mit Sonderzeichen ausgezeichnet sind, werden als exakte Zeichenfolge gesucht.

Tabelle 4: Definition der Suchbegriffe für Hauptkategorien der Maßnahmen des IPS – measure main

measuremain_id	measuremain_de	measuremain_de synonym	measuremain_en	measuremain_en synonym
measuremain_id_001	{Ökosystemare Ausstattung}	Landschaftsstruktur*	{ecosystem structure}	{landscape structure}
measuremain_id_002	{Reduktion PSM}		{reduction pestici*}	{reduction ppp}; {pestici* reduc*}; {ppp reduci*}
measuremain_id_003	Landbau		farming	{production of crops}; {arable farming}; husbandry; agriculture
measuremain_id_004	Präzisionsackerbau		{precision farming}	{precision cultivation}; {precision agriculture}; {precis* farm*}
measuremain_id_005	Minderungsmaßnahme-PSM		{mitigation ppp}	{mitigation pesticide}

Begriffe in geschweiften Klammern {} werden als Phrase gesucht, *ist ein Platzhalter für beliebig viele Zeichen am Anfang, in der Mitte oder am Ende eines Suchstrings. Suchwörter, die nicht mit Sonderzeichen ausgezeichnet sind, werden als exakte Zeichenfolge gesucht.

Tabelle 5: Definition der Suchbegriffe für Unterkategorien der Maßnahmen des IPS – measure sub

measuremain	measuresub_id	measuresub_de	measuresub_de synonym	measuresub_en	measuresub_en synonym
{Ökosystemare Ausstattung}	measuresub_id_001	{Naturräumliche Infrastruktur}		{ecosystem* structure*}	{structure*natural landscape*}; {eco-system*}; {community-based conservation}; {community-based conservation}
{Ökosystemare Ausstattung}	measuresub_id_002	{Diversität Nützlinge}		{divers* beneficial*}	
{Reduktion PSM}	measuresub_id_003	{Biologische Schädlingskontrolle}		{biological pest control}	
{Reduktion PSM}	measuresub_id_004	{Risikoarme Pflanzenschutzmittel}	{Risikoarme PSM}	{low*risk pesticid*}; {low*risk ppp}	
{Reduktion PSM}	measuresub_id_006	{Teilflächenanwendung PSM}		{partial application}	
{Reduktion PSM}	measuresub_id_013	{natürliche* Feind*}		{natural enem*}	{natural antagonist*}
{Reduktion PSM}	measuresub_id_016	Bekämpfungsschwelle	Bekämpfungsrichtwert	{threshold*}	{economic threshold*}; {action threshold*}
Landbau	measuresub_id_005	pflug*	pflüg*; Bodenbearbeitung	plough*	till*; cultivation; {soil cultivation}
Landbau	measuresub_id_008	Fruchtfolge*		{crop rotation}	

measuremain	measuresub_id	measuresub_de	measuresub_de synonym	measuresub_en	measuresub_en synonym
Landbau	measuresub_id_009	Aussaattermin*		sowing	{date sow*}
Landbau	measuresub_id_010	{Standortgerechte Saatgutanpassung}		{adapted to the location seed}	{adapted to the site seed}; {suitable for the location seed}
Landbau	measuresub_id_011	Sortenwahl		{variety selection}	{choice of variety}
Landbau	measuresub_id_012	{Ökologischer Landbau}		{organic agriculture}	{organic farming}; {eco* cult*}; {ecological farming}; {sustainable land management}; {organic agriculture}
Landbau	measuresub_id_015			{land conservation}	{protected area*}
Präzisionsackerbau	measuresub_id_007	{Mechanische Schädlingsbekämpfung}		{mechan* pest control*}	
Präzisionsackerbau	measuresub_id_014	{Digitale Methoden Bestandspflege}		{digit* method* crop protect*}	

Begriffe in geschweiften Klammern {} werden als Phrase gesucht, *ist ein Platzhalter für beliebig viele Zeichen am Anfang, in der Mitte oder am Ende eines Suchstrings. Suchwörter, die nicht mit Sonderzeichen ausgezeichnet sind, werden als exakte Zeichenfolge gesucht.

Mit den zusammengefassten Suchphrasen (Tabelle 1 bis Tabelle 5) sind in SCOPUS® folgende Felder durchsucht worden: *Titel der Publikation - title, Schlagwörter - keywords* (der Autoren*Autorinnen und der Anbieter*innen, engl.: *indexed keywords*), *Zusammenfassung - abstract*.

Die *indexed keywords* werden auf der Grundlage von öffentlich verfügbaren Vokabelverzeichnissen standardisiert vergeben. Abweichend von den Schlagwörtern, die von den Autoren*Autorinnen der Publikationen vergeben werden, enthalten die SCOPUS®-spezifischen indizierten Schlagwörter Synonyme, verschiedene Schreibweisen und Pluralformen aus Thesauri vom Elsevier Verlag und können somit zu weiteren, unerwarteten Treffern führen, die nicht aus den einsehbaren Suchfeldern ersichtlich sind. Die Ausgabe der Suchergebnisse enthält lediglich die Autoren*Autorinnenschlagwörter, so dass ein Abgleich von Suchergebnis und den dafür ausschlaggebenden Begriffen nicht in allen Fällen möglich ist. Exakte Suchphrasen aus mehreren Wörtern werden im SCOPUS®-System mit geschweiften Klammern kenntlich gemacht, zum Beispiel *{integrated pest management}*.

Für die oben beschriebenen Suchfelder steht das vordefinierte kombinierte Feld *TITLE-ABS-KEY* zur Verfügung. Eine weitere Einschränkung des Suchbereichs kann durch die Auswahl eines Themenbereiches (*subject area SUBJ*) erreicht werden. In SCOPUS® sind 27 verschiedene Themenbereiche klassifiziert. In der vorliegenden Arbeit liegt der Fokus auf dem Bereich *Umweltwissenschaften – Environmental Sciences ENVI* und *Agrarwissenschaften - Agricultural and Biological Sciences AGRI*. Die Suche ist so weiter eingeschränkt, aber für jeden Themenbereich separat durchgeführt worden. Die einzelnen Themenfelder sind in Tabelle 6 aufgeführt.

Tabelle 6: Themen in den Themenfeldern AGRI und ENVI.

Themenfeld ENVI	Themenfeld AGRI
Ecological Modelling	Agricultural and Biological Sciences(all)
Ecology	Agricultural and Biological Sciences (miscellaneous)
Environmental Chemistry	Animal Science and Zoology
Environmental Engineering	Agronomy and Crop Science
Global and Planetary Change	Aquatic Science
Health, Toxicology, and Mutagenesis	Ecology, Evolution, Behaviour, and Systematics
Management, Monitoring, Policy and Law	Food Science
Nature and Landscape Conservation	Forestry
Pollution	Horticulture
Waste Management and Disposal	Insect Science
Water Science and Technology	Plant Science
-/-	Soil Science

Die Suche ist aufgrund der zahlreichen Treffer nach Zeiträumen eingeteilt und die Trefferlisten vor den weiteren Auswertungs- und Filterschritten vereinigt worden.

Die einzelnen Suchbegriffe für alle Haupt- und Unterkategorien innerhalb der drei Suchwortkategorien *topic*, *measure* und *effect* sind als Textvektoren vereinigt und mit dem logischen Operator *OR* zu Suchstrings verknüpft worden. Das bedeutet, es wird ein Treffer ausgegeben, wenn ein beliebiger der verknüpften Suchbegriffe gefunden wird. Die drei Suchwortkategorien als Haupt-Begriffsfelder sind mit dem logischen Operator *AND* verknüpft. So muss wenigstens ein Suchbegriff aus jedem Begriffsfeld vorhanden sein. Dies ist ein restriktives Vorgehen, um eine überschaubare Anzahl themenspezifischer Treffer zu erhalten (Tabelle 7). So kann die Suche mit allen möglichen Kombinationen von Suchphrasen in einem Schritt durchgeführt werden. Ohne diese Strategie hätten für jede Kombination von Suchbegriffen in iterativen Schleifen gesonderte Suchen durchgeführt werden müssen, ein zeitaufwändiger Prozess.

Zu den gefundenen Publikationen sind die verfügbaren Kurzzusammenfassungen mit Hilfe der Funktion *abstract_retrieval* aus dem R-Paket *rscopus* (Muschelli, 2019) abgefragt und der Ergebnistabelle hinzugefügt worden.

Tabelle 7: Dokumentation des Suchprozesses „Effekte von Maßnahmen des IPS auf Zielgrößen PSM-Reduktion und Schutz der Biodiversität“

Kategorie	Angabe
Begründung für die Auswahl der Literaturdatenbank	Die SCOPUS® Literaturdatenbank ist weltweit eine der größten bibliographischen Datenbanken und bietet eine interdisziplinäre Stichwortwortsuche inklusive der Kurzzusammenfassungen über eine API. https://www.scopus.com/search/
Datum der Suche	2022-01-19
Suchzeitraum	1960-2022
Datum der letzten in die Suche einbezogenen Datenbankaktualisierung	2022-01-19
	Für diese Datenabfrage verwendete Suchstrategie:
Suchfeld	TITLE-ABS-KEY
Themenbereich	AGRI, ENVI
Term 1 – topic	{integrated pest management} OR {integrated crop management} OR {integrated crop protection} OR {pest management}
Term 2 – effect main + effect sub	biodivers* OR {indicator* spec*} OR {pesticid* reduc*} OR {ecol* stat*} OR *divers* OR {biodiversity-inclusive} OR agrobiodiversity OR {farmland birds} OR insect* OR soil OR indicator* OR {red list species} OR amount OR exposure OR {High Nature Value} OR {soil function*} OR ecosystem OR {nutrient cycle} OR {soil quality} OR {ecological resilience} OR {insect* popul*} OR {Red list species} OR {Red list Index} OR {application rate*} OR {High Nature Value Farmland-Indicator} OR {habitat loss} OR habitat OR {soil degradation}
Term 3 – measure main + measure sub	{ecosystem* structure*} OR {divers* beneficial*} OR {biological pest control} OR {low*risk pesticid*} OR {low*risk ppp} OR plough* OR {partial application} OR {mechan* pest control*} OR {crop rotation} OR sowing OR {adapted to the location seed} OR {variety selection} OR {organic agriculture} OR {natural enem*} OR {digit* method* crop protect*} OR {land conservation} OR {threshold*} OR {structure*natural landscape*} OR {eco-system*} OR {community-based conservation} OR {community based conservation} OR till* OR cultivation OR {soil cultivation} OR {date sow*} OR {adapted to the site seed} OR {suitable for the location seed} OR {choice of variety} OR {organic farming} OR {eco* cult*} OR {ecological farming} OR {sustainable land management} OR {organic agriculture} OR {natural antagonist*} OR {protected area*} OR {economic threshold*} OR {action threshold*} OR {ecosystem structure} OR {reduction pestici*} OR farming OR {Precision Farming} OR {mitigation ppp} OR {landscape structure} OR {reduction ppp} OR {pestici* reduc*} OR {ppp reduci*} OR {convention* farming} OR {production of crops} OR {arable farming} OR husbandry OR agriculture OR {precision cultivation} OR {precision agriculture} OR {precis* farm*} OR {mitigation pesticide}
Kombinierte Suchphrase	Term 1 AND Term 2 AND Term 3
Gesamtzahl der abgerufenen Datensätze (ohne Duplikate)	16 073 (12 082)

Begriffe in geschweiften Klammern {} werden als Phrase gesucht, *ist ein Platzhalter für beliebig viele Zeichen am Anfang, in der Mitte oder am Ende eines Suchstrings. Suchwörter, die nicht mit Sonderzeichen ausgezeichnet sind, werden als exakte Zeichenfolge gesucht.

Die Ergebnisse der Suche liegen nach vollständiger Prozessierung als Excel-Tabelle mit acht bibliographischen Variablen (*doi, authors, title, date, journal, volume, issue, pages*), weiteren textinformativen Angaben (*authorkeywords, subjarea, abstract*) und den verwendeten Suchbegriffen (*search_term_scopus*) vor. Zusätzlich erzeugte Merkmale geben an, welche Suchbegriffe die Treffer in der Literaturdatenbank ergeben haben (*match_topic, match_measure_main, match_measure_sub, match_measure_all, match_effect_main, match_effect_sub, match_effect_all*, siehe Tabelle 1 bis 5).

2.1.2 Schneeballsuche und Sekundärliteratur

Der Fokus der Schneeballsuche liegt auf relevanten Übersichtsartikeln (Reviews), da hier bereits abgeleitete Synthesen erwartet und diese im Rahmen des Gutachtens verarbeitet werden. Darüber hinaus werden Veröffentlichungen untersucht, die nicht im Rahmen eines peer-review Prozesses von Wissenschafts-Verlagen veröffentlicht worden sind. Hierzu gehören auch Zeitungsartikel, Forschungsprojektberichte, Veröffentlichungen von Behörden und NGOs, sowie Konferenzbeiträge (zusammenfassend *Graue Literatur*).

Begleitend zur Literatursuche über eine Zitations-Datenbank-Analyse (Abschnitt 2.1.1), ist die Recherchestrategie der Rückwärts- und Vorwärts-Schneeballsuche angewendet worden (Terminologie nach Wholin, 2014). In der Rückwärtssuche (*backward snowballing*, auch *Schneeballsuche*) ist einerseits fortlaufend mittels der zitierten Referenzen in bereits bekannter themenbezogener Literatur (und wiederum den darin zitierten Referenzen) gesucht worden. So kann der Kenntnisstand zum IPS zielgerichtet erweitert werden. Diese Methodik hat die inhärente Eigenschaft, dass die begutachtete Literatur sukzessive älter und damit weniger aktuell wird. Dem lässt sich systematisch entgegenwirken, indem die besonders relevanten gefundenen Quellen wiederum als Zitatstellen in sehr aktuellen Veröffentlichungen gesucht werden (Vorwärtssuche, *forward snowballing*). Durch die Suche in beide Richtungen und die Kombination der Suchstrategien setzt sich ein Gesamtbild der IPS-Maßnahmen und ihrer Effekte auf die Biodiversität zusammen. Der Anteil aussagekräftiger Veröffentlichungen ist durch die gezielte Suche mit dieser Strategie höher als bei der Datenbankrecherche. Nicht relevante Berichte bleiben hier von vornherein unberücksichtigt. Auf der anderen Seite birgt die Schneeballsuche jedoch ein höheres Risiko, dass Maßnahmenbereiche oder Themenfelder übersehen werden, da die Rechercherichtung durch die subjektive Wahrnehmung und das Vorwissen des Suchenden geprägt wird. Aus diesem Grund wird die Schneeballsuche im Rahmen dieses Gutachtens als Ergänzung zur Datenbankanalyse durchgeführt. Durch eine enge Verzahnung der beiden Ansätze ist als ein weiteres Ziel der Schneeballsuche adressiert worden, dass die gefundene Literatur mit den Ergebnissen der Datenbankrecherche abgeglichen und diese so validiert werden kann.

Die in der Schneeballsuche identifizierte Literatur wird manuell in einer relationalen Datenbank mit vergleichbarer Struktur wie die systematische Literaturrecherche vorgehalten. Die Ergebnisse aus beiden Ansätzen sind zur für die Analyse miteinander vereinigt worden. Da die Publikationen aus der nichtwissenschaftlichen Literatur häufig nicht über einen digitalen Objektbezeichner (DOI) verfügen, sind im Rahmen dieser Untersuchung für alle Datenbankeinträge jeweils eigene Identifikatoren vergeben worden, um eine konsistente Datenbankablage zu ermöglichen.

2.2 Ergebnisse der systematischen Suche und der Schneeballsuche

Ein vollständiger Überblick über das Themenfeld IPS erfordert eine mehrgleisige Suchstrategie. Im Folgenden werden die Ergebnisse aus der systematischen Stichwortsuche mit vorab definierten Suchbegriffen und -phrasen, sowie der Strategie, die sich ausgehend von relevanten Literaturstellen fortpflanzt (im *Schneeballsystem*) dargestellt.

2.2.1 Ergebnisse der systematischen Suche

2.2.1.1 Anzahl der Literaturstellen

Die systematische Suche ist sehr breit angelegt worden, um das Themenfeld IPS möglichst vollständig abzubilden. Es sind nach Entfernung von anhand der DOI identifizierten Duplikat-Einträgen 12 082 Literaturstellen gefunden worden (siehe Tabelle 7). Im Themengebiet *Umweltwissenschaften* - ENVI hat die kombinierte Suchphrase aus Themenbereich IPS, den Maßnahmen des IPS und den Effekten der Maßnahmen des IPS circa 3 600 Treffer ergeben, im Themenbereich *Agrarwissenschaften* - AGRI sind circa 8 500 Treffer erzielt worden.

2.2.1.2 Historie IPS

Die Auseinandersetzung mit dem IPS ist besonders ab Beginn der 1990er-Jahre deutlich intensiviert worden, wie auch anhand der summarischen Ergebnisse der Datenbankabfrage zu erkennen ist (Abbildung 4). Politisch wurde diese Entwicklung unterstützt, indem 1987 der IPS als Leitbild des modernen PS im deutschen PS-Gesetz und 1991 in die Europäische Richtlinie über das Inverkehrbringen von PSM (91/414/EWG, Council of the European Union, 1991) als Element der sachgemäßen Anwendung verankert worden ist.

In der Agenda 21 der UNO-Konferenz für Umwelt und Entwicklung im Jahr 1991 in Rio de Janeiro, Brasilien (Vereinte Nationen, 1992) wurde der IPS die *optimale Lösung der Zukunft* genannt. Diese nationalen und internationalen Entwicklungen haben in den 1990er Jahren auf Landesebene dazu geführt, dass in mehreren Bundesländern verschiedene Förderprogramme zur Unterstützung des Integrierten Pflanzenbaus und PS aufgelegt wurden (NABU, 2005).

Seitdem kann an der Vielzahl themenbezogener Veröffentlichungen aus dem Bereich *Integrierter Landbau* und *IPS* ein Trend zu einem kontinuierlich gestiegenen wissenschaftlichen Interesse abgelesen werden. Nach 2010 wurden in jedem Jahr mehr als 500 Publikationen gefunden, im Jahr 2021 waren es mehr als 1 000 Veröffentlichungen. Diese Vielzahl an Veröffentlichungen erschwert die Erstellung einer Gesamtübersicht. Eine tiefgehende Betrachtung aller Veröffentlichungen ist im Rahmen dieser Studie nicht möglich. Über systematische Filterprozesse wurden relevante Literaturstellen identifiziert und durch eine Text-Analyse der *titles*, der *abstracts*, der von den Autoren*Autorinnen vergebenen *keywords*, sowie der Gesamtartikel für besonders relevante Publikationen bewertet. Die zu diesem Zweck entwickelte Vorgehensweise wird ab Kapitel 3.2 erläutert.

2.2.1.3 Semantischer Überblick über das Themenfeld

Um einen Überblick zu gewinnen, ob die kombinierten Suchbegriffe das Themenfeld wie erwartet aufspannen, ist aus den abgefragten Feldern *title*, *abstract* und *keywords* ein Text-Korpus erstellt und englische Standard-Stopwords (R-package *tm*, Funktion *tm_map*, Feiner & Hornik, 2020) sowie einige selbst-definierte (*also*, *can*, *however*, *to*, *may*) entfernt worden. Die Frequenzen der häufigsten Begriffe sind gemappt worden. Abbildung 3 zeigt den Ausschnitt der Häufigkeitsverteilung mit den häufigsten Begriffen. Es ist erkennbar, dass tatsächlich das hauptsächliche Themenfeld *IPS* gut abgedeckt worden ist, die häufigsten Begriffe sind in dunkelgrau mit mehr als 47 000 Nennungen *pest* und *management*. Die nächsthäufigen Nennungen sind *control* und *integrated* mit einer Frequenz von jeweils 18 000 und 10 000.

Einige Begriffe zeigen, dass viele Publikationen wie erwartet im Forschungsbereich *Agrar* angesiedelt sind (*crop, production*) und dass die Bekämpfung von Pflanzenschädlingen, meist Insekten, und das Management von Resistenzbildung (*resistance*), im Mittelpunkt stehen.

Sehr wenige Treffer sind nach Ansicht der Abbildung 3 und der zugrundeliegenden Wort-Häufigkeitstabelle zu den in der vorliegenden Literaturstudie im Fokus stehenden Effekte der IPS-Maßnahmen auf die ökologischen Kennwerte in Agrarlandschaften zu verzeichnen. Weder Begriffe aus den Wortfeldern *Ökologie, Landschaft* noch *Biodiversität* sind darin zu finden. Die häufigsten Nennungen aus dem Kernbereich benutzen die Begriffe *diversity* mit 1 500 Nennungen, *landscape* mit 1 000 Nennungen und *agroecology* mit etwas mehr als 100 Nennungen. Die Methodik kann genutzt werden, um einen ersten Überblick über die Themenschwerpunkte der gefundenen Literatur zu erhalten.

Die absolute Anzahl der Suchtreffer aus der systematischen Suche beträgt 12 082. Es ist eine stark ansteigende Anzahl der Publikationen, um die Jahrtausendwende seit den 1990er Jahren, zu verzeichnen. Eine weitere deutliche Steigerung des Interesses und damit der Publikationstätigkeit kann aus der Abbildung 4 für den Zeitraum nach dem Jahr 2018 abgelesen werden.

Die globale Verteilung der gefundenen Publikationen (Abbildung 5) spiegelt das geographisch ungleichmäßig verteilte wissenschaftliche Interesse an der Thematik wider. Zu den Ländern mit der weltweit höchsten Forschungstätigkeit gehören die USA, China, Indien und Australien, aber auch Brasilien in Südamerika und Kanada auf dem nordamerikanischen Kontinent. In Europa sind in Großbritannien die meisten Publikationen im Bereich der IPS-Konzepte erstellt worden.

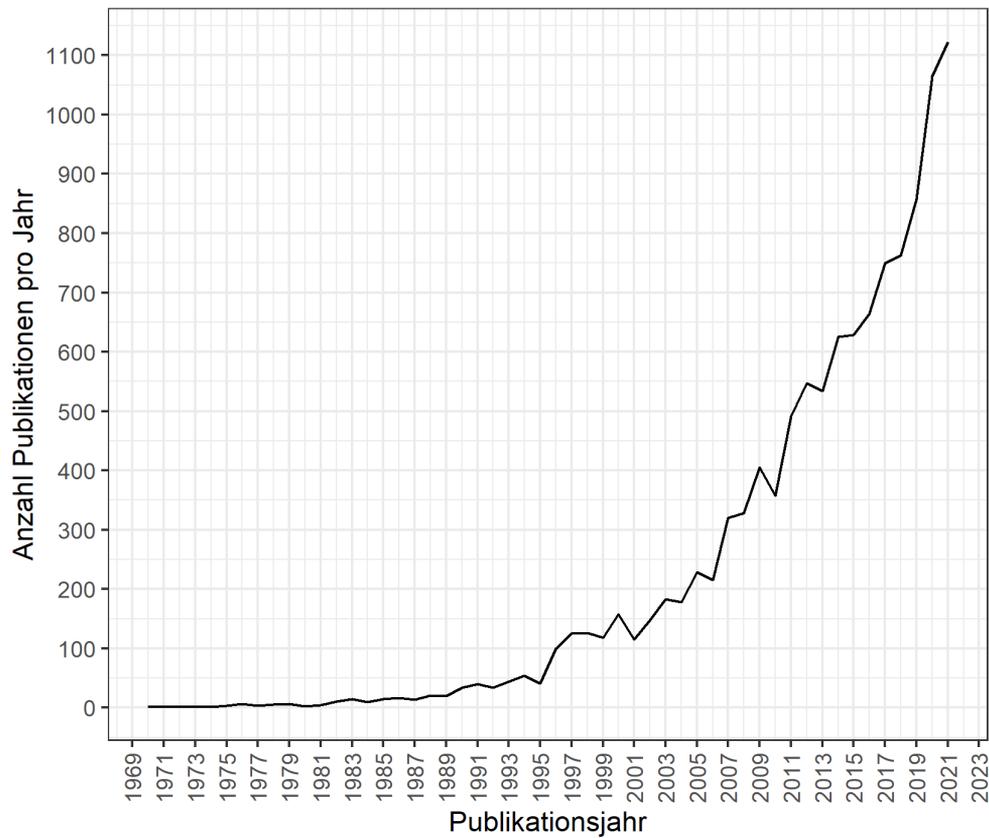
Abbildung 3: Überblick über das Themenfeld IPS, Häufigkeit der Nennungen wichtiger Suchbegriffe im Themenfeld IPS.



Die Darstellung zeigt die gefundenen Suchbegriffe zu Maßnahmen und Effekten des IPS als Wordcloud. Es ist mit einer minimalen Häufigkeit eines Begriffes von 10 eingegrenzt worden und es sind maximal 50 Begriffe dargestellt worden.

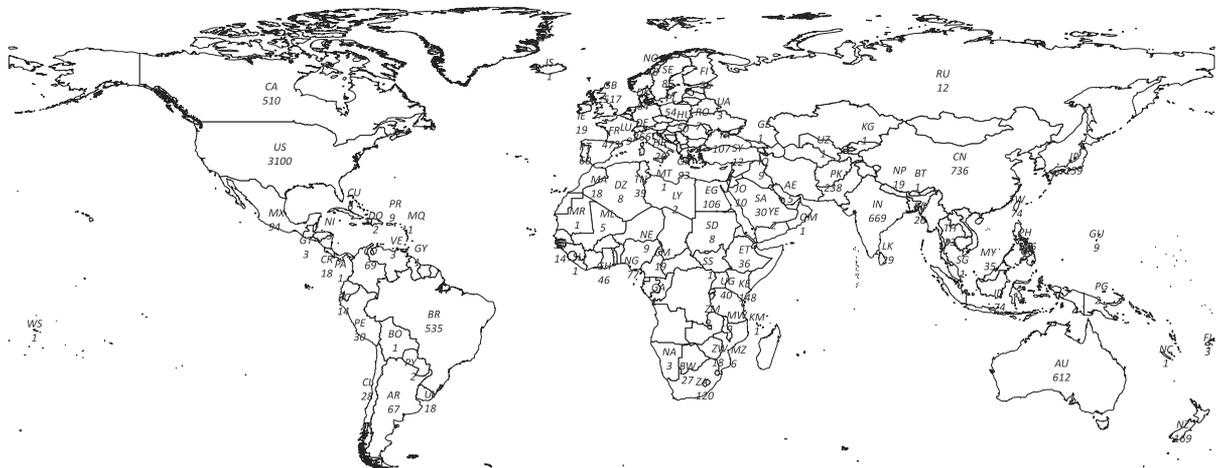
Quelle: Eigene Darstellung, Darwin Statistics 2023

Abbildung 4: Verlauf der jährlichen Anzahl der Publikationen der Trefferliste *systematische Suche*, siehe Tabelle 7.



Quelle: Eigene Darstellung, Darwin Statistics 2023

Abbildung 5: Globale Verteilung der Ergebnisse der systematischen Suche auf Basis der institutionellen Zugehörigkeit der Erstautoren.



Quelle: Eigene Darstellung, Darwin Statistics 2023

2.2.2 Ergebnisse der begleitenden Schneeballsuche

Mit Hilfe der begleitenden Schneeballsuche sind parallel zur Datenbankabfrage Interpretationen der Wirkungen von IPS-Maßnahmen auf die Biodiversität und einer allgemeinen ökologischen Vorzugswürdigkeit aus der Fachliteratur extrahiert worden. Für ausgewählte IPS-Maßnahmen werden im Kapitel 3.4 eine Übersicht relevanter Publikationen, sowie die abgeleiteten Schlussfolgerungen der Autoren*Autorinnen dargestellt.

In der Schneeballsuche sind 81 Publikationen als Ergänzung zu den Treffern aus der systematischen Suche gefunden und der Datenbank hinzugefügt worden. Bei diesen Literaturstellen handelt es sich um 26 Referenzen, die den Kategorien *Mitteilungen und Positionspapiere von Behörden, Buchkapitel, Broschüren, Veröffentlichungen von Nichtregierungsorganisationen, Forschungsprojektberichte, Konferenzbeiträge* oder *Industrierichtlinien* zugeordnet werden. Bis auf zwei Ausnahmen sind diese Publikationen nicht vor dem Jahr 2010 veröffentlicht worden.

Von den wissenschaftlichen Artikeln, die größtenteils ab dem Jahr 2015 publiziert und für die vorliegende Studie als besonders relevant identifiziert worden sind, sind zwölf Artikel auch im Rahmen der systematischen Suche gefunden worden. Die weiteren Artikel sind als zusätzliche Informationsquellen für diese Untersuchung genutzt worden, da sie mitunter den IPS nicht als expliziten Untersuchungsgegenstand genannt haben und deshalb in der systematischen Suche nicht gefunden worden sind. Im Hinblick auf die hier bearbeiteten Forschungsfragen lassen diese Publikationen direkte Schlussfolgerungen hinsichtlich der IPS-Maßnahmen und ihrer ökologischen Vorzugswürdigkeit zu, insbesondere zur ökologischen Wirksamkeit von landschaftsbezogenen Maßnahmen.

Der Fokus ist bei der Analyse zunächst auf Review-Publikationen gelegt worden (wie Tschardt et al., 2021, Köninger et al., 2012, Kremen, 2020), die zu ihrem jeweiligen Themenschwerpunkt bereits die Synthese einer Literaturrecherche beinhalten. Ebenfalls sind Informationen aus der *grauen* Literatur ergänzt worden, da in diesen Veröffentlichungen aktuelle Trends schneller veröffentlicht werden als in Manuskripten, die einen peer-review Prozess durchlaufen.

2.3 Metaanalyse zur Festlegung der Relevanz der Literatur

Die systematische Suche hat eine Treffermenge von mehr als 12 000 Literaturstellen ergeben und ist zur weiteren Bewertung auf eine Teilmenge relevanter Publikationen eingegrenzt worden. Dazu sind Literaturstellen schrittweise ausgeschlossen worden, die nicht den unten definierten Kriterien genügen (Abschnitt 2.3.1).

Der Datensatz ist zunächst durch die Einengung des geographischen Geltungsbereichs reduziert worden. Es ist nach Veröffentlichungen aus Deutschland und der EU (inklusive Großbritannien) gefiltert worden, um den Bezug auf vergleichbare klimatische, naturräumliche, soziokulturelle und normative Bedingungen zu erhalten. Dazu ist nach Zugehörigkeit der Erstautoren zu Institutionen in europäischen Ländern gefiltert worden. Anschließend ist der Datensatz auf die relevantesten Literaturstellen eingegrenzt worden, indem das Alter (Veröffentlichungsdatum) und die wissenschaftliche Relevanz (Anzahl an Zitationen) im letzten Verarbeitungsschritt geprüft worden sind. Eine detaillierte Beschreibung dieses Verarbeitungsschritts ist im folgenden Abschnitt 2.3.1 zu finden.

2.3.1 Eingrenzung der Suchergebnisse aus der systematischen Literatursuche

► Filter EU27+

Die Erstautorenschaft einer Publikation muss mit einer Institution mit Sitz in der Europäischen Union (in der Zusammensetzung vor dem Austritt Großbritanniens am 31. Januar 2021) verbunden sein. So wird die Relevanz einer Publikation für die landwirtschaftliche Praxis in der EU abgebildet. Die Autoren*Autorinnen, die eine Zugehörigkeit zu einer EU-Institution aufweisen, müssen nicht zwangsläufig zu einem Thema mit direktem Bezug zur EU geschrieben haben, noch muss andersherum eine institutionelle Anbindung in einem Nicht-EU-Land bedeuten, dass die Publikation keine Relevanz für die spezifische Situation in der EU haben muss. Großbritannien ist wegen seiner langen IPS- und EU-Historie in die Positivfilterliste aufgenommen worden (Tabelle 8). Die Liste wird nach Anwendung des Filters von 12 082 auf 2 826 Treffer reduziert (Abbildung 6).

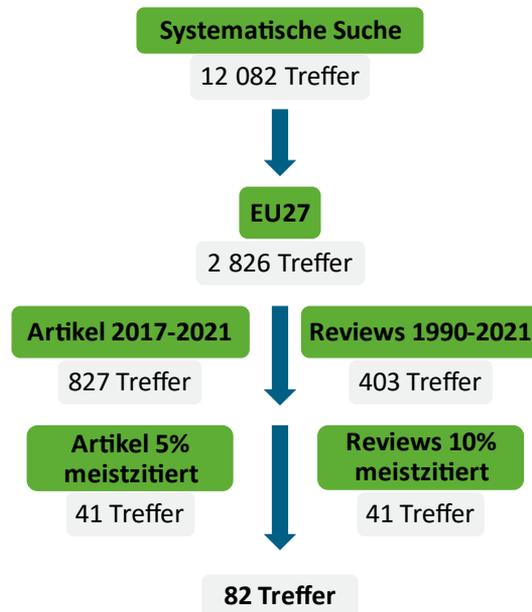
Tabelle 8: Liste der EU-Staaten + Großbritannien zur Positivfilterung der Suchtreffer der systematischen Suche (in englischer Sprache).

EU-Mitgliedsstaat		
Austria	Belgium	Bulgaria
Croatia	Cyprus	Czech Republic
Denmark	Estonia	Finland
France	Germany	Greece
Hungary	Ireland	Italy
Latvia	Lithuania	Luxembourg
Malta	Netherlands	Poland
Portugal	Romania	Slovakia
Slovenia	Spain	Sweden
United Kingdom		

► Filter Datum der Veröffentlichung

Neue Forschungsergebnisse sind in aktuellen wissenschaftlichen Artikeln zu finden und können in der Regel keinen Eingang in Übersichtsartikel gefunden haben. Um die aktuellen Entwicklungen abzubilden, ist der Veröffentlichungszeitraum für Artikel auf die Jahre 2017-2021 eingegrenzt worden. Die Anzahl der Treffer für Artikel beträgt nach der Datumsfilterung 827 (Abbildung 6). Für Übersichtsartikel ist der betrachtete Zeitraum auf die Jahre zwischen 1990 und 2021 begrenzt worden, um den starken Anstieg der Publikationstätigkeit um die Jahrtausendwende abbilden (Abbildung 4). Die Anzahl der Literaturstellen beträgt nach der Datumsfilterung für Reviews 403 Einträge (Abbildung 6).

Abbildung 6: Eingrenzung der Suchergebnisse der systematischen Suche durch Anwendung von Filterkriterien.



Quelle: Eigene Darstellung, Darwin Statistics 2023

► Filter Anzahl der Zitationen

Der letzte Schritt, um die Suchergebnisse einzugrenzen, nutzt die Information, wie oft ein Artikel in anderen Publikationen zitiert worden ist. Diese Metrik zeigt nicht auf, ob die Aussagekraft des Artikels hoch ist, weil eine häufige Zitierung auch ein Zeichen einer negativen Perzeption sein kann. Sie gibt einen Eindruck von der Relevanz der Information. Es werden für Originalartikel und Reviews unterschiedliche Kriterien angelegt, weil für die im vorherigen Schritt selektierten aktuellen Originalartikel prinzipiell nur wenige Zitationen generiert werden können.

Für die Artikel gilt, dass ein Anteil von 5 % meistzitiertester Artikel in die Bewertung einbezogen worden ist. Für Reviews ist festgelegt worden, dass die oberen 10 % der meistzitierten Publikation in die detaillierte Auswertung einbezogen worden sind. Am Ende des Prozesses sind sowohl 41 Artikel und 41 Reviews ausgewählt worden (Abbildung 6).

2.3.2 Deskriptive Analyse der extrahierten Literaturstellen

Die Anzahl und die geographische Verteilung der in der systematischen Suchabfrage identifizierten Literaturstellen für Länder der Europäischen Union sind auf der geographischen Karte in Abbildung 7 zu sehen. Es zeigt sich, dass innerhalb von Europa ein Großteil der veröffentlichten Literatur aus Frankreich (473 Publikationen) und Großbritannien (513 Publikationen) stammt. In Deutschland sind 266 Referenzen im Suchzeitraum der Abfrage gefunden worden. Der hohe Anteil der Referenzen aus Frankreich ist darauf zurückzuführen, dass dort viele Forschungsfragen im Bereich der regionalen Sonderkulturen, insbesondere des Weinanbaus, bearbeitet werden. Es fällt zudem auf, dass in Großbritannien und in Frankreich Forschungsarbeiten veröffentlicht werden, die sich thematisch und räumlich mit den Situationen außerhalb Europas beschäftigen, ein Erbe der kolonialen Vergangenheit der beiden Länder. Dieser Verlust, den eigentlichen Fokus der vorliegenden Studie kann durch den Such- und Filteralgorithmus der Literaturrecherche nicht verhindert werden. Der konkrete Untersuchungsstandort und mögliche Bezüge zu IPS-Maßnahmen in Deutschland und der EU werden deshalb während Bewertung der Referenzen direkt berücksichtigt. Der Anteil der veröffentlichten Forschungsergebnisse an allen Fundstellen, die aus osteuropäischen Ländern

stammen, ist deutlich geringer als die aus westeuropäischen MS. Die Intensität der wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit Konzepten des IPS in englischsprachigen Medien ist in Osteuropa aus historischen Gründen gering. Daraus lässt sich nicht schließen, dass der IPS im Osten Europas keine praktische Anwendung findet. Es ist vielmehr zu vermuten, dass eine integrierte Bewirtschaftungsstrategie in der Praxis traditionell verankert ist und deshalb seltener Gegenstand wissenschaftlicher Betrachtungen wird. Seit den 1970er Jahren sind sowohl in West- als auch in Osteuropa Initiativen zur wissenschaftlichen Begleitung und Einführung von IPS-Programmen ergriffen worden.

Abbildung 7: Verteilung der Ergebnisse der systematischen Suche auf Basis der institutionellen Zugehörigkeit der Erstautoren in Europa.



Quelle: Eigene Darstellung, Darwin Statistics 2023

Konzepte des IPS sind in den ehemals sozialistischen Ländern gut angenommen worden, weil wirksame, chemisch-synthetische PSM nur auf dem internationalen Markt und damit schwer zu bekommen waren (Freier & Boller, 2009). Es ist davon auszugehen, dass ein mittlerweile erhöhter und vielfältigerer PSM-Einsatz in diesen Ländern als ein zeitverzögerter Nebeneffekt zu einer erhöhten Publikationsrate in den kommenden Jahren führen wird. Es ist weiterhin möglich, dass in diesen Regionen ein alternatives Vokabular für die Maßnahmen der IPS verwendet wird. Deshalb könnten die jeweiligen Veröffentlichungen vom Suchalgorithmus nicht gefunden worden sein. Diese Hypothesen und Erklärungsansätze lassen sich bis auf Weiteres nicht zweifelsfrei belegen. Ein weiterer Aspekt liegt darin begründet, dass viele dieser Studien in russischer Sprache veröffentlicht werden und daher für internationale Wissenschaftler*innen nicht zugänglich sind. Obwohl in den letzten Jahren diese Studien zum Teil übersetzt worden

sind, bleibt anzunehmen, dass vorrangig in den Landessprachen und in der Grauliteratur veröffentlicht wird.

Nachdem die Datenbankeinträge in einem zweiten Filterschritt unter Berücksichtigung der Zitationszahlen und Veröffentlichungsdaten weiter reduziert worden sind, entspricht die entstandene Verteilung der 82 verbliebenen Referenzen der Darstellung in Abbildung 8.

Abbildung 8: Verteilung der Ergebnisse der systematischen Suche auf Basis der institutionellen Zugehörigkeit der Erstautoren in Europa für 82 Publikationen aus der systematischen Suche zur eingehenden Analyse.



Quelle: Eigene Darstellung, Darwin Statistics 2023

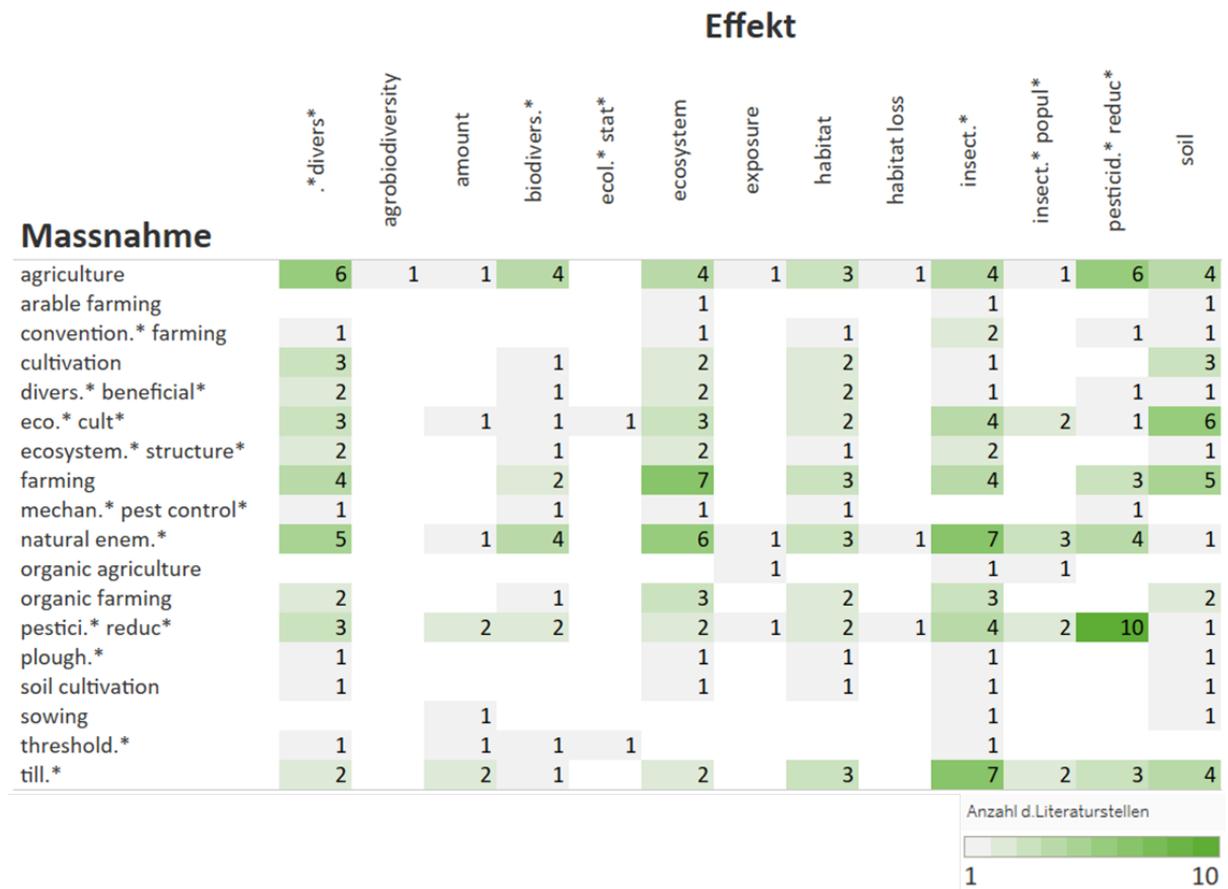
Die in der systematischen Suche gefundenen Publikationen verteilen sich auf insgesamt 12 Mitgliedsstaaten der EU und Großbritannien. Mit je 18 und 15 Referenzen stammen die meisten Veröffentlichungen aus Frankreich und Großbritannien, gefolgt von Italien (13), Deutschland (12) und Spanien (8). Für die Gesamtanalyse werden diese Referenzen durch die 81 Veröffentlichungen aus der Schneeballsuche (Kapitel 2.2.2) ergänzt.

Die Suchphrasenpaare, die in den 82 extrahierten Referenzen zu einem Treffer im Suchalgorithmus der Studie geführt haben, sind in der Matrix in Abbildung 9 dargestellt.

Es zeigt sich, dass einige Phrasen, die den IPS-Maßnahmen und -Effekten zugeordnet werden, in der gefilterten Literatur wiederkehrend auftreten. So wird bei den Maßnahmen eine Reihe von Veröffentlichungen mit dem Bezug zu *agriculture* und *natural enemies* gefunden, aber auch aus dem Bereich der *pesticide reduction*. Bei den Suchbegriffen der zu erwartenden Effekte werden vermehrt Treffer durch die Phrasen *diversity* bzw. *biodiversity* und oft (zum Teil ergänzend) mit

insects erzielt. Auch die Suchbegriffe *ecosystem* und *habitat* werden in den als relevant eingestuften Veröffentlichungen gefunden.

Abbildung 9: Anzahl der Suchphrasenpaare in der Literatur für Maßnahme-Effekt-Kombinationen. In der Matrix sind die Suchworte für die Maßnahmen in den Zeilen festgehalten, die Suchwort für die erwarteten Effekte stehen in Spalten.



Der Asterisk * ist ein Platzhalter für beliebig viele Zeichen am Anfang, in der Mitte oder am Ende eines Suchstrings.

Quelle: Eigene Darstellung, Darwin Statistics 2023

Die gefundenen Suchphrasen aus der Literaturabfrage sind aufgrund der zu erwartenden Forschungsrichtung jeweils den Kategorien *Maßnahme* oder *Effekt* zugeordnet worden, dies ist in dieser Stringenz innerhalb der verschiedenen Publikationen aber nicht immer der Fall. Aus diesem Grund wird der Ausdruck *pesticide reduction* in dieser Matrix sowohl als Maßnahme als auch als Effekt geführt, da die Richtung des postulierten kausalen Zusammenhangs in den Veröffentlichungen unterschiedlich sein kann. Aus der deskriptiven Analyse der Ergebnisse der Literaturabfrage (Abbildung 9) kann deshalb noch kein Muster zum Forschungsstand aller Maßnahme-Effekt-Kombinationen im Sinne einer kausalen Wirkrichtung zwischen Maßnahme und Effekt abgeleitet werden. Es ist eine detaillierte Betrachtung der Forschungsergebnisse und eine Einordnung in IPS-Maßnahmen- und Effektkategorien notwendig, die im folgenden Kapitel 3 dargestellt wird. Die Interpretation der Untersuchungsergebnisse erfolgt dabei zunächst wie von den jeweiligen Autoren*Autorinnen in deren Schlussfolgerungen und Empfehlungen vorgeschlagen.

3 Wissensstand und gewichtende Bewertung

3.1 Aufbau einer numerischen Bewertungsmetrik

Die Ableitung einer numerischen Bewertungsmetrik auf Basis der Literaturanalyse ermöglicht einen systematischen Vergleich verschiedener IPS-Maßnahmen untereinander. In der vorliegenden Studie ist die Bewertung der Qualität von IPS-Maßnahmen im Vergleich zur konventionellen Agrarpraxis ohne umfassenden IPS als *Referenz* vorgenommen worden. Dieser Referenzstatus beschreibt eine landwirtschaftliche Praxis, die nicht vorrangig auf präventiven und nicht-chemischen Maßnahmen aufgebaut ist. Zudem wird in der Referenz-Praxis keine punktgenaue Bestimmung einer ökonomischen Schadschwelle vor der Anwendung chemisch-synthetischer PSM als *ultima ratio* vorgenommen. Eine Gewichtung der identifizierten IPS-Maßnahmen ist auf Basis ihrer ökologischen Vorzugswürdigkeit und ihrer Wirksamkeit für eine PSM-Risiko-Reduktion mit einem Indikatoren-Set (der eigens entwickelte *INTEGER-Score*) quantifiziert worden. Das Ergebnis ist die vergleichende Bewertung der ökologischen Auswirkungen aller betrachteten IPS-Maßnahmen innerhalb eines einheitlichen Indikatorensystems. *INTEGER-Scores* integrieren für jede Maßnahme-Effekt-Kombination die Richtung des ökologischen Effekts im Vergleich zur Referenz-Praxis in der konventionellen Landwirtschaft (*Bewertungs-Score B*) unter Berücksichtigung der Stärke der Aussagen der jeweiligen Literaturstellen (*Intensitäts-Score I*). Eine Verbesserung des ökologischen Zustands wird mit positiven Scores (auf einer Skala zwischen 1 bis 3) und eine Verschlechterung mit negativen Scores zwischen -1 und -3 bewertet. Die Stärke der Aussage wird auf einer diskreten Skala mit Werten zwischen 1 und 5 als *Intensitäts-Score I* bewertet. Details zur Indikatorbildung finden sich in Kapitel 3.1.1.

Die *INTEGER-Scores* werden für jede Maßnahme-Effekt-Kombination für die Anzahl der Literaturstellen gemittelt und in eine *Indikatormatrix* eingetragen. Aus dieser Darstellung können die ökologischen Folgen aus den verschiedenen IPS-Maßnahmen eingeschätzt und Forschungslücken identifiziert werden. Dies sind ökologische Auswirkungen, die in der Literatur noch nicht eingehend betrachtet worden sind. Zum Beispiel könnte die Auswirkung des Einsatzes digitaler Entscheidungshilfesysteme auf die Artdiversität in der wissenschaftlichen Literatur nicht explizit thematisiert worden sein. Aus den Forschungs-Lücken lassen sich Forschungsbedarfe ableiten (siehe Diskussion in Abschnitt 4.4).

Zu beachten ist, dass die *Indikatormatrix* keinen Anspruch auf Vollständigkeit für die Fragestellung erheben kann, da in dieser Untersuchung nicht die gesamte zur Verfügung stehende Literatur integriert worden ist. Durch die Filterung des Gesamtdatensatzes auf besonders relevante Publikationen (Abschnitt 2.3.1) wird sichergestellt, dass die wichtigsten Erkenntnisse verarbeitet werden. Die *Indikatormatrix* kann mit weiterer Literatur aktualisiert und erweitert werden. Die numerische Bewertung und die Indikatorbildung ergänzen die inhaltlichen Schlussfolgerungen. Die graphische Darstellung in Netzdiagrammen (Kapitel 3.4) visualisiert die in der Literatur aufgetretenen Muster und ermöglicht einen innovativen, vergleichenden Überblick über die vorliegende Evidenz.

3.1.1 Relevanz der Aussage: *Bewertungs-Score B*

Die Bewertung der Effekte von IPS-Maßnahmen hinsichtlich der ökologischen Vorzugswürdigkeit erfolgt im Vergleich mit der konventionellen Agrarpraxis als Referenzsystem (wie in Abschnitt 3.1 skizziert) und wird im *Bewertungs-Score B* ausgedrückt. Jede IPS-Maßnahme wirkt sich in unterschiedlicher Weise, meist auf mehrere Parameter gleichzeitig, auf die Bedingungen in den Agrarökosystemen aus. Dabei können sich die Effekte sowohl auf die naturräumliche Ausstattung als auch auf die Kennwerte der Biodiversität beziehen. Daher

werden negative Änderungen der betrachteten Parameter durch die Nutzung von IPS-Verfahren im Vergleich zur Referenz als negativer Score mit diskreten Werten im Bereich von - 1 und - 3 beschrieben, wenn in der Literatur eine überwiegend negative Veränderung konstatiert worden ist. Positive Scores mit diskreten Werten zwischen 1 und 3 prognostizieren eine Verbesserung des jeweiligen, den ökologischen Zustand beschreibenden Parameters. Die Bewertung erfolgt nur für Maßnahme-Effekt-Kombinationen, die eine Änderung durch die IPS-Praxis erfahren haben. Ein *Bewertungs-Score B* kann somit nicht den Wert 0 annehmen. Die Bewertung fußt auf der Expertenmeinung der Autoren und bietet eine orientierende Einschätzung der Wirkung von IPS-Maßnahmen.

An zwei Beispielen wird die Vorgehensweise bei der Bewertung skizziert.

► **Beispiel 1: negativer *Bewertungs-Score B***

- 1: leichte negative Auswirkung, bis - 3: starke negative Auswirkung

Die IPS-Maßnahme hat zu einer leichten Erhöhung der Deckung der Segetalflora in den untersuchten Kulturen durch *neutrale* Wildkräuter, jedoch auch zu einer drastischen Erhöhung unerwünschter, sehr schwer zu bekämpfender Beikräuter geführt; in der Konsequenz ist der Herbizideinsatz in den vier Folgejahren und -kulturen um 50% erhöht worden.

→ -2 = mittlere negative Auswirkung der IPS-Maßnahme

► **Beispiel 2: positiver *Bewertungs-Score B***

1: leichte positive Auswirkung, bis 3: starke positive Auswirkung

Die IPS-Maßnahme sorgt auf der betrachteten Fläche langfristig für eine Verringerung des PSM-Einsatzes um mindestens 50%.

→ 3 = starke positive Auswirkung der IPS-Maßnahme

3.1.2 Stärke der Aussage: *Intensitäts-Score I*

Ergänzend zur Bewertung der Auswirkungen der IPS-Maßnahmen ist ein weiterer Teilscore definiert und für jede relevante Literaturstelle (Kapitel 2.3) angewendet worden. Dieser *Intensitäts-Score I* spiegelt die Stärke der Aussage wider. Wie auch der *Bewertungs-Score B* basiert *I* auf einem Fachurteil, das verschiedene Kriterien integriert. Der *Intensitäts-Score I* kann Werte zwischen 1 und 5 annehmen. Ein Score mit dem Wert 5 stellt die höchstmögliche, ein *I-Score* von 1 eine sehr geringe Aussagekraft für die Bewertung der ökologischen Vorzugswürdigkeit einer bestimmten Maßnahme-Effekt-Kombination dar. Die drei Hauptkriterien *Datenbasis*, *Aktualität* und *Passgenauigkeit*, die in die Ableitung des *Intensitäts-Scores* einfließen, werden im Folgenden erläutert.

- Ein zentrales Kriterium zur Bewertung der Aussagekraft einer Studie, ist die zum Beleg der Schlussfolgerungen in der Publikation genutzte *Datenbasis*. Meta-Studien, die eine Vielzahl von qualitativ hochwertigen Datensätzen integrieren, werden mit einem hohen *Intensitäts-Score* von 4 oder 5 bewertet. Hohe *I-Scores* sind auch für Studien mit aussagekräftigen, freilandbezogenen Experimenten vergeben worden. Studien, die anhand wenig überzeugender Belege eine subjektive Position eingenommen haben, werden mit geringen *I-Scores* von 1 bis 2 bewertet. Eine Aussagestärke mit einem Wert von *I=1* ist vergeben worden, wenn die getroffene Aussage zum Maßnahmen-Effekt-Paar nicht stichhaltig mit einschlägiger Literatur oder empirischen Daten belegt worden ist.

- ▶ Das Alter und die *Aktualität* einer Literaturstelle wird zur Bewertung herangezogen, wenn aktuellere Arbeiten das jeweilige Resultat widerlegt haben und so die ältere Studienlage nur noch eine geringere Aussagekraft besitzt. Historisch überholte Ansichten wurden aber nicht gänzlich von den Bewertungen ausgeschlossen, weil sie für die Sichtweisen der Anwender*innen bei der aktuellen Anwendung der IPS-Maßnahme weiterhin eine Rolle spielen können. Hohe *I-Scores* wurden vergeben, wenn die Schlussfolgerungen hinreichend mit aktuellen Referenzen belegt worden sind.
- ▶ Die *Passgenauigkeit* der Studiendaten für die jeweils untersuchte Maßnahme-Effekt-Kombination umfasst unter anderem den Untersuchungsort und die Übertragbarkeit der getätigten Aussage. Der höchste *Intensitäts-Score* 5 wird vergeben, wenn die betrachtete Studie exakt die kausale Verknüpfung einer untersuchten Maßnahme-Effekt-Kombination behandelt hat. Eine Studie ist von hoher allgemeiner Aussagekraft, wenn sie nach aktuellen wissenschaftlichen Standards und Auswertungsmethoden durchgeführt worden ist. Sie weist dann eine gute Übertragbarkeit auf räumlich-zeitliche Szenarien in einem für die Situation in Deutschland vergleichbaren Landschaftsraum auf.

3.1.3 Kombination Relevanz und Stärke der Aussage: Gesamt-Score *INTEGER*

Die Wirkungs-Richtung, die sich in der Begutachtung durch eine negative oder positive Bepunktung im *Bewertungs-Score B* ausdrückt, ist unter Berücksichtigung der inhaltlichen Relevanz der Aussage im *Intensitäts-Score I* erweitert worden. Aus den Teil-Scores *B* und *I* wird ein Gesamtscore *INTEGER* für jede Maßnahme-Effekt-Kombination abgeleitet (Formel 1).

Formel 1: Formel zur Berechnung des *INTEGER-Scores*

$$INTEGER = \frac{1}{n} \times \sum \frac{B \times I}{\max(B \times I)}$$

Die beiden Teil-Scores für jede Maßnahme-Effekt-Kombination werden multipliziert und durch Division mit dem maximal möglichen Gesamtscore ($I: 3 \times B: 5 = 15$) normiert. Der normierte Gesamtscore *INTEGER* liegt im Bereich zwischen -1 und 1. Durch Aufsummierung des Gesamtscores von allen Literaturstellen einer Maßnahme-Effekt-Kombination und Division durch die Anzahl *n* dieser betrachteten Literaturstellen wird ein mittlerer *INTEGER-Score* für jede betrachtete Kombination berechnet. Der maximale Wert von 1 bedeutet, dass die betrachtete IPS-Maßnahme den bestmöglichen positiven Einfluss auf die jeweils betrachtete ökologische Dimension (umweltbezogene Effekte wie in Kapitel 3.2 definiert). Ein negativer Wert ist entsprechend der Definition des Bewertung-Scores ein Indikator für eine negative Auswirkung auf den betrachteten umweltbezogenen Aspekt.

Der *INTEGER-Score* integriert alle verfügbaren Informationen aus der ausgewählten Literatur. Dadurch kann im direkten Vergleich zur üblichen Agrarpraxis dargestellt werden, wenn eine IPS-Maßnahme eine starke, valide positive oder negative Änderung des betrachteten umweltbezogenen Parameters bewirkt (Werte nahe -1 oder 1). Ein geringer, negativer oder positiver *INTEGER-Score* nahe null besagt, dass eine Maßnahme eine geringe Evidenz hinsichtlich der Verbesserung umweltbezogener Parameter aufweist.

Anmerkung: Bei der Zusammenfassung der Literaturstellen zu einem Gesamtwert pro Maßnahme-Effekt-Kombination wird mathematisch ein arithmetischer Mittelwert gebildet. Dies ist hier trotz des ordinalen Charakters der berechneten Teil-Scores *B* und *I* möglich, da der zugrundeliegende Wertebereich der Aussagestärke und des betrachteten ökologischen Effekts kein diskreter, sondern ein kontinuierlicher ist. Dies ist gültig für eine hohe Anzahl an verarbeiteter Literatur und Informationen und wird durch die Möglichkeit der Erweiterung der Bewertungsmatrix mit weiteren Daten gerechtfertigt. Eine Gewichtung der Scores durch die

Anzahl der Literaturstellen pro Maßnahme-Effekt-Kombination erfolgt nicht innerhalb des *INTEGER*-Indikatorwerts, da aufgrund der inhomogenen Anzahl der Referenzen pro Kombination eine Verzerrung auftreten würde. Vielbeschriebene, ineffektive Maßnahmen könnten so überbewertet werden. Um diesen Faktor jedoch trotzdem angemessen berücksichtigen zu können, wird die Anzahl der gefundenen Literaturstellen in den Netzdiagrammen der *INTEGER-Scores* dokumentiert (im Abschnitt 3.4). Auf diese Weise ist es ebenfalls möglich, Wissenslücken zu Maßnahme-Effekt-Kombinationen zu identifizieren.

3.2 Gruppierung der Maßnahmen und Effekte

Zur Bewertung der IPS-Maßnahmen ist zunächst die Bildung von aussagekräftigen Maßnahmen- und Effekt-Kategorien erfolgt. Der *INTEGER-Score* (zur Berechnung siehe Abschnitt 3.1) wird für jede paarweise Kombination aus Maßnahme und Effekt gebildet. Die Ausprägung des Themenfeldes und die erwarteten Maßnahmen- und Effekt-Kategorien sind durch die Zusammenstellung der Suchwörter in der systematischen Suche bereits angelegt worden (Kapitel 2.1.1). Nach der Einschränkung der Trefferliste auf eine handhabbare Anzahl von relevanten Literaturstellen (Abschnitt 2.3.1) zeigt sich, dass nicht zu jedem Thema über die Suche eine aussagekräftige Literaturstelle gefunden worden ist. Ferner werden in wissenschaftlichen Artikeln immer mehrere Begriffe synonym gebraucht und die thematische Abdeckung erweist sich als äußerst breit. Für eine übersichtliche Klassifikation sind deshalb ähnliche Begriffe und verwandte Maßnahmen bzw. Effekte zusammengefasst worden. So hat sich bei den Effekt-Kategorien (Tabelle 10) während des Bewertungsprozesses herausgestellt, dass sich die ursprünglichen Kategorien im Bereich *Biodiversität* im Rahmen dieser Literaturrecherche nicht differenzieren lassen. Die Datenlage für eine Einzelbetrachtung ist nicht ausreichend gewesen. Aus den acht Effekt-Kategorien *Agrobiodiversität | agrobiodiversity*, *Feldvögel & Avifauna | fieldbirds*, *Insekten | insects*, *Bestäuber | pollinators*, *Schutz gefährdete Arten | protection endangered species*, *Artenzahl | species diversity*, *Bodenbiodiversität | soil biodiversity* und *Biodiversitätsindices | biodiversity indices* ist deshalb die Sammelkategorie *Biodiversität | biodiversity* gebildet worden.

Viele der durch die Maßnahmen erzielten Effekte lassen sich konzeptionell als *Ökosystemfunktionen* zur Bereitstellung unterstützender *Ökosystemdienstleistungen* auffassen. Es wird daher häufig eine Verbesserung des Zustands des Naturhaushaltes indiziert und weiterführend als *Naturhaushalt & Ökosystemfunktionen* bezeichnet. Am Beispiel dieser Effektkategorie wird deutlich, dass einige der gebildeten Kategorien eher als breite Sammelkategorien wirken, während wiederum andere Klassen enger definiert werden können (zum Beispiel die Reduktion des PSM-Einsatzes).

Tabelle 9 listet 19 Kategorien auf, in die zugehörige IPS-Maßnahmen eingeteilt worden sind. In Kapitel 3.4 erfolgt ein systematischer Vergleich und eine kritische Bewertung der Maßnahme-Kategorien im Hinblick auf die erwarteten Effekte.

Tabelle 9: Auflistung der Maßnahmengruppen mit den entsprechenden gebräuchlichsten englischen Begriffen. In Klammern hinter der Nummer der Maßnahmenkategorie die vorrangig zugeordneten, übergeordneten Prinzipien des IPS (Beschreibung nach Barzman et al. (2015) siehe Kapitel 1.2)

Nr. (IPS-Prinzip)	Maßnahme Measures
1 (P4)	Alternative PSM & Pflanzenstärkung alternative PPP (biorationals)
2 (P1)	Aussaattermin sowing date
3 (P3)	Bekämpfungsschwelle economic threshold
4 (P4)	Biologische Schädlingskontrolle biocontrol agents
5 (P1)	Boden- und Landschaftsschutz land conservation
6 (P2, P3, P5 P6)	Digitale Entscheidungshilfesysteme & Präzisionsackerbau digital support systems & precision farming
7 (P4)	Mechanische Schädlingsbekämpfung, physikalische Barrieren mechanical pest control & physical barriers
8 (P1)	Naturräumliche Infrastruktur semi-natural habitats
9 (P1)	Nützlingsförderung natural enemies
10 (P1)	(Aspekte des) Ökologischen Landbaus & Managements ecological farming & management
11 (P1)	Prävention (invasive Arten) prevention (invasive species)
12 (P4, P5)	Risikoarme PSM low-risk PPP
13 (P4)	Schädlingsresistente Sortenwahl & -entwicklung pest resistant varieties
14 (P1)	Bodenmanagement (pfluglose Bodenbearbeitung und Düngung) conservation tillage, no tillage
15 (P1)	Standortgerechte Sortenwahl und -mischungen site-specific varieties & crop mixtures / Intercropping
16 (P3)	Teilflächenanwendung PSM & andere Reduktion PSM partial area application
17	unbestimmt not determined
18 (P1)	Vielfältige Fruchtfolgen diverse crop rotation
19 (P8)	Wissensvermittlung knowledge transfer

Im Folgenden werden die 18 separat verwendete Maßnahmengruppen definiert und beschrieben.

1. Alternative PSM & Pflanzenstärkung aus dem Ökologischen Landbau

Unter dem Begriff *biorationals* werden biologische PSM und Pflanzenstärkungsmittel zusammengefasst, die Wirkstoffe natürlichen Ursprungs enthalten (meist Mikroorganismen oder Pflanzenextrakte). Sie lassen sich nach einer allgemein gebräuchlichen Definition als *biologisch hergestellt oder, falls synthetisch hergestellt, strukturell ähnlich und funktionell identisch mit einem biologisch vorkommenden Material* beschreiben. Die alternativen PSM-

Wirkstoffe werden in der EU auf Grundlage der EU-Öko-Verordnung (EG) Nr. 834/2007 (Europäischer Rat, 2007) ausgewählt. Sie sind in der Durchführungsverordnung (EU) 2021/1165 (Europäische Kommission, 2021) gelistet und dürfen sowohl im konventionellen als auch im ökologischen Landbau eingesetzt werden.

2. Aussattermin

Der Zeitpunkt der Aussaat einer Fruchtart im Jahresverlauf kann das Risiko und Ausmaß der Schaderreger beeinflussen. Dabei kann der Schaden durch den schwachen oder starken Befall mit Schadinsekten variieren, oder er kann durch die saisonal unterschiedliche Fähigkeit der Kulturpflanzen, die Schäden zu kompensieren, moduliert werden.

3. Bekämpfungsschwelle

Die Methode der Bestimmung einer ökonomischen Schadschwelle (*economic threshold*, synonym: *wirtschaftliche Schadensschwelle*, *Bekämpfungsschwelle*, *Bekämpfungsrichtwert*) ist ursprünglich von Stern et al. (1959) eingeführt worden. PSM sollten nur genutzt werden, wenn die ökonomische Bilanz zwischen den zu erwartenden Mehreinnahmen aufgrund einer geringeren Schaderregerdichte und der Kosten der eingesetzten PS-Maßnahme positiv ausfällt (*economic injury level*, zur Übersicht Ramsden et al., 2017). Somit würde die Bekämpfung durch die Anwendung chemischer bzw. nicht-chemischer PSM oder alternativer PS-Maßnahmen wirtschaftlich sinnvoll werden.

4. Biologische Schädlingskontrolle durch gezieltes Einbringen von Antagonisten

Als biologische Schädlingskontrolle werden IPS-Maßnahmen bezeichnet, bei den lebende Organismen (Nützlinge, wie Schlupfwesen oder Nematoden) proaktiv eingesetzt werden, um die Populationsdichte von Schadorganismen deutlich zu verringern oder deren schädliche Wirkungen zu mindern. Hiervon sind jedoch mikrobielle PSM abzugrenzen (in Maßnahmengruppe 1 oder 12 inbegriffen). Bei der biologischen Schädlingsbekämpfung sorgen natürliche Gegenspieler (meist Fraßfeinde oder Parasiten) für die Regulation der Schaderregerpopulationen. Durch den aktiven Einsatz der Antagonisten ist diese Maßnahme enger gefasst als die Maßnahme der allgemeinen Nützlingsförderung bzw. der Förderung der naturräumlichen Infrastruktur.

5. Boden- und Landschaftsschutz

Hierin werden Konzepte zusammengefasst, die in einem ganzheitlichen Ansatz verschiedene Instrumente des Landschaftsmanagements zur Aufrechterhaltung der Biodiversität und der Ökosystemdienstleistungen (wie die biologische Schädlingskontrolle oder die Bestäubungsleistung von Kultur- und Wildpflanzen) in Agrarlandschaften verknüpfen. Dabei wird unterschieden zwischen *land-sparing*, also die räumliche Trennung zwischen Hohertrags-Agrarstandorten und natürlichen Habitaten und *land-sharing*, die Etablierung von Agrarsystemen, die auch für die natürliche Tier- und Pflanzenwelt Habitate bieten. Wünschenswert ist es, die beiden Sichtweisen der Landschaftsnutzung zu vereinen (Grass et al., 2019). In diese Kategorie fallen nur Publikationen, die sich explizit mit den Zielkonflikten der Landnutzung befassen. IPS-Maßnahmen, die eine Aufwertung der naturräumlichen Ausstattung bedeuten, können meist auch unter *land-sharing* gefasst werden und sind im Kapitel 3.4.3 ausgeführt.

6. Digitale Entscheidungshilfesysteme & Präzisionsackerbau

Bei der Maßnahme der Nutzung digitaler Entscheidungshilfesysteme (englisch: *Decision Support System*) stehen die Methoden im Fokus, die den IPS mittels informationstechnischer Werkzeuge unterstützen. Die Methoden umfassen die Erstellung von landwirtschaftlichen Datenrepositorien, die Programmierung von Vorhersagemodellen des Schädlingsbefalls und der

von Geographischen Informationssystemen (*GIS*) gesteuerte Einsatz von landwirtschaftlichen Geräten. Auch der Drohneneinsatz zur mechanischen Unkrautbekämpfung oder die Kalibrierung von KI zur bildgestützten Erkennung von notwendigen Interventionen im Bestand werden hier betrachtet.

7. Mechanische Schädlingsbekämpfung & physikalische Barrieren

Unter diesen alternativen Maßnahmen zur Anwendung von Herbiziden werden die mechanische Bodenbearbeitung (überwiegend mehrfache, fein krümelige Saatbettbereitung vor der Aussaat oder das Hacken im aufgelaufenen Bestand), mechanische Fallen und Hindernisse, aber auch das Mulchen als physikalische Barriere verstanden. *Handpicking*-Methoden fallen ebenfalls in diese Kategorie.

8. Naturräumliche Infrastruktur

Die naturräumliche Infrastruktur in Agrarlandschaften besteht zumeist aus ruderalisierten Säumen und Feldrainen oder kleineren Gehölzstrukturen, die wertvolle Habitate für die Insekten- und Pflanzenvielfalt bieten, wenn sie möglichst wenig von umliegenden, intensiv genutzten Acker- oder Grünlandstrukturen beeinträchtigt werden (Fartmann et al., 2021). Im Kontext dieser Studie sind Eingriffe in die naturräumliche Ausstattung eines agrarischen Landschaftsraums auf unterschiedlicher Skalenebene gemeint (auf Betriebsebene oder darüber hinaus).

9. Nützlingsförderung

Nützlinge werden in der Landwirtschaft als Organismen definiert, die unter anderem bewirken, dass Schadorganismen an der Ausbreitung oder Vermehrung gehindert werden und somit einen Teil der Schädlingsbekämpfung ausmachen. Es fallen ebenfalls Organismen in diese Kategorie, die zur Bestäubungsleistung und damit zum Ertrag einer landwirtschaftlichen Fläche oder zum Erhalt der Bodenfruchtbarkeit beitragen (LTZ, 2020). Bei der Nützlingsförderung wird also nicht eine kurzzeitige, manipulative Freisetzung von Antagonisten betrachtet (siehe Maßnahme 4), sondern eine langfristige direkte und indirekte Förderung (durch Nistplatz-Bereitstellung) von Nützlingspopulationen. Diese Eigenschaften und diese Definition unterscheiden Nützlinge von Akteuren der biologischen Schädlingskontrolle. Für die Umsetzung eines wirksamen IPS ist es essenziell, dass die Populationen von Schädlingen und Nützlingen in einem weitgehend naturnahen, ökologisch ausgeglichenen Verhältnis zueinanderstehen, um massenhafte Vermehrungen der Schädlinge einzugrenzen (Sachverständigenrat für Umweltfragen, SRU, 2018).

10. Aspekte des ökologischen Landbaus & Managements

Unter der Maßnahme *Ökolandbau (organic agriculture)* ist keine einzelne IPS-Maßnahmenkategorie zu verstehen. Der Begriff umfasst vielmehr eine Reihe von Regeln und Methoden, die auch im IPS eine Rolle spielen. Der *Ökolandbau (oder ökologische Landwirtschaft, biologische Landwirtschaft)* verzichtet auf mineralische Düngemittel, auf den Einsatz gentechnisch veränderter Organismen und auf chemisch-synthetische PSM (Heinrich-Böll-Stiftung, 2020, Bioland e.V., 2020) und vereint viele Methoden aus den hier beschriebenen Maßnahmengruppen in einem eigenständigen Konzept.

11. Prävention (invasive Arten)

Präventive Maßnahmen zur Kontrolle von Schädlingen spielen im IPS eine zentrale Rolle. Durch den global vernetzten Handel und den damit verbundenen Austausch landwirtschaftlicher Produkte ist die Gefahr der Einschleppung gebietsfremder Schaderreger ein zunehmendes Problem, das in der Literatur ausgiebig erörtert wird. In dieser Studie wird daher die Maßnahme *Prävention der Einwanderung invasiver Arten* separat berücksichtigt. Die Verhinderung der Einwanderung kann durch Quarantäne und Monitoring der aktuellen Verbreitung inklusive der Modellierung einer zukünftig möglichen Verbreitung auf Basis der ökologischen Nische vorgenommen werden (Asplen et al., 2015).

Weitere Möglichkeiten der Prävention, die nicht spezifisch für invasive Arten sind, bieten sich durch Anbautechniken, die mit natürlichen Prozessen in Einklang stehen, durch die Förderung der Diversität durch *intercropping* oder durch die räumliche Nähe von mehreren Kulturarten. Auch die Anwendung einer *push-pull*-Strategie, sowie der alternierende Anbau von resistenten und normalen Sorten zählen zu dieser Kategorie, sofern dadurch der Schaderregerdruck stark vermindert werden kann.

12. Risikoarme PSM

Risikoarme PSM (low-risk pesticides) müssen die Zulassungsbedingungen für PSM und die Bestimmungen für low-risk Kriterien, wie im Anhang II, Punkt 5 Verordnung EG/1107/2009 gefordert, erfüllen (EU, 2009C). Bei dieser Maßnahme handelt es sich also um den Einsatz einer Gruppe von PSM, die aufgrund ihrer normativen Einordnung von den Alternativen PSM (Maßnahmengruppe 1) unterschieden und separat betrachtet werden.

13. Schädlingsresistente Sortenwahl & -entwicklung

Ein wichtiger Baustein des IPS ist die Vermeidung von relevanten Schädlingspopulationen und damit einhergehenden PS-Maßnahmen (*i.e.* Einsatz von PSM) durch den Anbau von weitgehend schädlingsresistenten Nutzpflanzen (Beispiel Bt-Pflanzen, Altieri et al., 2004). Resistente Sorten basieren auf natürliche Mechanismen der Resistenzbildung oder werden durch klassische und gentechnische Züchtungsverfahren erzeugt. Viele Pflanzen haben im Lauf der Evolution Abwehrmechanismen gegen Bakterien, Nematoden, Pilzkrankheiten, Schadinsekten und Viren entwickelt.

14. Schonende, pfluglose Bodenbearbeitung (*conservation tillage*)

Der Begriff konservierende Bodenbearbeitung umfasst eine Reihe von nichtwendenden Bodenbearbeitungsmaßnahmen (ohne Pflug). Die Einteilung unterschiedlich stark konservierender Maßnahmen erfolgt nach der prozentualen Bedeckung des Bodens nach der Bearbeitung (>30 % Bedeckung: *conservation tillage*; 15-30 %: *reduced tillage*; 0-15 %: *conventional tillage*). Zur Bodenbearbeitung gehören verschiedene Aussaatverfahren, wie die Direktsaat (*zero till, no-till*), Mulchsaat (*mulch till*) und Reihensaart (*ridge till*). Die konservierende Bodenbearbeitung hat positive Effekte auf die Bodenbiodiversität, vermindert Erosion und verbessert den Wasserhaushalt (nach Frielinghaus, 2000).

15. Standortgerechte Sortenwahl und -mischungen

Wuest et al. (2021) nehmen eine eingehende Betrachtung der kommerziellen Entwicklung von Sortenmischungen im Ackerbau vor. Aktuell fehlen noch allgemeine Gestaltungsprinzipien zur Entwicklung von Mischungen in Züchtungsprogrammen, wodurch eine breite Anwendung von Sortenmischungen in der agrarwirtschaftlichen Praxis bisher nicht gegeben ist. Das ökologische Prinzip der Wirksamkeit von Sortenmischungen besteht in Nischenkomplementarität der zusammengestellten Kulturpflanzenarten. Die unterschiedlichen Interaktionen mit der biotischen und abiotischen Umwelt und so entstehende Synergien sind häufig unzureichend

verstanden. Untersuchungen bestätigen jedoch die positiven Effekte von standortgerechten Sortenmischungen, vor allem im Bereich der Krankheitsresistenz (mit dadurch möglicher Reduktion von PSM und Folgewirkungen auf Ökosystemleistungen), Ertragsstabilität und Ertragssteigerung.

16. Teilflächenanwendung von PSM & andere PSM-Reduktionsmaßnahmen

Teilflächen können durch räumlich genauere Bestimmung von befallenen Teilbeständen identifiziert und dann gezielt mit PSM behandelt werden, siehe auch Diskussion und Darstellung zum *notwendigen Maß des PS*.

17. Vielfältige Fruchtfolgen

Eine vielfältige Fruchtfolge zeichnet sich durch einen (intra-)saisonalen Wechsel der angebauten Fruchtarten aus und berücksichtigt die Bodenfruchtbarkeit durch die unterschiedlichen Ansprüche der Kulturpflanzen an den Wasser- und Nährstoffhaushalt des Bodens. Der kulturspezifische Schädlingsdruck wird dadurch ebenfalls vermindert. Im ökologischen Landbau werden bis zu neunteilige Fruchtfolgen praktiziert. Die aktuelle GAP sieht vor, dass Landwirte bei fünfgliedrigen Fruchtfolgen mit einem 10 %igen Leguminosenanteil über die Direktzahlungen zusätzlich vergütet werden können (Quelle: Bundesministerium für Landwirtschaft und Ernährung).

18. Wissensvermittlung und Beratung

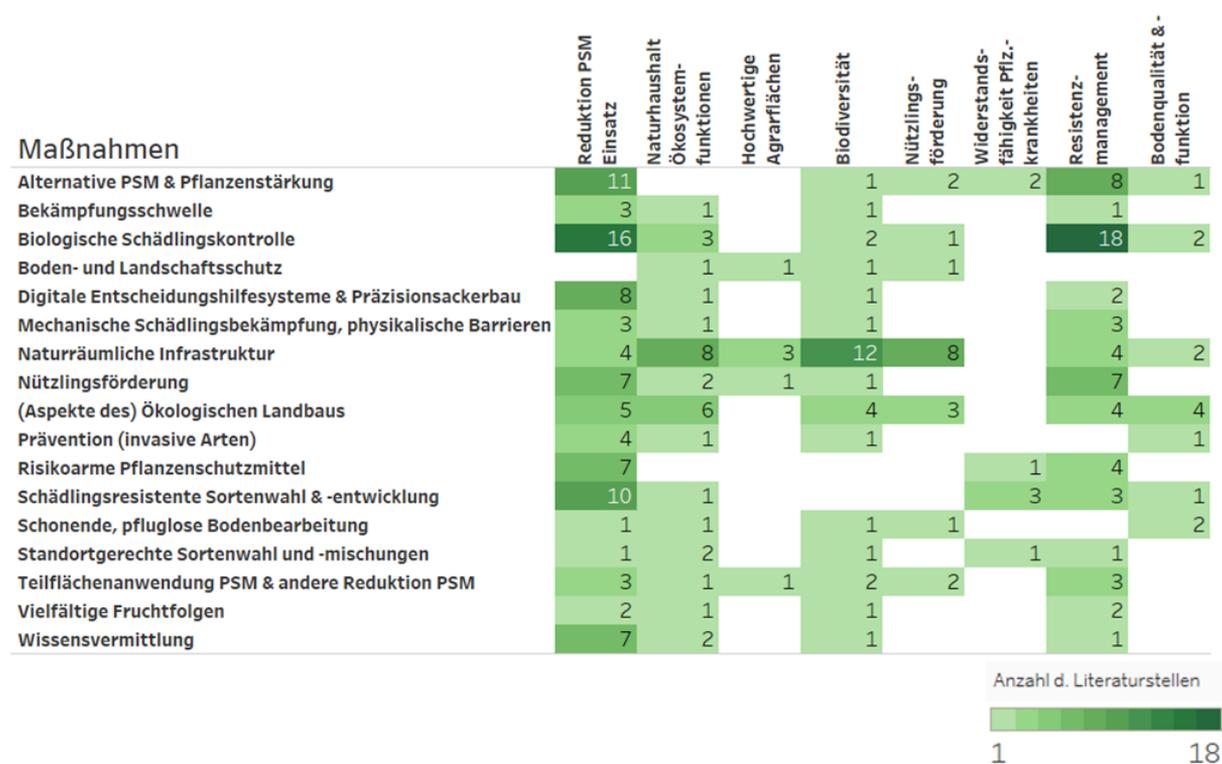
Neben der fehlenden wissenschaftlichen Datenlage sind im Bereich der IPS-Maßnahmen jedoch gleichermaßen Lücken im Wissenstransfer identifiziert worden. Eine Schlüsselrolle in diesem System kommt nach den Analysen von Tiktak et al. (2019) dabei der Landschaftsberatung zu, die für einen Großteil der Landwirte*Landwirtinnen eine Hauptquelle der Informationen zu Strategien im PS darstellen.

Tabelle 10 listet die acht Kategorien auf, in die Effekte der IPS-Maßnahmen eingeteilt worden sind.

Tabelle 10: Auflistung der Effektkategorien mit den entsprechenden gebräuchlichsten englischen Begriffen.

Nr.	Effekt effect
1	Reduktion PSM-Einsatz & Exposition reduction amount of & exposure to PPP
2	Naturhaushalt & Ökosystemfunktionen ecosystem & ecosystem services
3	Hochwertige Agrarflächen HNV farmland index
4	Biodiversität biodiversity
5	Nützlingsförderung natural enemies
6	Widerstandsfähigkeit gegen Pflanzenkrankheiten pest resistance
7	Resistenzmanagement resistance management
8	Bodenqualität und -funktion soil quality & function

Abbildung 10: Anzahl der Literaturstellen pro Maßnahme-Effekt-Kombination.



Quelle: Eigene Darstellung, Darwin Statistics 2023

Abbildung 10 zeigt die Häufigkeit der Nennung jeder möglichen Maßnahme-Effekt-Kombination. Die biologische Kontrolle von Schädlingen ist insgesamt sehr häufig thematisiert worden und hat zumeist einen Effekt auf die Menge und Häufigkeit von PSM-Anwendungen, als auch auf das Management von Resistenzen (gegenüber Insektiziden) gehabt. Veränderungen der naturräumlichen Infrastruktur (semi-natürliche Habitate, Blühflächen, Hecken und Feldgehölze) werden zumeist mit Wirkungen auf die Biodiversität in Verbindung gebracht. Für viele der Kombinationen sind keine relevanten aussagekräftigen Literaturstellen gefunden worden (leere Felder bzw. nicht dargestellte Maßnahmen). Zur Maßnahmengruppe *Aussaattermin* wurden keine Literaturstellen identifiziert. Diese Maßnahmen werden daher in den folgenden Abschnitten 3.3 und 3.4 nicht wieder aufgegriffen.

3.3 Bewertung der Maßnahmen und Effekte

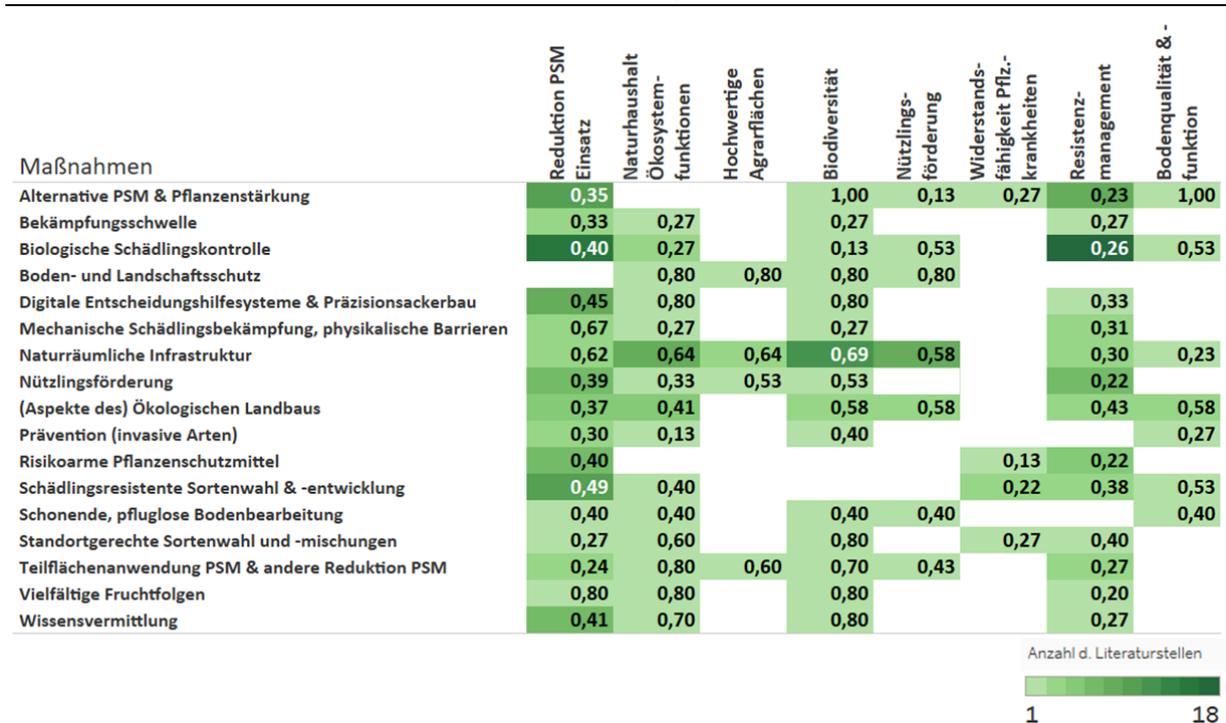
Im Anschluss an die Literaturanalyse ist mit Hilfe der Effekt- und Relevanzbewertungen für jede näher untersuchte Literaturstelle ein kombinierter Gesamt-Score *I* berechnet worden. Die arithmetischen Mittelwerte dieser Scores werden als *INTEGER-Score* für jede Maßnahme-Effekt-Kombination in Abbildung 11 dargestellt (Berechnung der einzelnen Scores wie in Kapitel 3.1 beschrieben). Dabei zeigt der unterliegende Färbungsgrad jeder Zelle die Anzahl der analysierten Literaturstellen an, die für die Berechnung des jeweiligen Scores herangezogen worden ist.

Aus dieser Übersicht wird deutlich, dass sich ein hoher Anteil der betrachteten Forschungsarbeiten mit einer Reduktion von PSM als Effekt des IPS beschäftigen, auch wenn diese Reduktion nicht im Mittelpunkt der jeweiligen Forschung gestanden hat und selten quantifiziert worden ist. Die PSM-Reduktion kann durch eine Vielzahl von Maßnahmen erreicht werden, beruht hier jedoch vor allem auf Maßnahmen der biologischen Schädlingskontrolle, der Nutzung von alternativen PSM und Mitteln zur Pflanzenstärkung. Als weitere Maßnahmen zur PSM-Reduktion ist eine schädlingsresistente Sortenwahl und -entwicklung, sowie digitalen

Entscheidungshilfesysteme & Präzisionsackerbau untersucht worden. Vielfältige Fruchtfolgen scheinen sehr positiven Effekte auf die PSM-Reduktion zu haben (*INTEGER-Score*: 0,8), dieses Ergebnis wird jedoch nur von einer Literaturstudie belegt.

Auch für die Effekte der Resistenzmanagements von Kulturpflanzen, sowie der Förderung der Biodiversität ist eine hohe Anzahl relevanter Literaturstellen gefunden worden. Die Biodiversität wird dabei vor allem in Bezug auf die naturräumliche Infrastruktur betrachtet und weist eine gesichert positive Entwicklung durch diese Maßnahmenkategorie auf. Lücken werden bei dieser Literaturanalyse für die Wirkungen von IPS-Maßnahmen auf die Bodenqualität und Bodenfunktion identifiziert. Auch die Effekte auf hochwertige Agrarflächen (*High Nature Value-Flächen*, HNV) und die Widerstandsfähigkeit von Kulturpflanzen gegenüber Pflanzenkrankheiten werden nur untergeordnet betrachtet. Die Nützlingsförderung als Effekt von IPS-Maßnahmen wird ebenfalls nur in Kombination mit der Entwicklung der naturräumlichen Infrastruktur untersucht und zeigt durch diese Maßnahme ebenfalls einen vergleichsweise positiven Effekt. Die Betrachtung und Bewertung der einzelnen IPS-Maßnahmen mit ihrer Gesamtwirkung werden im folgenden Kapitel dargestellt.

Abbildung 11: Bewertungsmetrik der IPS-Maßnahme-Effekt-Kombinationen. In den Zellen sind die berechneten *INTEGER-Scores* (Bereich -1 bis 1) dargestellt, die Intensität der Einfärbung einer Zelle entspricht der Anzahl der berücksichtigten Literaturstellen in Relation zur Gesamtzahl innerhalb der jeweils betrachteten Kombination.



Quelle: Eigene Darstellung, Darwin Statistics 2023

3.4 Bewertung der Wirksamkeit von IPS-Maßnahmen auf die Reduktion der Risiken durch PSM-Einsatz und den Erhalt der Agrar-Biodiversität

Die Erkenntnisse aus der Literaturanalyse werden für ausgewählte, gut dokumentierte IPS-Maßnahmenkategorien vertieft. Die relative Wirksamkeit einer Maßnahme auf ihre ökologische Vorzugswürdigkeit wird zwischen den verschiedenen Effektkategorien verglichen (z. B. von Schlüsselparametern wie der Verringerung der PSM-Aufwandmengen oder der Verbesserung von Kennwerten der Biodiversität). Dazu sind für jede Maßnahme die jeweiligen *INTEGER-Scores* der erfassten Effekte im Netzdiagramm dargestellt worden. Die Interpretationen und die Effektivität einer Maßnahme, die sich im *INTEGER-Score* ausdrückt, stellen die Perspektiven der Autoren*Autorinnen der ausgewerteten Publikationen dar und werden im Rahmen der Diskussion der jeweiligen Unterkapitel einer kritischen Betrachtung unterzogen und hinsichtlich ihrer Relevanz eingeordnet.

3.4.1 Maßnahme Biologische Schädlingskontrolle

Bei der biologischen Schädlingskontrolle (P 4) werden die Maßnahmen betrachtet, bei denen lebende Organismen die Populationsdichte oder die Wirkungen eines bestimmten Schadorganismus verringern. Diese Definition ist angelehnt an die Ausführungen von Eilenberg et al. (2001), die eine detaillierte Terminologie zur biologischen Schädlingskontrolle und ihren Teilbereichen erarbeitet haben. Dazu gehören nach Eilenberg et al. (2001) Maßnahmen der *klassischen biologischen Kontrolle*, bei denen in der Regel ein durch die gemeinsame Entwicklungslinie (*Koevolution*) an den Schaderreger angepasster Gegenspieler absichtlich eingeführt wurde, um den Schädling dauerhaft und langfristig zu bekämpfen. Diese Strategie der biologischen Schädlingsbekämpfung wird gemeinhin als *Inokulation* bezeichnet. Es werden lebende und vermehrungsfähige Organismen ausgebracht und der Schädling dadurch über einen Zeitraum kontrolliert. Dies wird von der Strategie der *inundation* (dt.: Überschwemmung) unterschieden, bei der die Organismen kurzzeitig und in hohen Mengen ausgebracht werden. Die Schädlingsbekämpfung erfolgt dabei ausschließlich durch die aktiv ausgebrachten Individuen, die sich nicht im Ökosystem etablieren können und daher lediglich transiente, regulierende Effekte erzielen können. Ein Beispiel für eine *inundation*-Bekämpfungsstrategie ist die Ausbringung zwar lebendiger, im Freiland aber nicht ausreichend zur Etablierung stabiler Populationen vermehrungsfähiger *Bacillus thuringiensis*-Sporen. Werden diese Bt-Toxine produzierenden Bakterien in großen Mengen ausbracht, können verschiedene Insektenarten (bspw. Schmetterlinge) erfolgreich kontrolliert werden. Der Effekt ist aber aufgrund des Wirkmechanismus auf ein enges Anwendungsfenster beschränkt und benötigt Fachwissen.

Drahtwürmer in Kartoffeln und Tomaten können mit entomopathogenen Pilzen bekämpft werden (die Methoden befinden sich in der Entwicklung). Die *Septoria*-Blattdürre in Weizen kann mit pilzlichen biologischen Schädlingskontrollmitteln basierend auf Präparaten, die aus der Gattung *Trichoderma* gewonnen werden, oder mit bakteriellen Zubereitungen auf Basis der Gattung *Bacillus* bekämpft werden. Kohlerdföhe (Gattung *Phyllotreta*) sind mit Hilfe von entomopathogenen, parasitischen Nematoden unter Kontrolle zu halten. Gut etabliert sind Ansätze, *Fusarium*-Arten in Getreidekulturen und Mais mit Hilfe von antagonistischen Pilzen und Bakterien zu bekämpfen (Lamichhane et al., 2017).

Ein weiterer Teilbereich der biologischen Schädlingskontrolle nach Eilenberg et al. ist die *conservation biological control*, die durch gezielte Veränderungen des Ökosystems oder der landwirtschaftlichen Praxis zu einer Förderung der natürlichen Feinde der Schadorganismen führen. Dieser Bereich besitzt Schnittstellen zu anderen IPS-Maßnahmen, die in dieser Untersuchung zum Teil zu anderen Kategorien, zum Beispiel der naturräumlichen Infrastruktur (Kapitel 3.4.3) oder der Nützlingsförderung (Kapitel 3.4.4), zugeordnet worden sind.

Die biologische Schädlingsbekämpfung im Bereich des IPS ist ein gut bearbeitetes Forschungs- und Anwendungsfeld. Von der analysierten Literatur können 25 % aller Referenzen dieser IPS-Maßnahmenkategorie zugeordnet werden.

Bei den bewerteten Effekten zeigt sich, dass die biologische Schädlingsbekämpfung einen besonders positiven Einfluss auf die Nützlingsförderung besitzt. Dies geht ebenfalls aus der Metaanalyse von Rusch et al. (2017) hervor, die in mehr als 70 % der untersuchten Studien einen positiven Zusammenhang zwischen dem Artenreichtum der Nützlinge und der Funktion *biologische Schädlingskontrolle* ermittelt. An diesem Beispiel zeigt sich die Schwierigkeit bei der Bewertung bestimmter Maßnahme-Effekt-Kombinationen, da eine klare Unterscheidung von Ursachen und Effekten in der Literatur nicht vorgenommen worden ist. Ein ähnliches Beispiel ist der mögliche Zieleffekt von IPS-Maßnahmen *Verbesserung der Bodenqualität*. Die Bodenqualität kann durch Methoden der biologischen Schädlingsbekämpfung positiv beeinflusst werden, wie in Studien mit Bezug auf die Nutzung arbuskulärer Mykorrhizapilze (AMF) beschrieben worden ist. AMF bilden mit den meisten Kulturpflanzen Symbiosen und können im Einsatz als Bodenverbesserungsmaßnahmen zur Kontrolle von *Verticillium*-Welke in Paprika wirken, Goicoechea (2009), oder im Weinbau nach einer vollständigen Boden-Fumigation gegen Nematoden die Widerstandsfähigkeit der Weinreben gegenüber zahlreichen Pflanzenkrankheiten verbessern (Trouvelot et al., 2015).

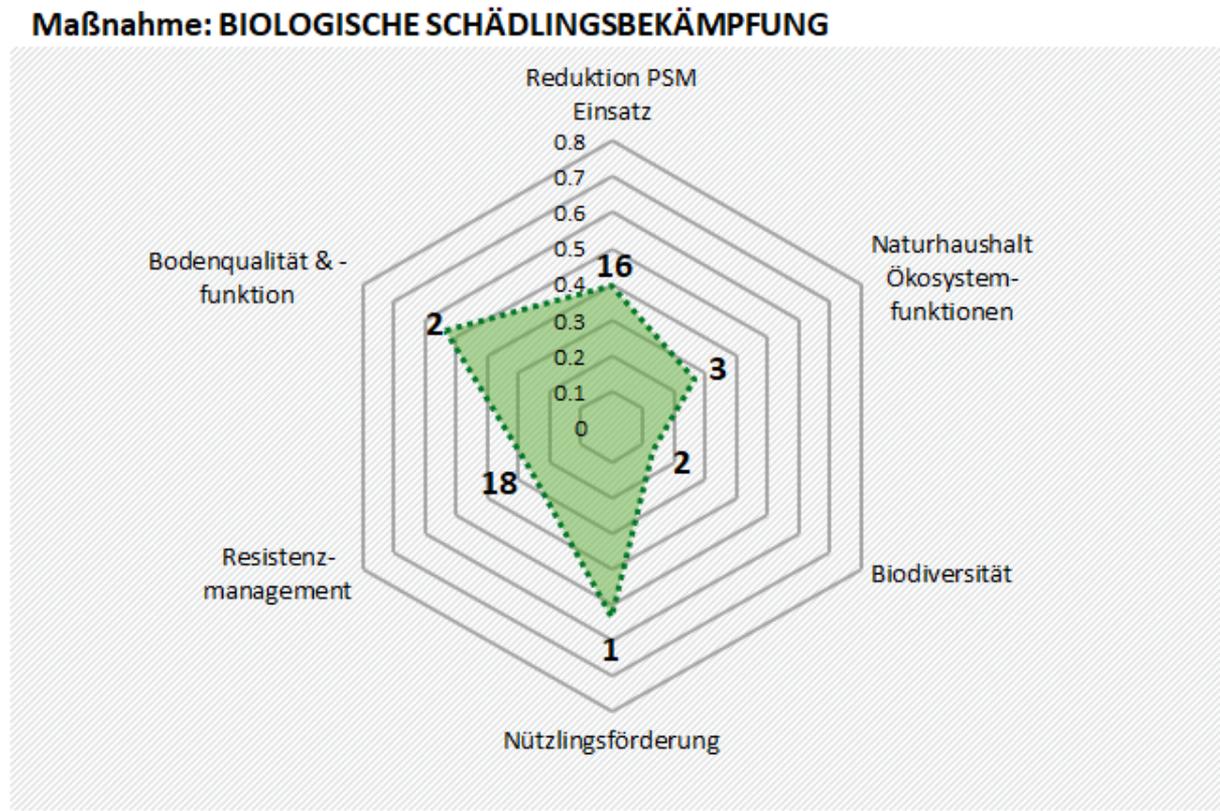
Die natürliche Regulationsfähigkeit von Ökosystemen bezüglich der Dichte der Schaderregerpopulationen hängt von der standorttypischen Biodiversität ab, die unter anderem durch die Wahl intensiver Anbaumethoden ohne die Integration von Agrarumweltmaßnahmen und den PSM-Gebrauch verringert wird (Geiger et al., 2010).

Der überwiegende Anteil der analysierten Literatur befasst sich mit der Wirkung einer IPS-Maßnahme in Richtung einer Reduktion der eingesetzten Menge von PSM, sowie den Effekten bezüglich des Resistenzmanagements der Kulturpflanzen. Es ist in einigen Fallstudien beschrieben worden, dass gezieltes Einbringen von Organismen mit direkten Kontrolleffekten auf Schädlingsorganismen eine direkte Reduktion des PSM-Einsatzes für verschiedene Kulturen zur Folge haben kann.

Campos et al. (2017) zeigen dies für die Tomatenminiermotte *Tuta absoluta* (Meyrick; Lepidoptera: Gelechiidae) durch die Einführung der räuberischen Wanze *Nesidiocoris tenuis* (Hemiptera: Miridae), Pertot et al. (2017) für die Kontrolle des Grauschimmelfäule-Pilzes *Botrytis cinerea* in Wein durch mikrobielle Gegenspieler, wie den Pilzen *Trichoderma atroviride* und *Aureobasidium pullulans* oder dem Bakterium *Bacillus subtilis*. Bei Pretty et al. (2015) wird dies über viele verschiedene Freiland-Kulturen, geographische Regionen und Schaderreger-Gegenspieler-Kombinationen dargestellt, bei Van Lenteren (2000) in zahlreichen Gewächshauskulturen.

Auch für die Bekämpfung von Lagerschädlingen zum Vorratsschutz wird die spezifische biologische Schädlingsbekämpfung eingesetzt (zum Beispiel Farrell et al., 2002, Collins et al., 2006). Aufgrund der geringen Relevanz zur hier betrachteten Fragestellung hinsichtlich einer ökologischen Vorzugswürdigkeit im Freiland werden diese Referenzen zum Vorratsschutz (kein Freilandeffekt) jedoch nicht tiefergehend berücksichtigt. Die Reduktion der PSM-Menge wird in den Veröffentlichungen in der Regel nicht quantifiziert, sondern vielmehr als Folgeeffekt der verbesserten Widerstandsfähigkeit der Kulturpflanzen und der Erhöhung der Schadschwelle qualitativ benannt.

Abbildung 12: Netzdiagramm der *INTEGER*-Scores (zur Ableitung siehe Kapitel 3.1) der aus der Literatur extrahierten Effekte für die IPS-Maßnahme *Biologische Schädlingsbekämpfung*. Die fettgedruckten Zahlen an den Eckpunkten des Netzes geben die Anzahl der verarbeiteten Literaturstellen für den jeweiligen Effekt an.



Quelle: Eigene Darstellung, Darwin Statistics 2023

In der Gesamtübersicht der analysierten Literatur ist festzustellen, dass die Forschungsberichte zur biologischen Schädlingsbekämpfung im Rahmen der IPS-Maßnahmen oftmals spezifische Fallbeispiele von Schaderreger-Gegenspieler-Kombinationen geschildert haben. Studien zur schädlings-bezogenen (spezifischen) biologischen Schädlingsbekämpfung zeigen in den meisten Fällen eine deutliche, aber moderate und selten konkret bemessene Reduktion des PSM-Einsatzes (*INTEGER*-Score 0.4). Aus den Erfahrungen im Gewächshaus können auch für Freiland-Ackerbaukulturen grundsätzliche Erfolgsstrategien zur biologischen Schädlingskontrolle abgeleitet werden. Es besteht allerdings noch erheblicher Forschungsbedarf, um die spezifischen Wechselwirkungen zwischen Schädling und Schädlingsbekämpfungsmittel zu verstehen und effiziente Kombinationen zu entwickeln. Ist die Spezifität einer Räuber-Beute- oder Parasit-Wirt-Beziehung gegeben, birgt diese Strategie die Chance, die eingesetzte PSM-Menge dauerhaft zu verringern und gleichzeitig die Auswirkungen der landwirtschaftlichen Praxis auf die Agrarökosysteme zu minimieren.

3.4.2 Maßnahme Digitale Entscheidungshilfesysteme

Bei der Nutzung digitaler Entscheidungshilfesysteme stehen die Methoden im Fokus, die den IPS mittels informationstechnischer Werkzeuge unterstützen. Digitale Systeme und mathematische Modelle kommen vor allem beim Monitoring von Schaderregerpopulationen (P 2 nach Barzmann et al., 2015), bei der Unterstützung zur Entscheidung bezüglich weitergehender Maßnahmen (P 3), sowie bei der Auswahl (P 5) und bei der Reduzierung des verwendeten PSM (P 6) zum Einsatz.

Viele dieser digitalen Werkzeuge sind zurzeit in der Entwicklungsphase, wie zum Beispiel der flächendeckende, automatisierte Einsatz von Drohnen zur gezielten PSM-Ausbringung und entsprechender PSM-Reduktion oder die Nutzung von KI als Entscheidungshilfesystem. Diese Innovationen sind deshalb noch nicht flächendeckend im kommerziellen Einsatz und auch in der Literatur im Vergleich zu anderen IPS-Maßnahmen nicht regelmäßig vertreten.

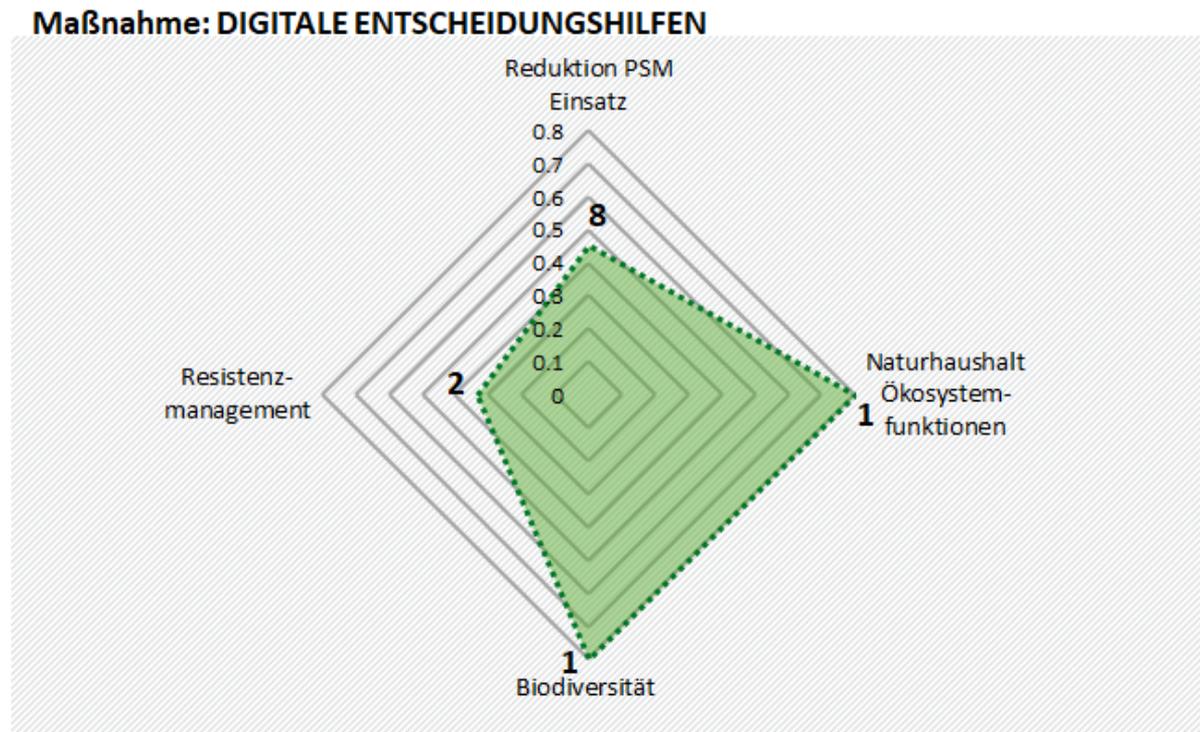
Aus diesem Grund sind nur wenige Literaturstellen zu den Maßnahmen der digitalen Entscheidungshilfen begutachtet worden (Abbildung 13). In diesem Kontext müssen auch die Ergebnisse des Netzdiagramms interpretiert werden: Zwar zeigt sich für die Effekte auf die Biodiversität und den Naturhaushalt ein hohes Potenzial, dieses wird jedoch mit nur je einer Studie unterstützt. In der Veröffentlichung von Ziólkowska et al. (2021) handelt es sich um eine Modellierung der Laufkäfer (räumlich explizites Populationsmodell) in einer hochaufgelösten, agrarisch geprägten Landschaftsstruktur. Die Ergebnisse legen eindeutige Handlungsempfehlungen bezüglich der Mindestbreite von Saumstrukturen (4 m, Ackerrandstreifen) zu intensiv genutzten Flächen und des Einflusses der Landschaftsheterogenität als wichtigstem Faktor zur Erhöhung der Diversität nahe. An diesem Fallbeispiel wird deutlich, dass die digitalen Entscheidungshilfen oft als Werkzeug zur Argumentation für den Einsatz weiterer IPS-Maßnahmen (hier: naturräumliche Entwicklung) eingesetzt werden und weniger als Einzelmaßnahme. Die Bewertung der Studie von Ziólkowska et al. (2021) mit dem höchsten möglichen *INTEGER-Score* von eins beruht auf der Einbeziehung einer großen empirischen Datenbasis und der sehr transparenten Dokumentation des Programmcodes und der verwendeten Parameter. Es werden die Erkenntnisse aus zahlreichen Studien integriert und die Untersuchung deshalb gleichwertig zu einer sehr guten Freilandstudie aufgefasst.

In Bezug auf die Wirkung der PSM-Reduktion konnten zahlreiche Veröffentlichungen gefunden und analysiert werden. Bei diesen Arbeiten handelt es sich um wissensbasierte Systeme (KI) zur Entscheidungsunterstützung für einen optimierten PSM-Einsatz. Dies erfolgt über die Identifizierung von Schädlingen, die Behandlungswahl und der strategischen Planung des Behandlungsprozederes. Es sind ebenfalls softwarebasierte Entscheidungshilfen zur visuellen Früherkennung von Pflanzenkrankheiten erarbeitet worden (in Weizenkulturen, Johannes et al., 2017). Der frühzeitige und punktuelle Einsatz von PSM kann so zu einer Reduktion der Gesamtaufwandmengen der PSM führen.

Der Bereich der wirtschaftsgetriebenen Innovationen mit Hilfe von Digitalisierungsansätzen zeichnet sich durch eine derzeit hohe Dynamik mit vielen unterschiedlichen neuen Anwendungsideen aus. In diesem Branchensegment arbeiten Start-Up-Firmen und KMUs, aber auch agrochemische Großunternehmen an neuen Produkten und Dienstleistungen.

Die vielfältigen technologischen Ansätze basieren häufig auf Softwareanwendungen, bei denen landschafts-, kultur- und seasonspezifisch passgenaue PSM-Spritzserienpläne berechnet werden, die auch die ökonomische Schadschwelle berücksichtigen. Hierfür werden neben Fernerkundungsinformationen, Daten zu Wachstumsstadien der Kulturpflanzen, Krankheitsrisiken, Bodenbeschaffenheit und Wasserverfügbarkeit sowie lokale Wetterbedingungen für die Modellvorhersagen verwendet. Aktuelle Technologien verwenden Algorithmen aus dem Bereich der KI, wie maschinelles Lernen (z. B. Deep Learning), um diese Modelle stetig zu anzupassen und zu optimieren. Für die automatisierte, lokale Datenerhebung werden Sensoren für die Ausstattung der Traktoren und Erntemaschinen entwickelt, die direkt mit der Entscheidungshilfesoftware kommunizieren. Das Potenzial zur Einsparung der PSM-Mengen variiert sehr stark mit der jeweiligen aktuellen Situation, wird aber im Bereich zwischen einem Drittel bis zur Hälfte der sonst üblichen Aufwandmengen geschätzt.

Abbildung 13: Netzdiagramm der INTEGER-Scores (zur Ableitung siehe Kapitel 3.1) der aus der Literatur extrahierten Effekte für die IPS-Maßnahme Digitale Entscheidungshilfesysteme. Die fettgedruckten Zahlen an den Eckpunkten des Netzes geben die Anzahl der verarbeiteten Literaturstellen für den jeweiligen Effekt an.



Quelle: Eigene Darstellung, Darwin Statistics 2023

Es bleibt jedoch festzustellen, dass es mit Blick auf das Potenzial dieser digitalen Entscheidungshilfesysteme in der Zukunft noch einen hohen Entwicklungsbedarf gibt, um die Wirkungen der Maßnahmen auf die landwirtschaftliche Praxis genauer zu verstehen und die Zielgenauigkeit von Vorhersagen und der Befallserkennung zu verbessern.

Einen weiteren großen Anwendungsbereich umfasst die Nutzung von Drohnen in der Land- und Ernährungswirtschaft. Zum Einsatz im IPS werden Drohnen-Technologien entwickelt und eingesetzt, um Flächendaten für Entscheidungshilfesysteme und für die gezielte Ausbringung von PSM (sogenannte Spritzdrohnen) oder von Nützlingen zu erheben. Bilddaten von Drohnen werden für die automatisierte Früherkennung von Pflanzenkrankheiten eingesetzt. Ein Beispiel ist das bildbasierte Überwachungssystem zur Identifizierung der Kraut- und Knollenfäule *Phytophthora infestans* auf Kartoffelanbauflächen, mit dem eine frühzeitige Erkennung und die gezielte Behandlung der Bestände weit vor dem Erreichen der ökonomischen Schadschwelle möglich sind.

In den meisten Fällen haben die Anwendungsbeispiele mit einem rein ökonomischen Hintergrund die implizite Eigenschaft, vor allem eine verbesserte Wirtschaftlichkeit bei gleichbleibendem oder verbessertem Kulturpflanzenenertrag als Zielvariable anzustreben. Die ökonomisch orientierte Produktivität steht im Fokus, sodass PSM-Reduktionen und eine Verbesserung des ökologischen Zustands als indirekte Folgeeffekte anzusehen sind. Positive Auswirkungen auf ökologische Indikatoren durch die Optimierung des PSM-Einsatzes durch digitale Hilfen können postuliert und prognostiziert werden. Da eine systematische Untersuchung des tatsächlichen Einflusses auf die Kennwerte der ökosystem-bezogenen Ausstattung der Agrarlandschaften in der Regel ausbleibt, weist die Gesamtbewertung der digitalen Entscheidungshilfesysteme aus einer ökologischen Perspektive ähnlich große

Schwachstellen auf, wie sie historisch auch schon bei der Entwicklung der Bekämpfungsschwellen für PSM festgestellt werden konnten (Steinmann et al., 2021).

3.4.3 Maßnahme naturräumliche Infrastruktur - Ökologisches Inventar

Mit der Aufwertung der naturräumlichen Infrastruktur bzw. dem ökologischen Inventar (P 1, nach der Definition in Abschnitt 1.2) sind im Kontext dieser Studie die Eingriffe in die naturräumliche Ausstattung eines agrarischen Landschaftsraums auf unterschiedlichen räumlichen Skalenniveaus gemeint. Dies können feldspezifische Maßnahmen auf lokaler Ebene sein, wie zum Beispiel die Entwicklung und Erweiterung von semi-natürlichen Landschaftselementen (Feldraine, Hecken, Gehölze). Auf regionaler Ebene entsteht das ökologische Inventar aus der Zusammensetzung der Landschaftselemente. Die Vielfalt, Verteilung und Flächenanteile der ökologisch wertvollen Flächen wirken dadurch in einem Netzwerk.

Das Netzdiagramm (Abbildung 14) zeigt bereits deutlich, dass der Eingriff in die naturräumliche Infrastruktur als IPS-Maßnahme klar positive Effekte auf verschiedene Bereiche einer ökologischen Vorzugswürdigkeit haben kann. Insbesondere die miteinander eng verbundenen Effekte der Biodiversität, der Ökosystemfunktionen und der Nützlingsförderung profitieren von diesen landschaftsbezogenen Maßnahmen. Dies wird mit einer hohen Anzahl an aussagekräftigen Literaturstellen belegt (zwölf Literaturstellen, Abbildung 14). In der Gesamtbewertung aller in der vorliegenden Untersuchung berücksichtigten IPS-Maßnahmen zeigt die Verbesserung der naturräumlichen Infrastruktur das höchste Potenzial für eine positive Wirksamkeit auf verschiedenen Ebenen der Ökologie und in der Folge auch auf eine Reduktion des PSM-Einsatzes (*INTEGER-Scores* zwischen 0.6 und 0.7, Abbildung 14).

Tscharntke et al. (2021) haben gezeigt, dass der zertifizierte ökologische Landbau die lokale Artenvielfalt im Vergleich zur konventionellen Landwirtschaft um ein Drittel erhöhen kann. Dies wird durch den Verzicht auf synthetische PSM erreicht, führt auf der anderen Seite jedoch zu erheblichen Ertragseinbußen - im Mittel über alle Haupt-Fruchtarten und weltweit- von 19 bis 25 % und im Gemüse- und Getreideanbau von bis zu 50 %. Die Ertragseinbußen erfordern in der Folge die Umwandlung weiterer bisher ungenutzter, semi-natürlicher Flächen in Ackerland, um die Gesamterträge stabil zu halten. Durch eine kleinteiligere Diversifizierung der Anbauflächen (ökologisches Inventar) und die Verringerung der Feldgröße auf Landschaftsebene kann die biologische Vielfalt sowohl in der ökologischen als auch in der konventionellen Landwirtschaft vervielfacht werden, ohne die Produktivität der Anbauflächen zu verringern. Der Zielkonflikt, Biodiversitätsschutz *versus* Ertrag, verschiebt sich dann auf einen erheblich erhöhten Arbeitsaufwand bei der Bestellung der Kulturen.

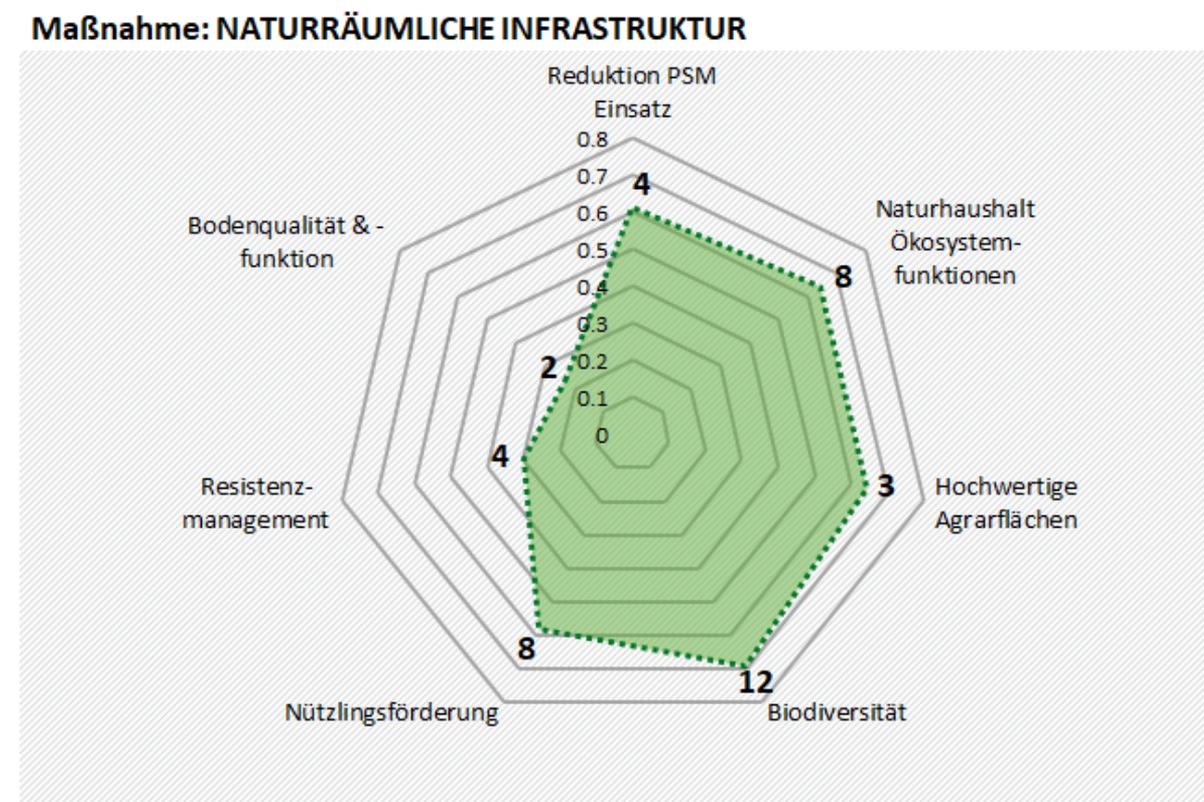
Der Übersichtsartikel von Tscharntke et al. (2021) fasst die Schlussfolgerungen aus verschiedenen Forschungsansätzen der vergangenen Jahre in Bezug auf den Themenkomplex *Zielkonflikt zwischen Landnutzung und Biodiversität* zusammen. Es wird unter anderem Bezug auf die Untersuchungen von Kormann et al. (2015) genommen, die in einer Studie eine abnehmende Artenvielfalt neun verschiedener Pflanzen- und Insektentaxa (unter anderen Wildbienen, Schwebfliegen und Spinnen) in Abhängigkeit des Anteils von Ackerland im Landschaftsraum erkannt haben. Dazu ist ergänzend gezeigt worden, dass die Anzahl der Wildbienenarten in einem standardisierten Freilandexperiment mit dem Anteil naturnaher Lebensräume in der umgebenden Landschaft zunimmt (Tscharntke et al., 2005).

Hass et al. (2018) demonstrieren, dass kleinräumige landwirtschaftliche Systeme die Bestäubendiversität und Bestäubungsleistung fördern können. Diesen Zusammenhang haben Batary et al. (2017) mit einer Untersuchung in unterschiedlich strukturierten Landschaftsräumen entlang der ehemaligen innerdeutschen Grenze für Pflanzen- und

Insektengemeinschaften ebenfalls gezeigt. In dieser Studie ist zudem der Einfluss des ökologischen Landbaus untersucht worden, der einen positiven Einfluss auf die Indikatoren der Biodiversität hat. Die Kennwerte der Artenvielfalt nehmen jedoch in höherem Maße mit der landschaftlichen Komplexität (kleinere Ackerflächen und naturräumliche Vielfalt) und der Kombination dieser beiden Maßnahmen zu. In einer Metastudie von Le Provost et al. (2021) über 150 landwirtschaftlich genutzte Grünlandflächen, ist die negative Korrelation zwischen der Landnutzungsintensität und den Effekten auf oberirdische und unterirdische Lebensgemeinschaften ebenfalls nachgewiesen worden.

In Bezug auf die Umsetzungsstrategien des IPS sind diese Schlussfolgerungen von hoher Relevanz. Kremen (2020) zeigt in einem aktuellen Review, dass die Entwicklung einer diversen Landschaftsstruktur in Kombination mit einer ökologischen Extensivierung (d. h. der Nutzung natürlicher Prozesse wie zum Beispiel dem Anbau von Zwischenfrüchten zur Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit und der Anlage von Feldrainen zur Nützlingsförderung) zu einer Verbesserung der biologischen Vielfalt und einer Erhöhung der Bereitstellung ökosystemarer Leistungen führen kann, ohne die agrarwirtschaftliche Produktivität zu verringern. Tschumi et al. (2015) berichten, dass bereits einjährige Blühflächen eine hohe Effizienz für die Bereitstellung von Funktionen der biologischen Schädlingskontrolle zeigen.

Abbildung 14: Netzdiagramm der *INTEGER*-Scores (zur Ableitung siehe Kapitel 3.1) der aus der Literatur extrahierten Effekte für die IPS-Maßnahme *Naturräumliche Infrastruktur*. Die fettgedruckten Zahlen an den Eckpunkten des Netzes geben die Anzahl der verarbeiteten Literaturstellen für den jeweiligen Effekt an.



Quelle: Eigene Darstellung, Darwin Statistics 2023

Das ist in einem Freilandtest in Weizen festgestellt worden (Endpunkt: Larven und adulte Getreidehähnchen *Oulema* sp., sowie aufgenommene Fraßschäden). Dies führte zu einer Verringerung des Insektizideinsatzes und in einer einfachen ökonomischen Bilanzierung der Gesamtkosten zu einer Ertragssteigerung. Die hohe Relevanz dieser Maßnahmen wird durch

aktuell aufgelegte Forschungsvorhaben aus dem Bereich *Nützlingsförderung in der Agrarlandschaft* untermauert. Als Beispiel sei hier das BfN-Projekt *Agrarnützlinge* genannt (www.agrarnuetzlinge.de, weitere Informationen unter diesem [Link](#)).

Begg et al. (2017) beschreiben in einem Übersichtsartikel ebenfalls den hohen Wert der Nützlingsförderung im Sinne des IPS durch die Erhöhung der Pflanzen- und Habitatvielfalt, der Steigerung der Landschaftskomplexität und der Verringerung der Anbauintensität. In diesem Review wird zusätzlich ausgeführt, dass der Effekt der Nützlingsförderung keinesfalls konsistent über alle Landschaftsformen, Anbaukulturen und abiotischen Umweltfaktoren nachzuweisen ist. Dementsprechend ist eine gebietsabhängige Anpassung dieser Maßnahmen und eine Unterscheidung zwischen generischen Maßnahmen einer regionalen Nützlingsförderung und einer spezifischen, lokalen Förderung natürlicher Feinde für einzelne Ackerbauflächen notwendig. Eine fehlende spezifisch lokale und zeitlich mit den Maxima der Schädlingspopulationen synchronisierte Steuerung der Nützlingsförderung, in direkter Nähe zu den landwirtschaftlichen Flächen, ist demnach häufig die Ursache für den unzureichenden Erfolg von Maßnahmen der biologischen Schädlingsbekämpfung. Dies ist anhand verschiedener Untersuchungsbeispiele gezeigt worden (Neuville et al., 2016, Rand et al., 2006, Schellhorn et al., 2014).

Deshalb entwickelten Tschardt et al. (2016) aus den Fallbeispielen in der Literatur fünf verschiedene Hypothesen, unter welchen Umständen die Schaffung naturnaher, lokaler Habitats die biologische Schädlingsbekämpfung nicht begünstigt: (1) Schädlingspopulationen haben keine wirksamen natürlichen Feinde in der Region, (2) der natürliche Lebensraum ist eine größere Quelle für Schädlinge als für natürliche Feinde, (3) Nutzpflanzen bieten mehr Ressourcen für Nützlinge als der natürliche Lebensraum, (4) der natürliche Lebensraum ist in Bezug auf Menge, Nähe oder Zusammensetzung unzureichend, um ausreichend große Nützlingspopulationen zu beherbergen und (5) landwirtschaftliche Praktiken wirken der Ansiedlung von Nützlingen entgegen. Die relative Bedeutung des ökologischen Inventars für die biologische Schädlingskontrolle kann lokal und je nach Art der Kultur, des Schädlings, des Räubers, der Landbewirtschaftung und der Landschaftsstruktur deutlich variieren.

3.4.4 Maßnahme Nützlingsförderung

Die Zuordnung von nützlingsfördernden landwirtschaftlichen kann sowohl auf der Maßnahmenseite wie auch auf der Effektseite erfolgen. Die Nützlingsförderung kann als eine aktive, direkte Förderung einer bestimmten Nützlingsart durchgeführt werden und damit auf der Maßnahmenseite einer Maßnahme-Effekt-Kombination geführt werden. Sie kann aber auch die indirekte Folge anderer Maßnahmekategorien und somit auf der Effektseite verbucht werden. Der Begriff wird deshalb auch in weiteren Maßnahmekategorien aufgegriffen, die zum Erhalt der Nützlingspopulationen beitragen (vor allem in Kapitel 3.4.3, das sich mit der naturräumlichen Infrastruktur befasst). Für die Umsetzung eines wirksamen IPS ist es essenziell, dass die Populationen von Schädlingen und Nützlingen in einem naturnahen, ökologisch ausgeglichenen Verhältnis zueinanderstehen, um massenhafte Vermehrungen der Schädlinge einzugrenzen (SRU 2018). Besonders viele Arten, die als Nützlinge gelten, kommen aus der artenreichen Klasse der Insekten. Unter der Maßnahme *Nützlingsförderung* wird hier verstanden, dass entweder durch Förderung, Schaffung oder Konfektionierung von naturnahen Strukturen in der Landschaft die Nützlings-Populationen bei Überwinterung, Nahrungssuche oder Brutpflege unterstützt oder die Nützlinge durch gezielte manipulative Freisetzung in ihren Beständen möglichst dauerhaft gefördert werden (Prinzipien 1 und 4, wie in Abschnitt 1.2 definiert). Die Maßnahme wird damit zur *Biologischen Schädlingskontrolle* abgegrenzt (siehe Abschnitt 3.4.1 oben). Wie oben beschrieben, kann die Nützlingsförderung sowohl auf der Maßnahmenseite als auch auf der Effektseite zum Tragen kommen. In einzelnen Fällen ist daher

die Maßnahme *Nützlingsförderung* mit dem Effekt *Nützlingsförderung* in Zusammenhang gebracht worden (Abbildung 15).

Die Abbildung 15 zeigt die *INTEGER-Scores* für die Maßnahme *Nützlingsförderung* hinsichtlich ihrer Effekte auf die Reduktion des PSM-Einsatzes, des Resistenzmanagements für die Wirksamkeit von PSM, die Ökosystemfunktionen und die Biodiversität. Die größten Effekte der meist strukturellen Verbesserungen auf Landschaftsebene und auf den Agrarflächen treten für Indikatoren der *Biodiversität* und *naturnahe Agrarflächen* mit Bewertungsscores von 0.53 auf. In der Literatur ist häufig, mit jeweils sieben Fundstellen, auf die Wirkung einer verbesserten Ausstattung mit *Nützlingspopulationen* und in Richtung einer Reduktion des PSM-Einsatzes bzw. einer Verbesserung des Resistenzmanagements hingewiesen worden. Die Aussagen sind zumeist auch gut mit wissenschaftlicher Evidenz belegt worden. Die Bewertung zeigt durchweg positive, relevante Wirkungen der Maßnahme im mittleren Wertebereich der *INTEGER-Scores*.

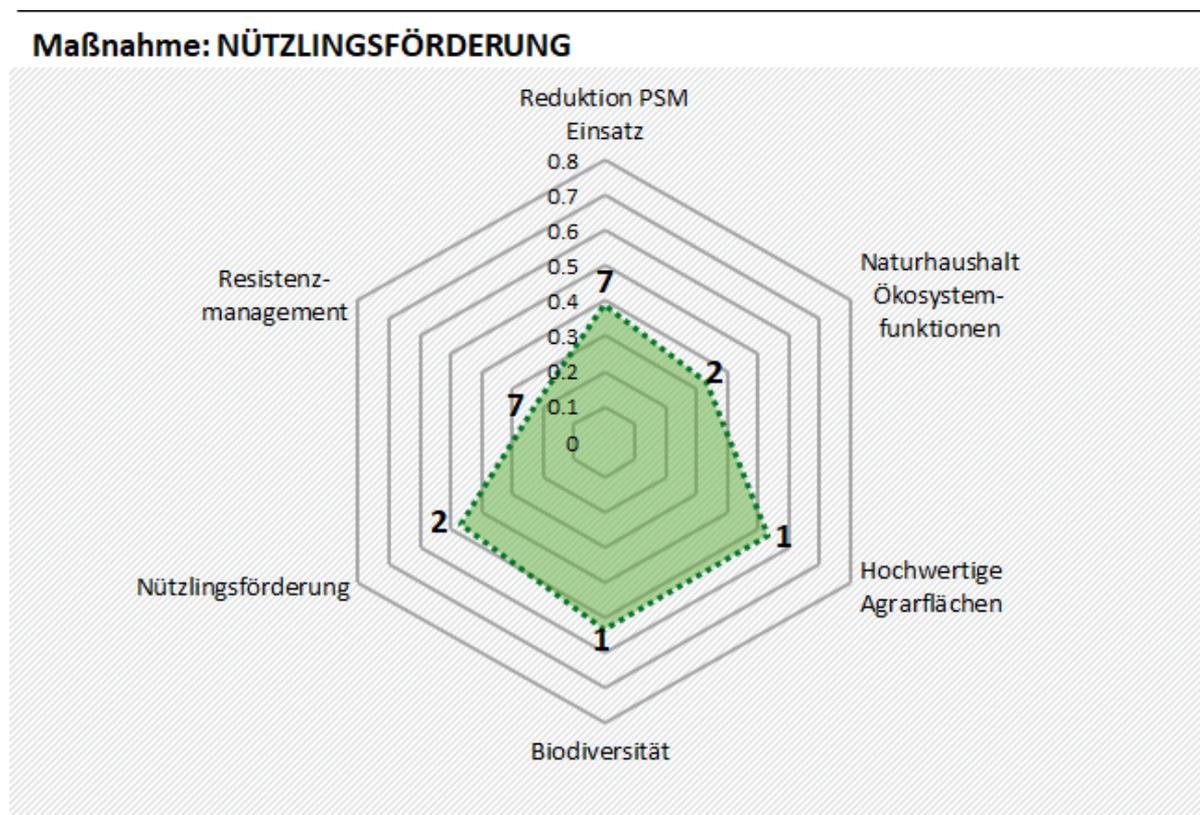
Die Studien zu den Effekten von IPS-Maßnahmen zur *Nützlingsförderung* wie dem *intercropping* (das bedeutet, es werden verschiedene Kulturpflanzen auf einem Schlag gemischt angebaut), von Untersaaten oder von unterschiedlich invasiver Bodenbearbeitung, erlauben nicht immer eindeutige und überzeugende Aussagen. Laut Holland & Luff (2000) haben die genannten Maßnahmen auf die sehr mobile Gruppe der Laufkäfer keine signifikanten Befunde erbracht. Die Wirk-Hypothesen, die der aktiven Förderung von Nützlingen zugrunde liegen, werden in der Literatur im Konjunktiv formuliert und nicht durch eingehende Datenanalysen untersucht und bewiesen. Für die Anwendung von PSM sind die negativen direkten und indirekten Effekte in Holland & Luff besser belegt. Außerdem werden Bewirtschaftungsformen, Randstrukturen und Landschaftselemente mit einer positiven Entwicklung von Carabiden-Populationen in Zusammenhang gebracht. Feldrändern werden als Refugien zur Wiedererholung der Populationen nach PSM-Exposition auf den Agrarflächen und als Überwinterungsplatz eine besondere Bedeutung zugemessen (extrahiert aus Andersen, 1997, Dennis & Fry, 1992, Pollard, 1968, Sotherton, 1985).

Eine gut mit Daten belegte Aussage zur Wirksamkeit der Instrumente zur Förderung von Nützlingen bieten Rusch et al. (2017). Der Zusammenhang zwischen dem Artenreichtum der Nützlinge und der Ökosystemfunktion *Schädlingskontrolle* kann demnach zwar sowohl positiv als auch negativ oder neutral sein. Aus der Metaanalyse ihres Datenmaterials haben sie für 70 % der analysierten Studien einen positiven Zusammenhang zwischen nützlingsfördernden Maßnahmen und den erzielten Effekten nachweisen können. Insbesondere der Zusammenhang zwischen der Community-Evenness (eine in der Diversitätsforschung häufig verwendete Maßzahl für die Gleichverteilung der Anteile der Individuen der einzelnen Arten innerhalb einer Lebensgemeinschaft) und der biologischen Schädlingskontrolle ist relativ stark. Dies wird am Beispiel der Gegenspieler-Gemeinschaften von Kartoffelkäfern aufgezeigt. Auch der Zusammenhang zwischen der Verteilung verschiedener Traits, wie der Habitatnutzungsbreite innerhalb der Nützlingspopulationen und der effizienten Kontrolle von Schädlingen mit engen Habitatansprüchen, ist dargelegt worden.

Die Literatur bietet einen reichhaltigen Überblick an verschiedenen Strategien, wie Resistenzen von Schadinsekten gegenüber den aktuell verfügbaren Insektiziden vermieden werden können. Bielza (2008) empfiehlt in einem Übersichtsartikel eine Kombination verschiedener Strategien, um die Resistenzbildung des Kalifornischen Blütenthrips (*Frankliniella occidentalis*), eine polyphage Fransenflüglerart und Überträger von Pflanzenvirus-Krankheiten, gegenüber den wenigen noch verfügbaren insektiziden Wirkstoffen (lambda-Cyhalothrin, Abamectin) zu verringern. Diese umfasst:

- ▶ die Insektizidanwendungen, wenn unbedingt notwendig,
- ▶ eine sorgfältige und genaue Anwendung von Insektizidbehandlungen,
- ▶ die Diversifizierung von Schädlingskontrollmethoden,
- ▶ den Schutz der natürlichen Gegenspieler der Schädlinge und
- ▶ die Vermeidung der Selektion von Resistenzmechanismen, wie zum Beispiel Kreuzresistenzmuster.

Abbildung 15: Netzdiagramm der *INTEGER*-Scores (zur Ableitung siehe Kapitel 3.1) der aus der Literatur extrahierten Effekte für die IPS-Maßnahme *Nützlingsförderung*. Die fettgedruckten Zahlen an den Eckpunkten des Netzes geben die Anzahl der verarbeiteten Literaturstellen für den jeweiligen Effekt an.



Quelle: Eigene Darstellung, Darwin Statistics 2023

Der Schlüssel zur Vermeidung von Resistenzen ist es, die resistenzbildenden Mechanismen zu kennen, die spezifisch für jeden insektiziden Wirkstoff sind. Für die Praxis bedeutet das, die Herstellung von Spritzfolgen, die eine wiederholte Applikation desselben insektiziden

Wirkstoffes oder Tankmischungen, welche die Verwendung von Insektiziden mit bekannten Kreuzresistenzen beinhalten, unbedingt zu vermeiden.

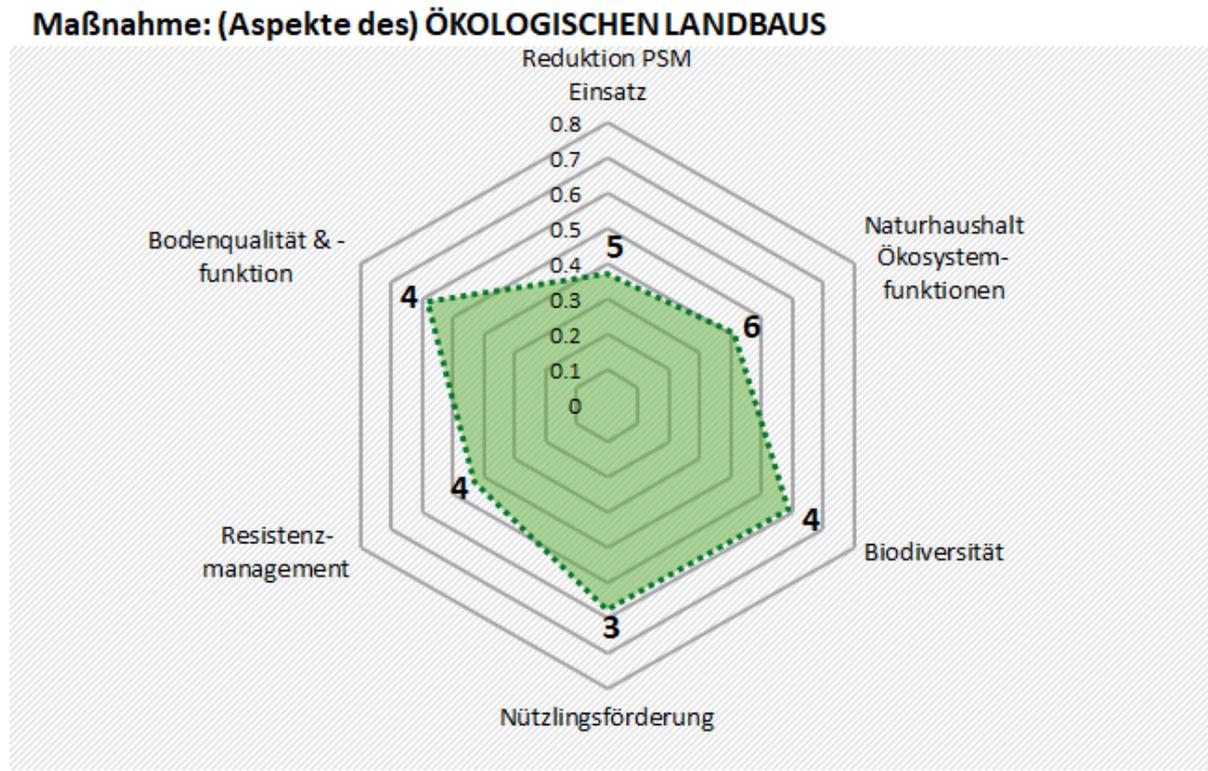
Die Maßnahmen zur Nützlingsförderung bleiben oftmals in Bezug auf ihre tatsächliche Wirksamkeit und Umsetzbarkeit vage. Bosco et al. (2018) betonen am Beispiel von *Halyomorpha halys*, der Marmorierten Baumwanze, die Schwierigkeiten des konventionellen PS in *Sonderkulturen*, die in für die Bearbeitenden schwer zu erreichenden Lagen von Bedeutung sind. Diese invasive Art, die nicht wählerisch in der zu schädigenden Kultur ist, kommt in Haselnussplantagen vorrangig in Nord-West-Italien vor. Das Schadensmaß im Vergleich zu den bereits bekannten Haselnusschädlingen ist bei *H. halys* größer. Es wird diskutiert, ob die technisch schwierige und für eine effiziente Kontrolle notwendige benetzende Mehrfach-Applikation von Breitband-Insektiziden direkt auf die Schaderreger überhaupt möglich ist. Diese würde dann zudem die in Italien verpflichtenden und weit entwickelten IPS-Programme zunichtemachen. Darüber hinaus sind die Haselnussplantagen häufig in Steillagen lokalisiert, die Anwender verfügen oft nicht über das entsprechende Equipment, um die PSM auszubringen. Viele weitere Faktoren erschweren in diesen Plantagen die übliche PSM-Strategie: unregelmäßige Baumabstände, eine hohe Anzahl von Ästen pro Pflanze, das unkontrollierte Wachstum von Ablegern, sowie übermäßige Baumhöhen und zu hohe Baumkronendichten. Besser wäre nach Meinung der Autoren*Autorinnen die Anwendung einer *Attract-Kill*-Strategie, das heißt die Anlockung der Schaderreger über Pheromone in wenigen Bäumen, gefolgt von einer gezielten Behandlung mit Insektiziden. In Apfelplantagen bereits erprobt, steht diese Strategie für Haselnüsse nicht zur Verfügung. Langfristig wäre eine biologische Schädlingskontrolle anzustreben, mit natürlichen Gegenspielern, die bereits vor Ort vorhanden sind oder eingeführt werden müssten, zum Beispiel mit hymenopteren Ei-Parasitoiden aus den Gattungen *Anastatus* (Eupelmidae), *Ooencyrtus* (Encyrtidae), oder *Telenomus* (Scelionidae), die zurzeit als Antagonisten in wissenschaftlichen und noch andauernden Untersuchungen evaluiert werden. Das Beispiel zeigt, wie weit der Weg im IPS ist, bis ein präventives und wirksames System, unter Konkurrenzbedingungen mit dem chemischen PS, der Praxis zur Verfügung steht.

3.4.5 Maßnahme Ökolandbau

Ökolandbau (*organic agriculture*) ist keine einzelne IPS-Maßnahme im engen Sinne, umfasst aber eine Reihe von Regeln und Methoden, die auch im IPS eine Rolle spielen. Die Maßnahme ist somit auch mehreren IPS-Prinzipien zuzuordnen (P 1, 4, 5, 6 aus Kapitel 1.2). Der Ökolandbau (oder ökologische Landwirtschaft, biologische Landwirtschaft) verzichtet auf mineralische Düngemittel, auf den Einsatz gentechnisch veränderter Organismen und auf chemisch-synthetische PSM (Heinrich-Böll-Stiftung 2020, Bioland e.V. 2020). Der letztgenannte Aspekt macht die Maßnahmen des Ökolandbaus und der Wirtschaftsweise im Ökolandbau auch im IPS einsetzbar und übertragbar.

Die Effekte der Anwendung von Prinzipien des Ökolandbaus (z. B. Fruchtfolgen, mechanische Unkrautbekämpfung) sind in der Literatur ausschließlich neutral bis positiv (in Bezug auf die Richtung) beschrieben. Besonders hohe Bewertungen bekommen die Auswirkungen von Maßnahmen des Ökolandbaus auf die Bodenqualität, also auf Humusbildung und -erhalt sowie auf die Refugialfunktion für Nützlinge und auf die Biodiversität. Die Reduktion des PSM-Einsatzes wird von den Autoren*Autorinnen zumeist nicht in den Vordergrund gestellt, weil der Einsatz von PSM ohnehin im Ökolandbau *per se* wenig relevant ist (Abbildung 16). Die *INTEGER*-Kennzahlen der sechs Effektklassen sind in der Spanne zwischen 0.37 und 0.5, und damit insgesamt eher etwas niedriger als erwartet.

Abbildung 16: Netzdiagramm der *INTEGER*-Scores (zur Ableitung siehe Kapitel 3.1) der aus der Literatur extrahierten Effekte für die IPS-Maßnahme (*Aspekte des*) ökologischen Landbaus. Die fettgedruckten Zahlen an den Eckpunkten des Netzes geben die Anzahl der verarbeiteten Literaturstellen für den jeweiligen Effekt an.



Quelle: Eigene Darstellung, Darwin Statistics 2023

Die Schlussfolgerungen aus der ausgewerteten Literatur fallen wenig euphorisch aus, es werden in den Publikationen geringe positive Auswirkungen der Praxis des Ökolandbaus auf die Biodiversität berichtet (Meemken & Qaim, 2018). Hodgson et al. (2010) geben zu bedenken, dass es zahlreiche Zielkonflikte zwischen geringeren Erträgen, verbesserten Kennzahlen der Biodiversität und einer größeren Flächeninanspruchnahme gibt.

Die Maßnahmen zum Management von Arthropoden-Schädlingen im Ökolandbau (die auch kompatibel mit dem IPS sind) setzen nach Zehnder et al. (2007) in der ersten Phase auf die Prävention durch Anbautechniken, die mit natürlichen Prozessen in Einklang stehen, auf nicht-transgene resistente Sorten und Fruchtfolgen. In der zweiten Phase wird versucht, durch die Steuerung der Vegetation natürliche Feinde zu fördern und so direkte Effekte auf die Schädlingspopulationen erzielen zu können. In der dritten Phase kommt dann die biologische Schädlingskontrolle zum Einsatz. Erst wenn alle anderen Methoden keine ausreichende Wirkung gezeigt haben, kommen in der vierten Phase im Ökolandbau zugelassene Insektizide mineralischen und biologischen Ursprungs (nie chemisch-synthetische Substanzen) zum Einsatz.

Die Erkenntnisse in der Literatur, zumal wenn sie in Übersichtsartikeln verarbeitet worden sind, bleiben häufig anekdotisch, da auf Zitaten beruhend und oft auf spezifische Fallbeispiele bezogen, die nicht immer transparent und unmittelbar mit Zahlen untermauert oder mit glaubwürdigen statistischen Methoden untersucht worden sind. Diese Ergebnisse zur Wirksamkeit von IPS-Maßnahmen des Ökolandbaus, die auf einer qualitativen Ebene informativ und stimmig sind, können in der formalisierten Bewertungsmatrix dann dennoch niedrige Scores erhalten.

Eines der herausforderndsten Probleme im konventionellen wie ökologischen Ackerbau ist die Bekämpfung von *Ungräsern*, weil viele der Kulturarten ebenfalls Gräser sind. Laut Bastiaans et al. (2008) können die Probleme mit Gräsern in Ackerbausystemen durch *ökologisches Management* vermindert und verhindert werden. Das kann (1) durch einen aktiv verringerten Aufwuchs aus der Samenbank des Bodens, (2) durch eine Verschiebung der Dominanzverhältnisse zwischen Nutzpflanze und Gräsern und (3) durch eine graduelle Verkleinerung der Samenbank erreicht werden. Im Vergleich zur chemischen Kontrolle, sind die Anwendbarkeit, die Praktikabilität und die Effizienz von einzelnen Maßnahmen sehr gering, sodass eine komplizierte Kombination mehrerer Instrumente implementiert werden muss. Zusammen mit manchen Zielkonflikten (die von Bastiaans et al., 2008, nicht näher spezifiziert worden sind) im Zusammenhang mit den Maßnahmen ist die Akzeptanz der potenziellen Anwender*innen und die flächendeckende Anwendungshäufigkeit gering.

3.4.6 Maßnahme risikoarme PSM & nicht-chemische Alternativen

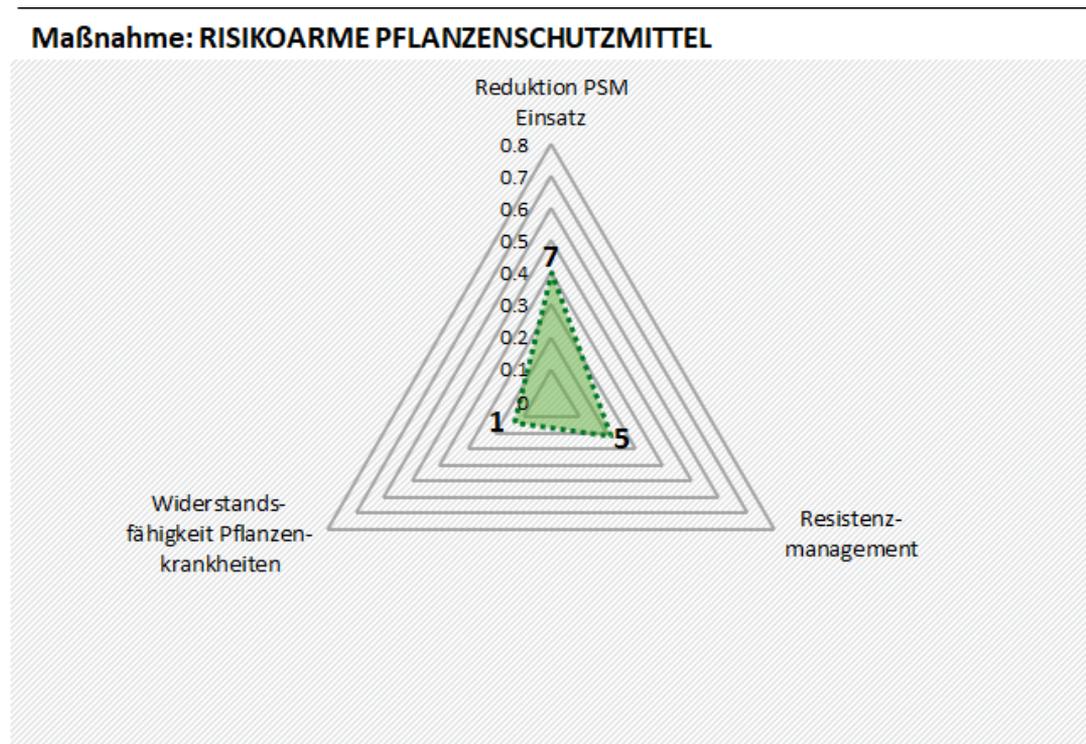
Risikoarme PSM (*low-risk pesticides*, P 4 und 5) müssen im Zulassungsprozess die Kriterien und Datenanforderungen für den *low-risk* Status (siehe Anhang II, Punkt 5 Verordnung EG/1107/2009 Europäische Union, 2009C). Nicht-chemische Alternativen, wie die sogenannten *biorationals*, lassen sich nach einer allgemein gebräuchlichen Definition als *biologisch hergestellt oder falls synthetisch hergestellt, strukturell ähnlich und funktionell identisch mit einem biologisch vorkommenden Material* beschreiben (siehe auch Kapitel 3.2). Einige *biorationals* weisen geringe Umweltrisiken auf und machen sich häufig das Prinzip der Allelopathie bei Pflanzen zunutze (Macias et al., 2007). Zur Begriffsdefinition siehe Schäfer (2007) und Schulze et al. (2019): *Allelopathie ist die Hemmung des Wachstums einer Pflanze durch die Abgabe toxischer Stoffe durch eine andere Pflanze. Dies kann sowohl innerhalb einer Art oder zwischen verschiedenen Arten funktionieren.* Die Autoren nennen das Phänomen der Allelopathie als Grund für die Ausbildung von Dominanzbeständen in zahlreichen natürlichen Pflanzenlebensgemeinschaften. Der Grund für den Erfolg einer *invasiven* Art ist oft nicht in der fehlenden lokalen Konkurrenz zu suchen, sondern vielmehr in der fehlenden Fähigkeit der nativen Pflanzengesellschaften (oder Pilz- und Bakteriengesellschaften), mit den neuen phytotoxischen Substanzen umzugehen, sie zu tolerieren oder zu entgiften. Das Forschungsfeld ist interdisziplinär aufgestellt und kann zur Identifizierung bioaktiver, herbizid-wirksamer Substanzen mit neuen Wirkmechanismen beitragen. Die von den Pflanzen zur Abwehr synthetisierten Substanzen gehören zu den chemischen Klassen der einfachen und verzweigten Phenole oder der Terpene (wie Campher) und weisen eine enorme Strukturvielfalt auf, die eine chemische Synthese unrentabel macht. Das Potenzial für die Bereitstellung alternativer PSM mit geringen Umweltwirkungen, die einen relevanten Beitrag zum Resistenzmanagement im Integrierten Pflanzenbau liefern können, ist vorhanden. Die wirtschaftlichen Anreize und Potenziale, um alternative, biologisch wirksame PSM auf den Markt zu bringen, werden von den Autoren dieser Studie als gering eingeschätzt, solange der vollständige Zulassungsprozess, ähnlich wie bei chemisch-synthetischen PSM, durchlaufen werden muss. Die Maßnahme *risikoarme PSM* zeichnet sich im Netzdiagramm Abbildung 17 durch besonders niedrige, positive *INTEGER-Scores* von nicht mehr als 0.4 für die Reduktion von PSM aus. Für die Förderung der Widerstandsfähigkeit der Kulturpflanzen gegenüber Krankheiten und zur Verhinderung der Ausbildung von Resistenzen ist die Wirksamkeit noch weit geringer.

Die EFSA (2021) beschreibt beispielhaft die Verwendung des Neonikotinoids Thiametoxam gegen Aphiden als Virusüberträger mittels einer Notzulassung, weil kein anderes Mittel mit diesem Wirkmechanismus zur Verfügung steht. Mögliche nicht-insektizide Alternativen zeigten hier keine oder sehr wenig Effizienz. Die Nutzung von *biorationals* (Mikroorganismen, Pflanzenextrakte, Biostimulantien, Bodenverbesserer) ist nach Matyjaszczyk (2018) eine Strategie, die dem Konzept und der Definition des IPS entspricht (siehe oben, Europäische

Union, 2009A). Es wird jedoch deutlich gemacht, dass über die Wirksamkeit und die Effekte auf die belebte Natur wenig bekannt ist, da die Hürden zur Markteinführung im Vergleich zu chemischen PSM und damit die Datenlage in vielen Fällen sehr gering sind.

Frederiks et al. (2019) stellen die Regulationsprozesse der Wirkstoffprüfung für Bio-PSM in der EU und in den USA gegenüber. Am Ende steht die Schlussfolgerung, dass es die restriktiveren Vorschriften und komplexen institutionellen Prozesse in der EU erschweren, dass biopestizide Wirkstoffe, die nach denselben Kriterien wie chemisch-synthetische Wirkstoffe geprüft werden, überhaupt zugelassen werden. Frederiks et al. (2019) verwenden zur Veranschaulichung low-risk PSM aus der Gruppe der *microbial biological control agents*, für die lebende Bakterien, niedere Pilze oder Viren Verwendung zur Kontrolle von Unkräutern, Schädlingen oder Krankheiten in Kulturpflanzenbeständen finden.

Abbildung 17: Netzdiagramm der INTEGER-Scores (zur Ableitung siehe Kapitel 3.1) der aus der Literatur extrahierten Effekte für die IPS-Maßnahme Risikoarme PSM & nicht-chemische Alternativen. Die fettgedruckten Zahlen an den Eckpunkten des Netzes geben die Anzahl der verarbeiteten Literaturstellen für den jeweiligen Effekt an.



Quelle: Eigene Darstellung, Darwin Statistics 2023

Sofern sie den *low-risk* Status innehaben, erhalten die pestizid-aktiven Wirkstoffe in der EU eine Zulassung für 15 Jahre. Diese Regelung unterscheidet sie von den chemisch-synthetischen Substanzen, die nur für 10 Jahre zugelassen werden. Unter der Annahme, dass *low-risk* PSM in Zukunft verstärkt als Kernkomponenten in den IPS aufgenommen werden sollen, ist die Verzögerung des Zulassungsprozesses in der EU von mehr als 1,5 Jahren im Vergleich zu den Zulassungsprozessen in den USA ökonomisch relevant. Dies lässt sich am Beispiel der kumulierten sozio-ökonomischen Vorteile der biologischen Schädlingskontrolle eines in der EU wichtigen Schädlings, des Westlichen Maiswurzelbohrers *Diabrotica virgifera* aufzeigen. Die Schäden durch *D. virgifera* werden in Frankreich, Spanien, Italien, Deutschland und Rumänien zusammen auf 48,7 Milliarden € beziffert. Die Autoren*Autorinnen stellen insbesondere eine Zulassungssituation als problematisch dar, in der Deutschland als Rapporteur Member State (RMS) oder Co-RMS fungiert. Durch die häufige Wahl der Antragsteller Deutschlands als RMS

und die resultierende Arbeitsbelastung der zuständigen Behörden, wird hierzulande für die Prüfung mit großem Abstand die längste Zeit benötigt (1 000 Tage in DE gegenüber 700 Tagen in FR, 600 Tagen in IT, 300 Tagen in NL).

3.4.7 Sonstige Maßnahmen

Die *sonstigen Maßnahmen*, die mangels ausreichender Informationsdichte im Rahmen dieser Studie nicht differenziert ausgewertet werden können, werden hier zusammenfassend dargestellt. Darunter fallen die sechs Maßnahmenkategorien *standortgerechte Sortenmischungen, Teilflächenanwendung PSM, vielfältige Fruchtfolgen, Wissensvermittlung, Akzeptanz und Umsetzung von IPS-Maßnahmen sowie Bodenmanagement (pfluglose Bodenbearbeitung und Düngung)*.

3.4.7.1 Maßnahme standortgerechte Sortenmischungen

Wuest et al. (2021) nehmen eine eingehende Betrachtung der kommerziellen Entwicklung von Sortenmischungen im Ackerbau vor. Aktuell fehlen noch allgemeine Gestaltungsprinzipien zur Entwicklung von Mischungen in Züchtungsprogrammen, wodurch eine breite Anwendung von Sortenmischungen in der agrarwirtschaftlichen Praxis bisher nicht gegeben ist.

Das ökologische Prinzip der Wirksamkeit von Sortenmischungen mit verschiedenen Kulturpflanzen besteht in der Nischenkomplementarität der zusammengestellten Kulturpflanzenarten. Die unterschiedlichen Interaktionen mit der biotischen und abiotischen Umwelt und so entstehende Synergien sind häufig unzureichend verstanden. Von Wuest et al. (2021) im Übersichtsartikel zusammengefasste Untersuchungen bestätigen jedoch die positiven Effekte von Sortenmischungen, vor allem im Bereich der Krankheitsresistenz (mit dadurch möglicher Reduktion von PSM und Folgewirkungen auf Ökosystemleistungen), Ertragsstabilität und -steigerung.

Malézieux et al. (2009) sprechen neben den Vorteilen der Nutzung von Sortenmischungen aber auch die möglichen Konkurrenzfragen an, denn es benötigt ein fundiertes Hintergrundwissen über die Nischenkomplementarität. Im Fall der um Ressourcen konkurrierenden Sorten sollen die Vorteile aber deutlich überwiegen. Diese Vorteile beziehen sich auf Ernteerträge und -qualität, die längerfristige Nachhaltigkeit von Agrarökosystemen, und auf weitere gesellschaftliche und ökologische Ökosystemdienstleistungen, wie dem Erholungswert der Landschaft, ästhetischen Empfindungen, Wasser- und Bodenqualität sowie der Erhaltung von Flora und Fauna, einschließlich besonders gefährdeter Arten.

3.4.7.2 Maßnahme Teilflächenanwendung PSM

Bezüglich der Durchführung von PSM-Teilflächenanwendungen als Teil einer umfassenden IPS-Strategie wird in der Recherche deutlich, dass diese vor allem in Kombination bzw. als Folge von vorgelagerten IPS-Maßnahmen in Betracht gezogen werden. So werden zum Beispiel Teilflächenanwendungen im Zuge von Precision-Farming-Methoden mittels digitaler Werkzeuge praktiziert. Johannes et al. (2017) stellen eine visuelle Entscheidungshilfe zur Früherkennung von Weizenkrankheiten vor. Diese Nutzung wird nach Meinung der Autoren*Autorinnen in Zukunft, wenn leistungsstärkere Endgeräte zur Verfügung stehen, flächendeckend Anwendung finden können. West et al. (2003) schlagen als konkrete Anwendung ein fest montiertes Bilderkennungssystem für Pilzkrankheiten (ebendort am Beispiel des Streifenrostes *Puccinia striiformis* in Weizen illustriert) an einem Traktor mit GPS-Empfang vor, um befallene Bereiche des Schlags zu identifizieren und auf einer detaillierten Befallskarte abzubilden. Diese Befallskarte kann dann in eine *Spritzkarte* überführt werden, die je nach technischen Voraussetzungen sehr gezielt zur Ansteuerung einzelner Spritzdüsen genutzt werden kann. Das System ist zum Zeitpunkt der Veröffentlichung noch in der Entwicklungsphase gewesen und

nicht serienreif. Kranke Blätter können unter Verwendung zweier Fluoreszenz-Fotographien mit einer Genauigkeit von 95 % erfasst werden, gesunde Blätter haben eine geringere Erfassungsquote von 71 %. Der ökonomische Nutzen hat bei dieser Studie im Vergleich zum ökologischen Wert im Vordergrund gestanden, ist jedoch von zahlreichen Faktoren abhängig. Die Ertragssteigerung durch die Behandlung, der erzielbare Marktwert der Feldfrüchte, die Kosten der Spritzbehandlung und die mögliche Reduktion der Fungizidmenge spielen dabei als Einflussfaktoren des ökonomischen Nutzens eine wichtige Rolle. Die Reduktion der Fungizidmenge wiederum ist abhängig von der tatsächlichen Befallsituation, der Größe der befallenen Patches und den technischen Grenzen der Steuerungspräzision.

3.4.7.3 Maßnahme vielfältige Fruchtfolgen

Richard et al. (2021, Review) weisen nach, dass ergänzend zu den oben genannten Maßnahmen auf Landschaftsebene auch lokale, schlagbezogene Maßnahmen zur Reduktion von Pflanzenkrankheiten unter besonderer Berücksichtigung der zu erwartenden Änderungen der Umweltbedingungen durch den Klimawandel wirksam sein können.

Auf lokaler Ebene ist unter anderem der positive Einfluss von Zwischenfrüchten, Sortenmischungen, Fruchtfolgen und angepassten Einsaatdichten auf die Häufigkeit und Schwere von Pflanzenkrankheiten untersucht worden. Dadurch wird durch die konsequente Umsetzung des IPS eine Reduktion der ausgebrachten Mengen chemischer PSM erreicht. Diese Mechanismen sind für einzelne Maßnahmen und Kulturen sehr gut belegbar, wie Richard et al. (2021) in ihrem Übersichtsartikel feststellen. Es wird jedoch auch deutlich, dass die Effekte gerade in Kombination dieser Einzelmaßnahmen für einzelne Anbaukulturen noch zu wenig erforscht sind. Es besteht demnach ein Forschungsbedarf bei der Frage, wie wirkungsvolle Einzelmaßnahmen in Bezug auf Pflanzenkrankheiten in einer umfassenden IPS-Strategie kombiniert werden sollten.

Parolin et al. (2012) stellen den hohen, direkten Nutzwert von Sekundärpflanzen (Ackerbegleitflora) auf die Kulturpflanze dar, wie auch auf Schädlinge und ihre natürlichen Feinde. Dabei zeigen sich verschiedene Funktionsweisen der Sekundärpflanzen durch ihre jeweilige Wirksamkeit auf Kulturpflanzen, Schädlinge und Nützlinge, die wiederum kulturspezifisch unterschiedlich in ihrer Ausprägung sein können.

3.4.7.4 Maßnahme Wissensvermittlung, Akzeptanz und Umsetzung von IPS-Maßnahmen

Die Umweltbehörde der Niederlande hat die Wirkungen der im Jahr 2013 verabschiedeten nationalen PS-Strategie unter besonderer Berücksichtigung der Maßnahmen des IPS in einer Metanalyse untersucht (Thijssen et al., 2018, Tiktak et al., 2019). Es ist festgestellt worden, dass sich der Zustand der Biodiversität in der niederländischen Agrarlandschaft trotz flächendeckender Einführung von IPS-Maßnahmen verschlechtert hat (Tiktak et al., 2019). Der ausbleibende Erfolg ist durch fehlende finanzielle Anreize für die konsequente Umsetzung des IPS erklärt worden. Darüber hinaus haben repräsentative Befragungen der beteiligten Akteure*Akteurinnen festgestellt, dass Landwirtschaftstreibende einen Mangel an wirkungsvollen, nicht-chemischen Maßnahmen als *schlecht gefüllten Werkzeugkasten* wahrnehmen. Dies ist nach Ansicht der Akteure*Akteurinnen zum Teil auf fehlende wissenschaftliche Studien und Wissenslücken hinsichtlich der Auswirkungen des IPS zurückzuführen. Diese Lücke wird in den Niederlanden von einer möglichen drittmittelfinanzierten Forschung aus der Agrar-Industrie nicht geschlossen, da in diesem Sektor der Anreiz für die Durchführung von Forschungsprojekten fehlt. Der erwartete Mehrwert wird vor allem als ein gesamtgesellschaftlicher, weniger als ein direkter ökonomischer Nutzen verstanden. Die Autoren der vorliegenden Studie halten deshalb eine öffentliche Finanzierung

dieser Forschungsansätze für notwendig, um die Wissenslücken zu füllen und einen wirkungsvollen IPS etablieren zu können.

Neben der unzureichenden wissenschaftlichen Datenlage sind im Bereich der IPS-Maßnahmen gleichermaßen Lücken im Wissenstransfer zwischen Forschung und Landwirtschaft identifiziert worden. Eine Schlüsselrolle in diesem System kommt nach den Analysen von Tiktak et al. (2019) dabei der Landwirtschaftsberatung zu, die für einen Großteil der Landwirte*Landwirtinnen eine Hauptquelle der Informationen zu den möglichen Strategien im PS darstellen. Diese Akteure*Akteurinnen befinden sich an Schlüsselpositionen, um Transformationsprozesse zur flächendeckenden Anpassung der PS-Strategien anzustoßen. Da diese jedoch nicht immer von Organisationen und staatlichen Einrichtungen wie Bauernverbänden oder Landwirtschaftskammern angestellt sind, sondern auch im Vertrieb der PSM-Hersteller arbeiten, ist eine ausgewogene Einschätzung und Integration der IPS-Maßnahmen nicht anzunehmen. Somit ist auch die Stärkung der Beratung durch unabhängige Multiplikatoren*Multiplikatorinnen ein zentraler Schlüssel für die Etablierung ökologisch wirksamer IPS-Maßnahmen und zur Erreichung der EU-Reduktionsziele.

Brewer et al. (2012) beschreiben in Ihrem Übersichtsartikel in Übereinstimmung dazu das sogenannte *Anreizdilemma*: IPS-Maßnahmen sind historisch auf lokaler räumlicher Skalenebene (je nach Nomenklatur Feldblock oder Feldschlag) und mit dem Fokus auf einen ertragsorientierten Nutzen entwickelt und beworben worden. Sukzessive entwickelte IPS-Strategien auf regionaler Landschaftsebene mit höherem Nutzen für die Ökosysteme und die Allgemeinheit (siehe oben) und langfristigeren (indirekten) Vorteilen leiden daher im direkten Vergleich an mangelnder Akzeptanz.

Sharifzadeh et al. (2018) haben eine Umfrage unter Landwirten*Landwirtinnen (Reisanbauende im Iran) durchgeführt, um die Hauptkriterien bei der Auswahl und der Anwendungspraxis von PSM zu identifizieren. Aufgrund der räumlichen, kulturellen und sozioökonomischen Unterschiede können diese Ergebnisse nicht ohne Weiteres auf die Situation in der EU übertragen werden. Die Erörterung der treibenden Einflussfaktoren liefert aber, unabhängig von der geographischen Lage, Aufschluss über die grundsätzlichen Entscheidungsmechanismen in der Landwirtschaft. Faktoren, wie die Effizienz und Kosten der PSM-Anwendung, sind in dieser Studie die wichtigsten Kriterien bei der Entscheidung für die Durchführung einer PSM-Behandlung. Politische Einflüsse, wie der Wegfall staatlicher Subventionen für Düngemittel und PSM, haben teilweise für ein Umdenken der Landwirte*Landwirtinnen gesorgt, die seither häufiger eine biologische Schädlingsbekämpfung in Betracht ziehen. In der Übertragung auf europäische Verhältnisse und auf hoch-entwickelte Industriestaaten kann ebenfalls von einer Lenkungswirkung durch Abgaben oder Steuern auf PSM ausgegangen werden, sofern sie in einer ökonomisch relevanten Größenordnung erhoben werden. Umweltaspekte sind nur von Landwirten*Landwirtinnen in Betracht gezogen worden, die darin geschult worden sind, die schädlichen Auswirkungen von PSM wahrzunehmen. Allerdings ist der Unterschied zwischen geschulten und nicht-geschulten Landwirtschaftstreibenden nicht signifikant, d. h. die Schulungen sind nicht hinreichend effizient gewesen und sollten in Zukunft inhaltlich und didaktisch überarbeitet werden. Landwirte*Landwirtinnen, die mit dem IPS sowie mit negativen Auswirkungen auf ihre eigene Gesundheit im Umgang mit PSM, Erfahrungen gemacht haben, stehen Umweltaspekten weit aufgeschlossener als die Vergleichsgruppe ohne eigene Anschauung gegenüber. Ökologisches Wissen und fortgeschrittene Kenntnisse der natürlichen Feinde von Schädlingen führen dazu, dass das Umweltbewusstsein dieser Gruppe insgesamt höher gewesen ist als das der ungeschulten Gruppe.

Die Aspekte der Wissensvermittlung und der Akzeptanz von IPS-Maßnahmen bei Landwirtschaftstreibenden werden im Rahmen des Realitätschecks durch Stakeholder-Befragungen besprochen und erläutert (Kapitel 3.5). Es wird deutlich, dass diese Dimension eine

Schlüsselrolle für die flächendeckende Erhöhung des IPS-Umsetzungsgrades spielen kann, auch wenn es sich dabei nicht um eine praktische, flächenbezogene Maßnahme handelt. Auf EU-Ebene ist aus diesem Grund im Rahmen des HORIZON2020-Programms die Plattform *IPMworks* als Informationsnetzwerk zur Anwendung von IPS-Maßnahmen ins Leben gerufen worden (<https://ipmworks.net/>). Mit Hilfe internetbasierter Strukturen sollen Initiativen gebündelt und IPS-Netzwerke auf europäischer, nationaler und lokaler Ebene entwickelt werden. Neben der Organisation von Demonstrationsvorhaben in Pilotbetrieben und Beiträgen zur Verbreitung und Kommunikation, werden der Wissensaustausch zwischen Landwirten*Landwirtinnen organisiert und kooperative Innovationsaktivitäten gefördert, um Landwirte*Landwirtinnen bei der Entwicklung eigener IPM-Strategien zu unterstützen.

3.4.7.5 Maßnahme Bodenmanagement (pfluglose Bodenbearbeitung und Düngung)

Königer et al. (2021) zeigen, dass die Qualität des Düngemittels für die biologische Vielfalt des Bodens wichtiger ist als die absolut eingesetzte Menge. Maßnahmen, wie die Ausbringung von hochwertigem Dünger oder Biostimulanzien, die die biologische Vielfalt des Bodens schützen und fördern, können einen Beitrag zu einem effektiven IPS leisten.

Barzman et al. (2015) weisen auf widersprüchliche, uneindeutige Effekte von *no-tillage* Systemen hin. In *no-tillage* Anbausystemen werden zwar Humusbildung und Biodiversität gefördert und CO₂-Emissionen gemindert. Es können aber auch Schaderreger, wie mykotoxinproduzierende *Fusarium*-Pilze, in Getreidekulturen begünstigt werden.

3.4.7.6 Maßnahme der Festlegung von Bekämpfungsschwellen

Die Methode der Bestimmung einer ökonomischen Schadschwelle (*economic threshold*) ist ursprünglich von Stern et al. (1959) eingeführt worden. Es soll nur zum Einsatz von chemisch-synthetischen PSM kommen, wenn die zu erwartenden Einnahmeeinbußen wegen geringerer Erträge (*economic injury level*) durch die Kosten der IPS-Maßnahme kompensiert werden würde. Dies ist konzeptionell eine von wirtschaftlichen Überlegungen getriebene Strategie. Die Ableitung von Schwellenwerten für verschiedene Anbaukulturen, die in den letzten Jahren erarbeitet worden sind, beruhen dementsprechend auf ökonomischen Schwellen.

Aus einer ökologischen Sichtweise heraus ist die Nutzung von wirtschaftlich getriebenen Bekämpfungsschwellen für einen nachhaltigen IPS nicht zielführend. Es gibt Ansätze und Strategien zur Erweiterung des Bekämpfungsschwellenkonzepts mit Blick auf gesellschaftliche und ökosystemare Schwellendefinitionen, die auch Effekte von PSM-Anwendungen auf Nicht-Zielorganismen, Nahrungsnetze und Aspekte der Biodiversität und menschlichen Gesundheit berücksichtigen sollen. Nach Steinmann et al. (2021) müssten für dieses Ziel aber großangelegte und langfristige Forschungsprojekte initiiert werden, um ökologische Schwellenwerte inklusive der intrinsischen Unsicherheiten abschätzen zu können. Das Resultat dieser Anstrengungen wäre die Etablierung einer *ökologischen Schadschwelle* (Steinmann et al., 2007).

Des Weiteren unterliegen die starren Bekämpfungsschwellen im Grunde einer erheblichen zeitlichen Dynamik aufgrund veränderlicher Einflussfaktoren wie Witterungs- und anderer Umweltbedingungen (Steinmann et al., 2021). Fest definierte Schwellenwerte können diese Dynamik nicht abbilden, unabhängig davon, ob sie auf einem ökonomischen oder ökologischen Schwellenkonzept beruhen. Aus diesem Grund wird der Bekämpfungsschwellenansatz kontrovers diskutiert.

3.5 Realitätscheck durch Befragungen von Landwirtschaftstreibenden und einem Landwirtschaftsberatenden

Die Erkenntnisse aus der Literaturrecherche stammen zum größten Teil aus einem akademischen oder behördlichen Umfeld. Aspekte der landwirtschaftlichen Praxis und der konkreten Umsetzbarkeit spielen zwar auch in der Forschung eine wichtige Rolle, können aber die Sichtweise eines einzelnen landwirtschaftlichen Betriebes innerhalb einer wissenschaftlichen Methodik nicht vollständig berücksichtigen. Unsere Auseinandersetzung mit dem Themenkomplex IPS anhand der internationalen Literatur hat gezeigt, dass insbesondere sozio-psychologische Faktoren zum Kenntnisstand und zur Akzeptanz der Maßnahmen des IPS einen Schlüssel für die tatsächliche Umsetzung durch die Anwender*innen darstellt. Informationen dazu sind nur begrenzt verfügbar. In der vorliegenden Studie bieten Interviews mit Landwirten*Landwirtinnen und Landwirtschaftsberatenden deshalb einen Mehrwert.

Die Bewertung der einzelnen Maßnahmen hinsichtlich ihrer Wirksamkeit zur Förderung der Biodiversität in agrarischen Produktionssystemen und zur Reduktion der PSM-Menge wird in Kapitel 3.2 dargestellt und basiert auf den Ergebnissen der Literaturrecherche (Abschnitt 2.2.1 und Abschnitt 2.2.2). Die Perspektive der Landwirte*Landwirtinnen und deren Einstellungen sowie Erfahrungen zur Praktikabilität und Wirksamkeit einzelner IPS-Maßnahmen kann die erarbeitete, akademische Sichtweise ergänzen (siehe vorausgegangene Kapitel) und den Kontext beleuchten. Um die Perspektive der Landwirtschaftstreibenden zur Umsetzbarkeit des IPS einzubeziehen, ist ein *Realitätscheck* in Form informeller persönlicher Gespräche in die vorliegende Untersuchung einbezogen worden.

Die Befragungen sind im Akteurs- und Akteurinnen-Netzwerk der Autoren durchgeführt worden. Im Rahmen der vorliegenden Studie ist kein empirisch repräsentatives Meinungsbild erarbeitet worden. In den Interviews, welche die Meinungen zum Gesamtkonzept des IPS und zur Umsetzbarkeit einzelner IPS-Maßnahmen in den landwirtschaftlichen Betrieben abfragt, nehmen die Landwirte*Landwirtinnen die Position von Experten*Expertinnen ein.

Für die Experten*Expertinnen-Interviews sind acht Landwirte*Landwirtinnen und ein Experte aus der Landwirtschaftsberatung aus der Region Aachen in Nordrhein-Westfalen befragt worden. Die Perspektive dieser Interviewpartner*innen ist dabei von den ackerbaulichen Voraussetzungen in der Städteregion Aachen beeinflusst, die vom flächendeckenden Vorhandensein sehr fruchtbarer Lößböden und relativ geringen Betriebsgrößen von im Mittel unter 50 Hektar Gesamtfläche geprägt sind. Die Befragten sind zwischen 25 und 60 Jahren alt, mit einer deutlichen Tendenz zu höherem Lebensalter. Die landwirtschaftlichen Betriebe betreiben Ackerbau auf eigenen oder von der Stadt Aachen oder anderen Gemeinden der Städteregion Aachen gepachteten Flächen. Zwei Mischbetriebe betreiben neben dem Ackerbau auch Milchvieh bzw. Schweinemast und haben damit einen Fokus auf den Anbau von Futtermitteln. In einem Öko-Betrieb wird sowohl Acker- als auch Gemüsebau betrieben, und man ist den im Bioland-Anbau-Verbund definierten Prinzipien verpflichtet. Alle Landwirte*Landwirtinnen sind hauptberuflich und in Vollzeit in der Landwirtschaft tätig. Die Betriebsgrößen der Befragten liegen etwa zwischen 50 und 150 Hektar.

Die Dokumentation der informellen Gespräche erfolgt anonym und anekdotisch und fasst die wichtigsten Aspekte, grundsätzliche Meinungen und Sichtweisen aus der Landwirtschaft und der Landwirtschaftsberatung zusammen.

Zum Teil sind die Aussagen mehrfach in ähnlicher Weise getätigt, zum Teil als vorherrschende Meinung in der Landwirtschaft vorgebracht worden. Es handelt sich zwar um Einzelmeinungen, die aber dennoch innerhalb der untereinander bekannten Gruppe der Befragten als abgestimmt

gelten können. Die Aussagen geben nicht die persönlichen Meinungen der Autoren dieser Studie wieder.

3.5.1 Umkehrung der IPS-Pyramide

Glyphosat-basierte PSM sind für die meisten Betriebe seit vielen Jahren ein zentraler Bestandteil einer schonenden Bodenbewirtschaftung. Die pfluglose Bearbeitung soll den Humusaufbau fördern. Es wird damit gerechnet, dass ein zukünftiges Verbot von des Wirkstoffs Glyphosat dazu führt, dass die Böden vor der Einsaat wieder intensiver bearbeitet werden müssen. Dazu werden voraussichtlich Schälplüge in einer Bodentiefe bis zu 10 Zentimetern zum Einsatz kommen, die sich im Vergleich zum konventionellen Pflügen bis in 18-30 Zentimeter Bodentiefe schonend auf die Bodenbiodiversität auswirken sollen und deren Einsatz nicht als wendende Bodenbearbeitung gilt. Dieser Pflugtyp ist in der Schweiz ausgehend von Mulchsaatverfahren entwickelt worden. In vielen Betrieben sind keine Pflüge mehr vorhanden.

3.5.2 Digitalisierung

Digitale Hilfsmittel, wie die automatischen GIS-basierten Spritzdüsen-Steuerungen zum Ausbringen von PSM, erbringen nur geringe Einsparmöglichkeiten im kleinen einstelligen Prozentbereich der flächenbezogenen PSM-Anwendungsmengen. Von den Herstellern der Landmaschinen und von landwirtschaftlichen Beratungsunternehmen werden digitale Neuerungen an die Betriebe herangetragen. Das Spektrum reicht von einfachen kameragesteuerten Hacke-Bandspritze-Systemen bis zu Drohnen, die mit spezieller Sensorik und digitalen Fotos einen Pflanzenbestand vermessen können. Mit Hilfe von Algorithmen aus dem Bereich der KI werden Empfehlungen für optimierte Dünge- oder PS-Strategien inklusive gezielter Teilschlagbehandlungen entwickelt.

Das Hacke-Bandspritzverfahren macht sich den großen Reihenabstand in einigen Hackfruchtkulturen wie Rüben und Kartoffeln zunutze. Zwischen den Reihen wird der Bestand mechanisch mit Hackwerkzeugen von unerwünschten Beikräutern befreit, in der Reihe sorgt eine Spritzvorrichtung für die chemische Bekämpfung. Das Verfahren kann zwei Drittel der PSM-Aufwandmengen einsparen. Die Anschaffung der Technik ist aufgrund der hohen Anschaffungskosten durch die zur Steuerung notwendige Kameratechnik erst ab einer Betriebsgröße von mehr als 100 Hektar wirtschaftlich. In vielen Regionen Deutschlands stellt diese Größe trotz der zunehmenden Marktkonzentration auf größere Betriebe nicht den Durchschnitt der Betriebsgrößen dar (in Aachen liegt das obere Quartil der Betriebe bei einer Flächengröße über 100 Hektar). Weitere Nachteile der Hacke-Bandspritze-Methode sind der hohe Arbeitsaufwand, das häufige mechanische Bearbeiten der Flächen sowie die Störung von Niederwild, das sich in den Gassen zur Rast niederlässt.

3.5.3 Genaue Bestimmung des Schaderregerdrucks

Die Prävention und Vorhersage von Pilzkrankheiten hat in bestimmten Kulturen (Kartoffel, Getreide) ein großes Einsparpotenzial von im Mittel 50 % der empfohlenen PSM-Aufwandmengen aus der Wirkstoffgruppe der Fungizide. Es kann früher, weit unterhalb der Schadschwelle und damit effizienter gespritzt werden oder, bei voraussichtlichem Nichterreichen der Schadschwelle, kann auch eine Behandlung ganz verzichtet werden. Dieses Einsparpotenzial ist für den*die Landwirt*in wirtschaftlich attraktiv, denn bei jährlichen Kosten zwischen 50 und 100 € pro Hektar für den Kauf fungizider PSM und einer durchschnittlichen Betriebsgröße in Deutschland von 63 ha (DESTATIS Pressemitteilung) ergibt sich eine durchschnittliche Ersparnis von 3 000 € pro Jahr und Betrieb. Dazu kommt ein höherer, qualitativ hochwertiger Ertrag, der sich auf die geringere Belastung der Kulturpflanzen durch die chemisch-synthetischen PSM zurückführen lässt. So kann der Umsatz zusätzlich zu den

Kosteneinsparungen um 20 % oder 300 €/ha erhöht werden. Für die Landwirte*Landwirtinnen hat eine solche Strategie neben der Kostenersparnis (die bei weitem die Kosten für die Software und Beratung übersteigt) zur Folge, dass eventuell häufigere Überfahrten mit geringeren Applikationsraten der PSM notwendig werden. Für den einzelnen landwirtschaftlichen Betrieb ist die genaue Bestimmung des Befalls unterhalb der Schadschwelle allerdings auch mit einem erheblichen Mehraufwand verbunden, da in kurzen zeitlichen Abständen schlaggenaue Proben zur Kalibrierung des Schaderreger-Vorhersage-Modells eingesandt werden müssen. Insgesamt herrscht aber die Meinung vor, dass mit den sehr viel geringeren empfohlenen Fungizid-Mengen gut gearbeitet, also eine gute Ernte-Qualität erzielt werden kann. Insektizide sind in Bezug auf den Preis pro Mengeneinheit sehr günstig, weshalb oft ein Einsatz ohne genaue Bestimmung des Schaderregerdrucks erfolgt.

3.5.4 Unabhängigkeit der Beratung

Privatwirtschaftlich tätige Landwirtschaftsberater*innen haben eine andere Sichtweise auf die Häufigkeit und Menge des PSM-Einsatzes, sowie Auswahl von IPS-Maßnahmen, als halbstaatliche Landwirtschaftsberater*innen der Landwirtschaftskammern. Letztere müssen sich durch Aufträge aus der Agrarindustrie für die Durchführung von Effektivitäts- oder Freisetzungsstudien querfinanzieren, sodass die Beratung nicht losgelöst von wirtschaftlichen Interessen stattfindet. Die Unabhängigkeit der Beratung wird als wichtiger Faktor beschrieben und nach Aussage von Interviewpartnern* Interviewpartnerinnen weithin infrage gestellt.

3.5.5 Low-risk PSM

Aus der Sicht eines Landwirtschaftsberaters und Antragsstellenden, scheitert die Nutzung von alternativen Mitteln zu chemisch-synthetischen PSM, die als low-risk PSM voraussichtlich geringe Umweltrisiken mit sich bringen (schnelle Abbaubarkeit, hohe Wirksamkeit), an der komplexen, langwierigen und kostenintensiven Zulassung von neuen Wirkstoffen und Produkten in der EU. Frederiks & Wessler (2009) beschreiben für die Zeitspanne zwischen Erstantragstellung und tatsächlicher Zulassung eines neuartigen low-risk PSM oder eines zur Zulassungs-Verlängerung anstehenden PSM im Vergleich zwischen USA und EU bzw. Deutschland große Unterschiede, die durch die wesentlich längere Bearbeitungszeit in der EU zu ökonomischen Hindernissen für die antragsstellenden Unternehmen werden. Sobald eine Substanz nicht nur zur Stärkung einer Pflanze, zum Beispiel durch die Verbesserung des Zellwandaufbaus, der Verringerung der Permeabilität von Biomembranen oder der Verbesserung der Versorgung mit essenziellen Pflanzennährstoffen dient, sondern auch zur Abwehr von oder der Stärkung der Widerstandskraft gegenüber Schaderregern, werden sie dem Zulassungsverfahren der 1107/2009/EU zugeschrieben und formal mit chemisch-synthetischen PSM gleichgestellt. Sie müssen somit die Datenforderungen nach Verordnung 283/2013/EU und den gesamten Zulassungsprozess inklusive der Risikobewertung durch die EFSA und des Risikomanagements durch die EU-Kommission durchlaufen. Diese Hürden sind für ein Herstellendenkonsortium oftmals zu hoch, da sich Investitionen in Forschung und Entwicklung und in die Zulassung nur bei weltweit bedeutenden Anbaukulturen lohnen (<https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>, Zuckerrohr, Reis, Weizen, Mais, Ölpalme, Kartoffeln, Sojabohne).

3.5.6 Implementierungsgrad der IPS-Konzepte in der landwirtschaftlichen Praxis

Die Wahrnehmung des Stellenwertes, der einem konsequent umgesetzten IPS beigemessen wird, ist je nach Standpunkt der Befragten sehr unterschiedlich.

Eine Sichtweise ignoriert die Konzepte des IPS teilweise, weil die Anwendung chemisch-synthetischer Herbizide (siehe Thema *Glyphosat* oben) argumentativ mit schonender,

minimalinvasiver Bodenbearbeitung zum Zwecke des langfristigen Humusaufbaus verbunden wird.

Eine andere Sicht reduziert die Komplexität des integrativen Ansatzes des IPS auf wenige Komponenten, wie zum Beispiel die genaue Bestimmung des Schaderregerdrucks, um präventive PS-Behandlungen zu vermeiden. Das Einsparpotenzial ist mit bis zu 50 % der kumulierten Aufwandmengen allerdings sehr hoch (siehe oben *genaue Bestimmung des Schaderregerdrucks*).

Einige Landwirte*Landwirtinnen blicken auf den IPS, wie er in Handreichungen der Landwirtschaftskammern und in der Theorie vermittelt wird: als *Gute landwirtschaftliche Praxis* und als Gesamtkonzept, das tief in der Betriebsführung verankert ist und mit langfristig angelegten Maßnahmen zum Ziel hat, den Einsatz von PSM auf das unbedingt *notwendige Maß* zu beschränken. So führen einfache landbaufachliche Maßnahmen, wie zum Beispiel die Wahl eines späteren Aussaatzeitpunktes von Wintergetreide im Herbst dazu, dass sich Blattlauspopulationen nicht mehr so weit entwickeln können, dass die Schadschwelle überschritten wird. Es können dadurch geschätzte acht von zehn Überfahrten mit Insektiziden vermieden und die eigentliche Gefahr der Übertragung von schwer zu bekämpfenden, durch Blattläuse übertragenen Viruskrankheiten, stark vermindert werden. Da der Nachweis der Sachkunde und die Fortbildung der Sachkundigen, die aktiv PSM anwenden, im 3-jährigen Turnus verpflichtend sind, sei davon auszugehen, dass die gute fachliche Praxis im Umgang mit und bei der Verwendung von PSM gewährleistet ist. Jeder Landwirt und jede Landwirtin füllt den Fragebogen zur Umsetzung der allgemeinen Grundsätze des IPS aus, sodass auf diese Weise zumindest das Portfolio verschiedener Maßnahmen bekannt sein ist. Der Fragebogen verbleibt (im Bundesland NRW) jedoch beim Betrieb und kann nicht für statistische Erhebungen zum Umsetzungsgrad des IPS verwendet werden.

3.5.7 Umstellung der Betriebe auf Ökolandbau

Viele der befragten Landwirte*Landwirtinnen denken derzeit über die Umstellung ihrer Betriebe auf Formen des ökologischen Landbaus nach. Drei spezifische Faktoren hindern sie daran, den Umstellungsschritt zu vollziehen. Zum einen ist die Vermarktung der hochqualitativen landwirtschaftlichen Erzeugnisse auf dem bereits mit Bio-Produkten gesättigten Markt (sowohl als Lieferant*in für den Groß- und Einzelhandel oder als Selbstvermarkter*in) nahezu unmöglich. Zum anderen benötigt ein Biobetrieb ein höheres Maß an Anbaudiversifizierung, mit Gemüseanbau, der seinerseits sehr arbeitsintensiv ist und eventuell mit Viehhaltung. Die dazu benötigten Arbeitskräfte, die überwiegend für den gesetzlich festgelegten Mindestlohn arbeiten, stehen auf dem (lokalen) Arbeitsmarkt nicht zur Verfügung. Als Drittes wird angeführt, dass die Umstellung auf ökologischen Landbau auch Investitionen im Bereich der Betriebsinfrastruktur und vor allem eine Anpassung der notwendigen Maschinen erfordert, die viele Landwirte*Landwirtinnen scheuen oder aufgrund der generell hohen finanziellen Belastungen der Betriebe nicht leisten können.

3.5.8 Hürden in der Zulassung von Biostimulanzien und selektiven PSM

Eines der Haupthindernisse und Innovationsbremse für die Entwicklung und Kommerzialisierung neuer, selektiver PSM natürlichen Ursprungs besteht darin, dass im konventionellen PS in der Regel ein hoher Umsatz notwendig ist, um die hohen Kosten für die Marktzulassung zu decken (u.a. Zehnder et al., 2007).

4 Empfehlungen, Diskussion und Ausblick

Das Ziel dieser Studie ist die Begutachtung des Wissensstandes zur Wirkung von IPS-Maßnahmen auf Schlüsselparameter der ökologischen Vorzugswürdigkeit, auf die Biodiversität und die Ökosystemfunktionen in Agrarlandschaften, sowie auf einen verringerten PSM-Einsatz gewesen. Im Folgenden wird die verwendete Methodik diskutiert (Abschnitt 4.1) und es wird aufgezeigt, dass ein hohes öffentliches und wissenschaftliches Interesse besteht, die Instrumente des IPS für eine breite Anwendung weiterzuentwickeln (Abschnitt 4.2). Es sind Wissensbereiche identifiziert worden, in denen die Informationen zur Wirksamkeit des IPS lückenhaft sind. Da dies voraussichtlich in nächster Zeit so bleiben wird ergibt sich weiterer Forschungsbedarf (Abschnitt 4.4). Es wird diskutiert, ob aus den vielfältigen IPS-Maßnahmen die ökologisch besonders vorzugswürdigen unter Berücksichtigung von Akzeptanz und Wissensvermittlung bei Landwirten*Landwirtinnen identifiziert werden konnten. Dabei liegt der Fokus auf der praktischen Umsetzbarkeit, die Konzepte mit Einzelmaßnahmen oder deren Kombinationen berücksichtigen muss. Für eine zielführende Gesamtstrategie müssen auch Folgeeffekte abgeschätzt und implementiert werden können. Der derzeitige Wissenstand ist in diesem Bereich nicht ausreichend (siehe Abschnitte 4.3 und 4.4).

Bei der Analyse der IPS-Maßnahmen in Kapitel 3 hat sich deutlich gezeigt, dass eine allgemein gültige Ableitung von Maßnahmen-Empfehlungen für eine Vielfalt von Anbaukulturen und standortspezifischen Umweltbedingungen schwierig ist. Die Mehrheit der Forschungsergebnisse bezieht sich auf eng gefasste, kontrollierbare. Als Beispiel sei hier die Maßnahme der *biologischen Schädlingsbekämpfung und Nützlingsförderung* genannt. Im Rahmen dieser Studie sind zahlreiche Artikel evaluiert worden, die den Einfluss und die Wirkung eines sehr spezifischen Nützlings und mögliche Folgeeffekte für einen kulturspezifischen Schädling in Abhängigkeit lokaler Standortbedingungen betrachten. Diese einzelnen Studien stellen zwar inhaltlich wichtige Informationen zur Verfügung, müssen jedoch für allgemein gültige Empfehlungen weiter integriert werden (in der vorliegenden Studie mit Hilfe des *INTEGER-Scores*, besser in einem maßnahmen-übergreifenden und kombinierten experimentellen Design).

Für einige IPS-Maßnahmenkategorien sind relevante und allgemein gültige Schlussfolgerungen abgeleitet worden, die mit Blick auf eine nachhaltiges Ernährungssystem in Deutschland Berücksichtigung finden sollten. Die Entwicklung einer ökologisch wertvollen *naturräumlichen Infrastruktur* hat zum Beispiel einen nachweislich direkten positiven Einfluss auf die Entwicklung und den Erhalt ökologischer Prozesse, auf die Artenvielfalt und Ökosystemfunktionen auf unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen-Ebenen. Dazu gehört zum Beispiel die Bereitstellung von naturnahen Lebensräumen wie feuchtem und trockenem Grünland, Gehölzen, Hecken und Randstreifen und von stehenden und fließenden Kleingewässern, auch und vor allem in Agrarlandschaften. Auch die Heterogenisierung der Bewirtschaftungsflächen in kleinere Parzellen (durch Streifenanbau) gehört zu diesen Maßnahmen. Das Ziel muss es sein, kleinteilige, vielfältig vernetzte Agrarlandschaften zu schaffen, in denen Landschaftselemente aus Ackerbereichen und naturnahen Lebensräumen deutlich engmaschiger als zurzeit aufgebaut sind. Wenn die naturräumliche Infrastruktur zudem weiter gefasst definiert wird, dann ließe sich auch die Vielfalt der angebauten Ackerkulturen (*Agrobiodiversität*) einer Region zum naturräumlichen Inventar zuordnen. In dem Fall ließen sich auch die identifizierten positiven Wirkungen von standortgerechten Sortenmischungen als Mischkulturen, sowie die Nutzung von Untersaaten, Zwischenfrüchten und vielfältigeren Fruchtfolgen in diesen Maßnahmenkomplex einordnen. Für einfache Anwendungsstrategien sind die positiven Wirkungen belegt und weitgreifende Effekte können bei einem flächendeckenden und kombinierten Einsatz dieser Maßnahmen erwartet werden.

Die Studienauswertung und der Austausch mit Akteuren und Akteurinnen aus der landwirtschaftlichen Praxis hat gezeigt, dass die *Wissens- und Akzeptanzvermittlung* ein zentraler Hebel ist, um die nicht-chemische IPS-Maßnahmen flächendeckend konsequenter im Sinne der IPS-Strategie (Abbildung 1) umzusetzen. Viele der nicht-chemischen Maßnahmen sind den Landwirten*Landwirtinnen bekannt und werden zum Teil bereits genutzt. Die gestufte Umsetzung der IPS-Strategie (*IPS-Pyramide*) ist jedoch nicht systemisch verankert, sodass die Nutzung von chemischem PS nicht als *ultima ratio* nach Ausschöpfung aller anderen IPS-Maßnahmen angesehen wird. Dies ist eine Fehlentwicklung. In Zukunft sollten weitere Anreize geschaffen werden, damit die Anwendung von präventiven, nicht-chemischen IPS-Maßnahmen vor der Nutzung von PSM die Regel werden kann (siehe Abschnitt 4.3). Eine zentrale Rolle bei der Auswahl und dem Einsatz von PSM kommt den Landwirtschaftskammern und -berater*innen zu, die als Interessensvertreter*innen allerdings oft eine Doppelrolle einnehmen. Diese ungünstige Konstellation sollte bei der Erstellung von Handlungsempfehlungen für einen nachhaltigen PS als sozio-psychologischer Einflussfaktor berücksichtigt werden.

Weitere positive Effekte auf die Biodiversität durch einen verringerten PSM-Einsatz, können durch die marktreif entwickelten und die sich in Entwicklung befindenden *Digitalen Entscheidungshilfesysteme* erwartet werden. Deren Effizienz ist aktuell noch nicht ausreichend erforscht. Erste Studien, Rücksprachen mit Akteuren*Akteurinnen und aktuelle Forschungsprojekte zeugen jedoch von einem erheblichen Potenzial zur Einsparung von PSM-Anwendungsmengen. Es ist zu erwarten, dass insbesondere die Bereiche des *digitalfarming* und des *precision farming* in der Agrarindustrie weiter ausgebaut werden und an Relevanz gewinnen. Hierzu gehört zum Beispiel die Nutzung von KI zur Entwicklung von Frühwarnsystemen bei Kulturpflanzenkrankheiten, aber auch die Anwendung von digitalen Informationssystemen und Drohnentechnik für den zielgerichteteren, flächenreduzierten Einsatz von PSM. Forschungsbedarf besteht insoweit, dass die tatsächliche Wirksamkeit dieser Methoden im Hinblick auf die Entwicklung der lokalen biologischen Vielfalt und einer PSM-Reduktion noch zu ermitteln ist.

4.1 Methodik der Bewertung

In der vorliegenden Studie ist eine Bewertungsmetrik mittels des *INTEGER-Scores* entwickelt worden, bei der für die Fragestellung relevante Informationen aus den untersuchten Literaturstellen verarbeitet und integriert worden sind. Die anschließende Verwendung in übersichtlichen Netzdiagrammen (Abschnitt 3.4) ermöglicht eine kritische Diskussion zur Vorzugswürdigkeit der Maßnahmen des IPS in Kombination mit den erwünschten Effekten auf die Reduktion des PSM-Einsatzes und dem Erhalt der Biodiversität in Agrarlandschaften. Bei der Indikatorbildung über *INTEGER-Scores* handelt es sich um ein Werkzeug, das einen wertvollen Beitrag zum Erkenntnisgewinn im Rahmen dieser Studie geleistet hat. Die Analyse sollte jedoch ausschließlich als *ergänzende* Information zu den inhaltlichen Schlussfolgerungen verwendet werden. Durch die Generierung der Indikatorwerte werden die gesammelten Informationen aus den Studien gebündelt, sodass der abgeleitete *INTEGER-Score* die Komplexität der ökologischen Auswirkungen nicht in ihrer Gänze abbilden kann. Ein Mehrwert ergibt sich, indem durch die Netzdiagramme generisch ableitbare Effektmuster für die einzelnen IPS-Maßnahmen sichtbar werden. Die Verbindung der systematischen Suchstrategie mit Stichwörtern aus dem Themenfeld mit der fortgepflanzten *Schneeballsuche* ist geeignet gewesen, um einen weitgehend vollständigen Überblick über die Wirksamkeit der nicht-chemischer IPS-Maßnahmen zu geben (Abschnitt 2.1). Ein besonderer Fokus ist dabei auf möglichst aktuelle und in der Wissenschaft vielfach diskutierte (zitierte) Literaturstellen gelegt worden. Interviews mit Beschäftigten in der Landwirtschaft haben dazu ergänzend den Blick auf den IPS aus der Praxis heraus ermöglicht.

Durch die Sicherung des Gesamtdatensatzes besteht weiterhin die Möglichkeit, die Bewertungsmatrix zu aktualisieren und zu ergänzen.

4.2 Weiterentwicklung der Instrumente des IPS

Der politische Wille in der EU, der sich in den aktuellen und in der Überarbeitung befindlichen Rechtsvorschriften widerspiegelt, (vor allem im Entwurf der SUR, die im Rahmen des Green Deal zur Umsetzung der F2F-Strategie dienen soll, Kapitel 1.2), hat zum Ziel, die derzeit PSM-abhängige Landwirtschaft in eine PSM-arme, nachhaltigere Pflanzenproduktion zu überführen. Insgesamt soll die Landwirtschaft zukunftssicherer, das heißt klimaresilienter, unabhängiger von Nicht-EU-Nahrungsmittelimporten und PSM-Anwendungen, sowie biodiversitätserhaltender werden. Der Einsatz von nicht-chemischen IPS-Maßnahmen spielt in den Planungen eine entscheidende Rolle, da eine Abkehr von der intensiven hin zu (agrar-)ökologischer Landnutzung v.a. wegen möglicher Ertragseinbußen riskant erscheint. In einem solchen transformativen Szenario wird es von zentraler Bedeutung für die *Integriertheit* sein, dass dem PS ausreichend Instrumente zur Verfügung stehen, um den IPS verstärkt in die Praxis umzusetzen und mögliche Einbußen abzupuffern.

Eine besondere Bedeutung wird dabei den Instrumenten der biologischen Schädlingsbekämpfung zukommen, mit deren Hilfe erst ein Verzicht auf chemisch-synthetische PSM möglich sein wird. Einige Wirkstoffe zur biologischen Schädlingsbekämpfung werden im Zulassungsprozess aus EU-Ebene nach der Verordnung 1107/2009/EC als low-risk Wirkstoffe eingestuft und werden nach durchlaufendem Prozess mit geringeren Zulassungskosten unterstützt. Lamichhane et al. (2017) geben einen Überblick über die in der EU wichtigsten Schädlings-Kulturart-Kombinationen und die aktuellen Möglichkeiten der biologischen Schädlingsbekämpfung als Teil eines IPS. Es wird deutlich, dass für viele potenzielle biologische Lösungsansätze zur Schädlingsbekämpfung noch erheblicher Forschungs- und Innovationsbedarf besteht. Der Forschungsbedarf erstreckt sich über die Generierung von biologischem Basiswissen, über das Auffinden von potenziellen und effektiven Gegenspielern, über die Identifizierung von Alternativen zur Resistenzvermeidung bis hin zur Demonstration der generellen Machbarkeit einer Kontrollstrategie (*proof-of-concept*). Der Bedarf bezieht sich sowohl auf bereits einsatzfähige Methoden, für die weitere Gegenspieler und pathogene Organismen in Screening-Programmen gefunden werden müssen, als auch auf die Entwicklung gänzlich neuer technischer Lösungen für Schaderreger ohne aktuell einsatzfähige Bekämpfungsstrategien. Lamichhane et al. (2017) listen in ihrer Publikation zahlreiche Kultur-Schaderreger-Gegenspieler-Kombinationen auf, für die sie ein Screening und die Implementierung neuer Methoden für notwendig erachten. Für einen funktionierenden IPS gibt es keine Einzelmethode in der Tradition des chemischen PS, in dem der Schädling komplett ausgeschaltet werden soll. Im IPS führt nur eine Kombination vieler Instrumente zum Erfolg. Daraus ergibt sich ebenfalls ein Bedarf nach einem besser informierten IPS. Dabei ist zu beachten, dass die Ökologie der Agrarsysteme komplex ist und langfristig nachhaltige Lösungen einige *ökologische Finesse* erfordern, wie Ehler & Bottrell (2000) schreiben.

Sowohl eine der konsequenten Umsetzung des IPS aufgeschlossene Legislative als auch der deutliche Forschungsbedarf, begünstigen die Vielfalt der jüngsten Forschungsvorhaben zum Thema *Transformation zu einer nachhaltigeren Landwirtschaft und IPS*. Auf Ebene der EU-Mitgliedsstaaten und auf (transnationaler) EU-Ebene werden die nicht-chemischen Maßnahmen des IPS für den Weg in eine nachhaltigere Landwirtschaft in Betracht erforscht. Einige Beispiele sollen im Folgenden das gestiegene Interesse am IPS und die Umsetzung des Forschungsbedarfes in Europa unterstreichen.

Eine frühe, teilweise von weiterführenden Aktivitäten abgelöste Initiative, von der EU als *Network of Excellence* gefördert, ist das Netzwerk *ENDURE*. Es besteht aus besonders an den

Konzepten des IPS interessierten Akteuren*Akteurinnen aus der Wissenschaft und aus der Landwirtschaftsberatung. Bereits in den Jahren von 2007 bis 2013 hat das im *EU Framework Programme 7* geförderte Projekt *PURE-IPM* stattgefunden, das praktikable Lösungen jenseits der PSM-Anwendungen für eine nachhaltigere Landwirtschaft gesucht hat.

Das über die EU Forschungsförderung im HORIZON2020-Programm geförderte Projekt *SMARTPROTECT* (2020-2022, kurz für SMART agriculture for innovative vegetable crop PROTECTION: harnessing advanced methodologies and technologies, vorläufige Ergebnisse auf der Plattform der EU Kommission unter <https://cordis.europa.eu/project/id/862563/de> abrufbar) soll helfen, Schädlingspopulationen mit modernster Anbautechnik und datengestützten Analysemethoden in einem IPS-Konzept kontrollieren zu können. Das Projekt arbeitet auf verschiedenen Verwaltungs-Ebenen der EU und stellt das gesammelte Wissen über den IPS auf einer Internetplattform bereit. Ein ähnliches Projekt, *SMARTCROP*, ist zwischen den Jahren 2015 bis 2019 in Norwegen vom Nationalen Forschungsrat finanziert worden (Research Council of Norway, Basis-Informationen über <https://www.nibio.no/en/projects/smartcrop>). Es sind dort innovative Ansätze erforscht worden, wie moderne Sensorik und intelligente Kombinationen von Mess-Instrumenten im IPS eingesetzt werden können, um Effekte im Freiland zu testen und um die Aussagekraft von Vorhersagemodellen signifikant zu verbessern.

Zahlreiche Projekte versuchen digitale Wertschöpfungskonzepte in Innovationen für eine nachhaltigere Landwirtschaft umzumünzen. Im Sinne des IPS werden die Nutzung von Fernerkundungs- und anbautechnischen Datensammlungen für das *precision farming* umgesetzt, Entscheidungshilfesysteme mit den notwendigen aktuellen Informationen versorgt oder Vorhersagemodelle für effizienteren PS oder Düngemiteleinsatz kalibriert (EU-weit: *NEXTGEOSS*, regional: *Innovationslabor Brainergy Field Lab - BFL*, in der Modellregion Bioökonomie im rheinischen Revier in NRW).

Einige Forschungsprojekte orientieren sich eng an der landwirtschaftlichen Praxis und demonstrieren die Umsetzbarkeit und Wirksamkeit des IPS zusammen mit Netzwerken aus *Demonstrationsbetrieben*. Das *IPMWorks*-Projekt, finanziert im HORIZON2020-Programm der EU von 2020 bis 2024 (www.IPMWorks.net), wird von der öffentlichen Forschungseinrichtung INRAE in Frankreich geführt. Es soll in 16 europäischen Ländern in einem Netzwerk aus Landwirten*Landwirtinnen aufzeigen, dass es möglich ist, kostengünstig und hochprofitabel mit stark reduziertem PSM-Einsatz Landwirtschaft zu betreiben. Im Mittelpunkt der Aktivitäten steht die Wissensvermittlung durch *peer-to-peer-coaching*. Die Landwirte*Landwirtinnen sollen in die Lage versetzt werden, die besten IPS-Entscheidungen für ihren spezifischen Betrieb zu finden. Das Projekt ist eng verbunden mit einer weiteren aktuellen Aktivität auf europäischer Ebene, dem *IPM Decisions*-Projekt (2019-2024, www.IPMDecisions.net). *IPM Decisions* sammelt große Datenmengen (zum Klima, zum Schädlingsdruck, zu diversen Standortfaktoren) in einem Repositorium, um so das Monitoring und betriebsspezifische Entscheidungen zur praktischen Umsetzung des IPS durch Modelle zu erleichtern. Diese Entscheidungshilfesysteme werden von Wissenschaftlern*Wissenschaftlerinnen und Praktikern*Praktikerinnen gemeinsam entwickelt, um ganz unterschiedliche Zielgruppen adressieren zu können.

Ein bereits im Jahr 2021 abgeschlossenes Projekt von herausragender Bedeutung in Deutschland sind die *Demonstrationsbetriebe integrierter Pflanzenschutz*. In enger Zusammenarbeit mit den Partner-Betrieben ist insbesondere die Umsetzbarkeit von Maßnahmen des IPS wie die der Anbau resistenter Sorten, die Ableitung schlagspezifischer Schadschwellen und der Schutz und die Förderung von Nützlingen in repräsentativen Regionen gezeigt worden (Helbig et al., 2021).

Den oben beschriebenen Vorhaben halben gemeinsam, dass sie die ökologischen Auswirkungen der IPS-Maßnahmen nur am Rande behandeln und im Projektrahmen nicht quantifizieren.

Stärker ökologisch fokussierte Fragestellungen werden zurzeit vom Bundesamt für Naturschutz im Projekt *Schadschwelle PLUS - Neubewertung von Schadschwellen im PS* finanziert (2019-2022). Das Projekt kritisiert die herkömmliche Methodik der Schadschwellenbestimmung, weil sie nur unter ganz bestimmten, betriebs-, saison-, oder schlagspezifischen Ausgangsbedingungen gültig ist. Das Vorhaben zielt darauf ab, die Schadschwellendefinition um Aspekte der Biodiversität zu erweitern. Es wird das Konzept der *ökologischen Schadschwelle* vorgeschlagen. Dieses Konzept soll zusätzlich zu den bisher für die *ökonomischen Schadschwellen* berücksichtigten Faktoren auch die Kosten für die Beeinträchtigung der Populationen von Nichtzielorganismen und allgemeiner der *Ökosystemdienstleistungen* durch intensiven, chemischen PS integrieren (Steinmann et al., 2021). Bis zu einer praktischen, kulturbezogenen Umsetzung des Ansatzes wird jedoch noch ein hoher Forschungsaufwand notwendig sein. Fraglich ist zudem, ob durch den standortspezifischen Einfluss abiotischer Umweltparameter eine belastbare Ableitung dieser Schwellen überhaupt möglich ist.

Ebenfalls mit dem Netzwerk der *Demonstrationsbetriebe integrierter Pflanzenschutz* assoziiert und nur mit indirekter Verbindung zum IPS (über die Förderung von regio-typischen Nützlingspopulationen) ist das *FRANZ* – Projekt (*Für Ressourcen, Agrarwirtschaft & Naturschutz mit Zukunft*) angetreten. In dem Vorhaben werden betriebswirtschaftlich darstellbare Naturschutzmaßnahmen in einer seltenen Kooperation zwischen Landwirtschaft (Bauernverband) und Naturschutz (NABU) umgesetzt (franz-projekt.de).

4.3 Kombinierte, skalenübergreifende und stufenweise Konzepte

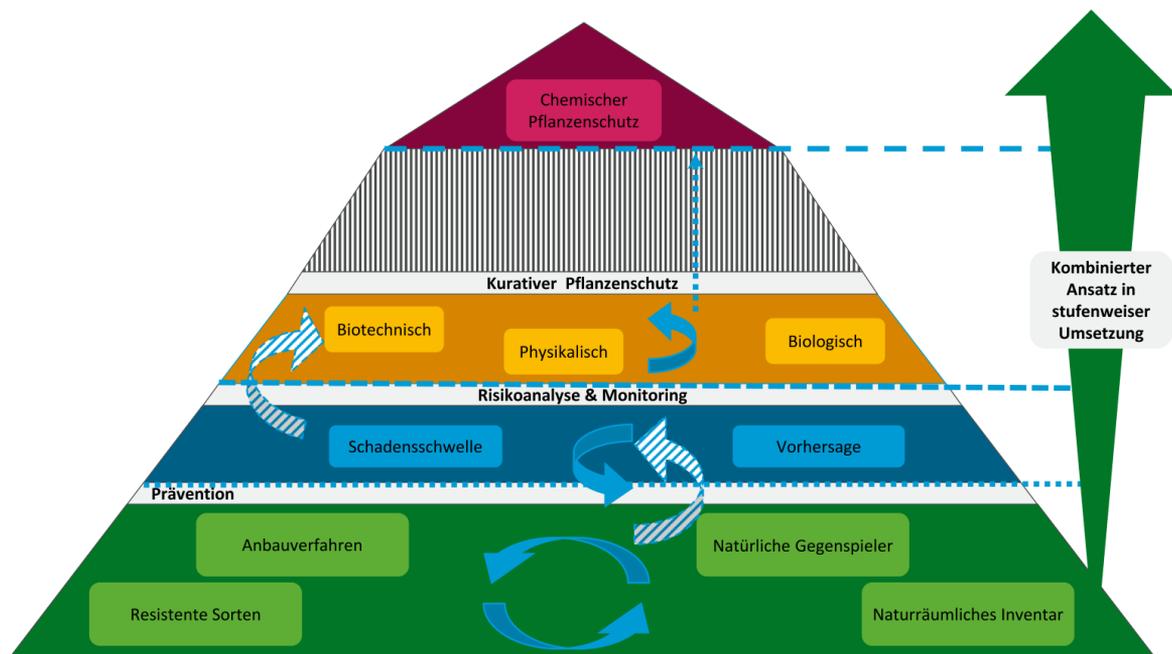
Die Bewertungen der Maßnahmen-Effekt Paarungen (Kapitel 3.4) haben aufgezeigt, dass eine wirksame Reduktion des PSM-Einsatzes und eine ökologisch motivierte, strukturelle Aufwertung der Agrarlandschaft zum Erhalt der Biodiversität bei gleichzeitig effektiver Schädlingskontrolle nicht ohne eine angepasste Kombination von Einzelmaßnahmen erreicht werden können. Die Integration der einzelnen Instrumente in ein Gesamtkonzept ist dezidierter Bestandteil der IPS-Strategie und erfordert ein breites Wissen über die Wirkzusammenhänge auf Ebene des landwirtschaftlichen Betriebes, aber auch übergreifend auf regionalen Skalen. Daraus lässt sich weiterer Forschungsbedarf ableiten, der den Schwerpunkt auf die realen Auswirkungen von Maßnahmenkombinationen des IPS für spezifische Anbaukulturen im Freiland legt.

Die Literaturrecherche hat aufgezeigt, dass integrative Konzepte vorhanden sind, die von den Autoren für ein gesamtheitliches Agrarlandschafts-Management vorgeschlagen werden. Duru et al. (2015) entwickeln aus den zahlreichen Einzelmaßnahmen (Kapitel 3.4) in ihrem Übersichtsartikel Schlüsselwerkzeuge, die in ihrer kombinierten Anwendung die biologische Vielfalt in der Agrarlandschaft unterstützen und so die Bereitstellung und Resilienz von Ökosystemleistungen sichern. Unterschieden wird in diesem Managementansatz zwischen der Pflanzenvielfalt auf einer zeitlichen Entwicklungsachse und in einer räumlichen Skalenauflösung (von dem einzelnen Feldblock über Feldraine bis hin zur Landschaftsebene). Durch die dargestellten IPS-Maßnahmen in ihrer räumlich-zeitlichen Differenzierung können die definierten Schlüsseleigenschaften zur Bereitstellung von Ökosystemleistungen gefördert werden. Ökosystemleistungen umfassen nach Duru et al. funktionelle Diversität, Konnektivität und *träge* Variablen, wie die organische Zusammensetzung und die Wasserhaltekapazität von Böden.

Strategien, die aus einer Kombination der IPS-Maßnahmen entwickelt werden, nutzen dabei zumeist einen stufenweisen Ansatz, der von nicht-invasiven Methoden bis zur gezielten Ausbringung von spezifisch wirkenden PSM je nach Schädigungsgrad gesteigert werden kann (Abbildung 18). Dieses Prinzip wird in ähnlicher Form auch als Crop-Management im Ökolandbau angewendet und entspricht dem ursprünglichen Wesen des IPS. Als gelebte Praxis

wird die IPS-Strategie im konventionellen Landbau auf Basis der Expertenbefragung jedoch meist vernachlässigt und ist auch als Ansatz bei den empirischen Untersuchungen in dieser Studie nicht häufig zu finden (Deguine et al., 2021). In einer Analyse von Pretty et al. (2015) zu insgesamt 85 IPS-Projekten mit kombinierten Methoden in 24 Ländern (Afrika und Asien) wird jedoch deutlich, dass diese Strategie zu einer Reduktion der PSM-Ausbringung bei gleichbleibender oder verbesserter Produktivität führen kann. In eine ähnliche Richtung argumentieren auch Lechenet et al. (2014) in einer breit angelegten Studie aus Frankreich. An Daten von 946 konventionellen Ackerbaubetrieben ist gezeigt worden, dass die Produktivität der Anbauflächen und die Wirksamkeit von PSM für die Schädlingskontrolle auch bei deutlich reduziertem PSM-Einsatz aufrechterhalten werden können. Bezogen auf unterstützende Maßnahmen des IPS wird jedoch deutlich, dass es in der Literatur an einer systematischen Faktorenunterscheidung zur Wirkung der einzelnen IPS-Maßnahmen in einem gekoppelten Anwendungsdesign, das den (statistischen) Interaktionen Rechnung trägt, mangelt. Es wird vor allem nicht zwischen verschiedenen Anbaukulturen in Bezug auf die PSM-Reduktion und auf das ökologische Potenzial verschiedener Landschaftsräume unterschieden.

Abbildung 18: Angepasste Maßnahmenpyramide des IPS (im Vergleich zur Abbildung 1) mit implizierter Darstellung der Stufenweisen Umsetzung innerhalb eines Konzepts der kombinierten Anwendung von IPS-Maßnahmen. Die Pfeile verdeutlichen die Notwendigkeit einer konsequent durchgeführten IPS-Strategie: Anwendung der IPS-Maßnahmen in Kombination innerhalb einer Stufe, dann nach Notwendigkeit stufenweise Hinzufügung weiterer IPS-Maßnahmen aus höheren Stufen.



Quelle: Eigene Darstellung, Darwin Statistics 2023

4.4 Forschungsbedarf und Vorschläge für Forschungsschwerpunkte

Aus der vorliegenden Übersichtsarbeit zum Stand der IPS-Maßnahmen und ihren Wirkungen auf die Biodiversität und den PS-Einsatz lassen sich direkte Forschungsbedarfe und Vorschläge für zukünftige Forschungsschwerpunkte jenseits der existierenden Ansätze zur Testung von IPS-Ansätzen ableiten.

Es zeigt sich, dass insbesondere Studien einen Mehrwert liefern können, in denen im Landschaftskontext mittels eines faktoriellen Designs Maßnahmen in hoher Replizierung

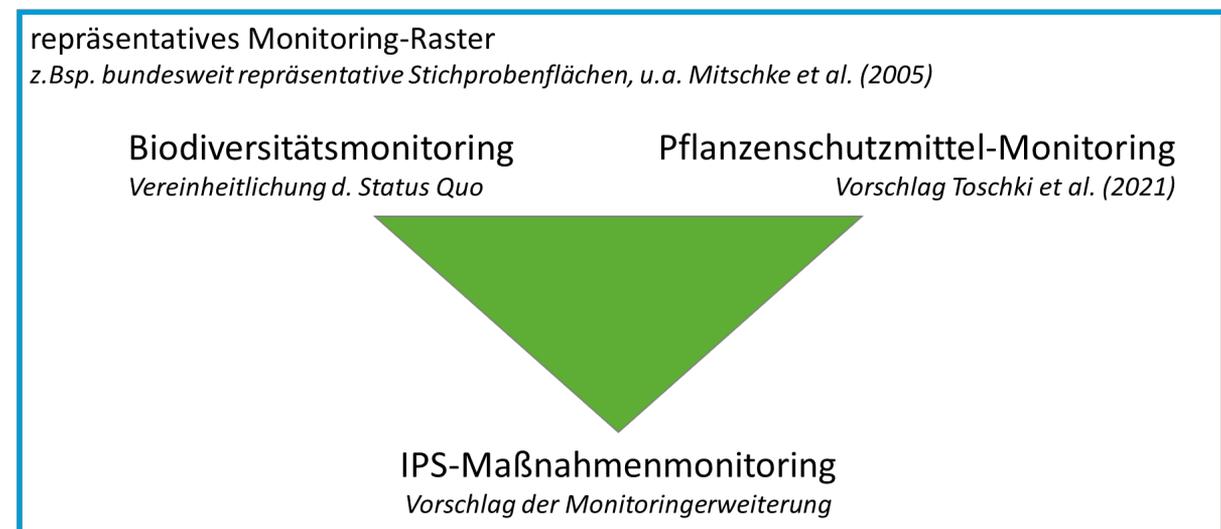
getestet werden. Hierbei könnten spezifische Fragestellungen betrachtet werden, die unter Berücksichtigung des aktuellen Forschungsstandes aufgrund von widersprüchlichen Resultaten und Schlussfolgerungen nicht eindeutig beantwortet werden können. Ein Beispiel aus der Literaturrecherche ist die Wirksamkeit von Randstrukturen im Hinblick auf die Nützlingsförderung. Im Rahmen von sogenannten *push-pull*-Strategien mittels Randstrukturen sollen Schädlinge aus den Ackerflächen ferngehalten und gleichzeitig Nützlingspopulationen gefördert werden. Schwierigkeiten treten in diesem Ansatz auf, wenn die entsprechenden Schädlinge stärker gefördert werden als die Nützlinge, sodass es netto keinen Nutzen im Sinne einer langfristigen Schädlingsreduktion gibt. So zeigen zum Beispiel Tscharntke et al. (2016), dass es auch negative Fallbeispiele bei der Entwicklung von naturräumlicher Infrastruktur durch eine implizierte Schädlingsförderung geben kann. Sie haben in ihrem Übersichtsartikel Hypothesen erarbeitet, wie diese negativen Dynamiken bei der Entwicklung der naturräumlichen Infrastruktur strategisch umgangen werden können (siehe Kapitel 3.4.3). Forschungsbedarf besteht jedoch bei der Frage, unter welchen Bedingungen diese Dynamiken konkret kultur- und schädlings- sowie standortspezifisch auftreten.

Für Untersuchungen zu Maßnahmenkombinationen, schlagen wir ein integriertes Monitoring der IPS-Maßnahmen vor, dass in (zum Teil) bestehende Monitoringprogramme für Biodiversität und PSM-Rückstände auf repräsentativen Stichprobenflächen in Deutschland eingebettet werden kann (Abbildung 19). Ein Verzeichnis aller chemischen und nicht-chemischen PS-Maßnahmen wird mit dem Vorschlag der neuen SUR in Artikel 16 erforderlich. Dieses Datenregister würde die Erhebung und Auswertung solcher Daten ermöglichen.

In Deutschland besteht bereits ein etabliertes Netz an bundesweiten ökologischen Flächenstichproben, die aus einer geschichteten Zufallsstichprobe mit 1 000 bundesweiten Flächen und weiteren 1 637 bundeslandspezifischen Flächen (Repräsentativität auf Landesebene) zusammengesetzt sind (Mitschke et al., 2005). Die Flächen bestehen aus 1 x 1 km² großen Ausschnitten der zu untersuchenden Landschaften. Sie sind ursprünglich im Rahmen des Monitorings häufiger Brutvögel entwickelt worden (Heidrich-Riske, 2004) und werden darüber hinaus auch für weitergehende raumbezogene Dauerbeobachtungsprogramme genutzt. Toschki et al. (2021) haben auf diesen Flächen ein Konzept vorgestellt, auf dessen Grundlage mittels eines PSM-Monitorings die ökologischen Auswirkungen des PSM-Einsatzes in der Agrarlandschaft beobachtet und bewertet werden können. Dieses Konzept beruht auf einem integrierten Ansatz, die Biodiversitäts- und PSM-Beobachtungen werden in unmittelbarem räumlich-zeitlichen Bezug zueinander erhoben, um unter Berücksichtigung der biotischen und abiotischen Einflussfaktoren mögliche Kausalbeziehungen ableiten zu können. Dabei werden die Daten aus bereits bestehenden Biodiversitätsprogrammen genutzt und so Synergien geschaffen.

Der hier formulierte Vorschlag ist als Folge der identifizierten Wissenslücken im Bereich der in der Praxis verwendeten IPS-Maßnahmenkombinationen zu sehen. Ein Monitoringprogramm auf den bundesweit repräsentativen Stichprobenflächen sollte um die Dimension eines IPS-Maßnahmen-Monitorings erweitert werden. Dabei würden die IPS-Maßnahmen flächenscharf auf den Landschaftsausschnitten erfasst, durch ihre Berücksichtigung in der statistischen Analyse als Faktorenkombination ausgewertet und ihre Auswirkungen auf den PSM-Einsatz und den ökologischen Zustand der Landschaft direkt bilanziert werden. Dadurch könnten IPS-Maßnahmen im praktischen Einsatz, unter realistischen Bedingungen und in ausreichend hoher Stichprobenzahl untersucht werden.

Abbildung 19: Vorschlag für ein systematisches Monitoring der IPS-Maßnahmenkombinationen unter besonderer Berücksichtigung der Wirkung auf den PSM-Einsatz und der Biodiversität.



Der Vorschlag von Toschki et al. (2021) zu einem repräsentativen, integrierten Monitoring in der Agrarlandschaft wird durch die flächenscharfe Erfassung der IPS-Maßnahmen unter Berücksichtigung des Einflusses auf die Biodiversität und den Pflanzenschutzmitteleinsatz ergänzt

Quelle: Eigene Darstellung, Darwin Statistics 2023

Durch die Erweiterung der bestehenden Monitoringprogramme um eine IPS-Dimension könnten darüber hinaus direkt und unmittelbar Synergien für alle Teil-Monitoringansätze entstehen, ohne dass ein erheblicher Mehraufwand nötig würde. Im Vergleich zum erwarteten Nutzen und im Unterschied zu anderen Umwelt-Monitoringprogrammen könnte der praktische Aufwand gerade dann vergleichsweise gering ausfallen, wenn im Zuge der aktuell in Überarbeitung befindlichen EU-Richtlinie 2009/128/EC die erwartete Dokumentationspflicht IPS-Maßnahmen in landwirtschaftlichen Betrieben umgesetzt wird. Der Ressourceneinsatz für die im folgenden notwendige Datenaufbereitung und -auswertung ist dabei noch nicht berücksichtigt. Der Mehrwert würde diesen Aufwand jedoch um ein Vielfaches rechtfertigen. Über validierte Erkenntnisse zur Wirksamkeit der kombinierten IPS-Maßnahmen könnten unmittelbar Handlungsempfehlungen für ein zukünftiges Landschaftsmanagement abgeleitet werden.

4.5 Ausblick: Ist der Weg frei für eine nachhaltigere Landwirtschaft?

In der Recherche zum IPS wird deutlich, dass die Reduktion des chemischen PS als Hauptziel des IPS für eine nachhaltigere Landwirtschaft, die konkrete Ausgestaltung geeigneter Maßnahmen und das Maß der anzustrebenden PSM-Senkung noch ungenau bleiben. Die Begrenzung der PSM-Anwendung auf ein *notwendiges Maß* ist in dieser Form im Anhang III der Richtlinie 2009/128/EG (EU, 2009A) und im Deutschen PS-Gesetz (PflSchG 2012) zu finden und wird ebenfalls im NAP zur nachhaltigen Anwendung von PSM (BMEL, 2013) als Brücke zu den Maßnahmen des IPS so beschrieben. Aktuell wird es als ein Ziel des Koalitionsvertrags der regierenden Koalitionspartner von SPD, Bündnis90/die Grünen und FDP genannt, *den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln auf das notwendige Maß beschränken* (Koalitionsvertrag, 2021).

Kritik an der Formulierung dieser Zielsetzung ist bereits in einer gemeinsamen Stellungnahme zum NAP verschiedener NGOs (Pestizid Aktions-Netzwerk - PAN, Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland - BUND, Naturschutzbund Deutschland - NABU, Greenpeace, 2012) zusammengefasst worden. Neben der ungenauen Zielformulierung wird von den NGOs bemängelt, dass ein *notwendiges Maß* nach konsequenter Auslegung der Gesetzgebung nur rückwirkend bestimmbar sei und es kein *notwendiges Maß* für Monokulturen oder enge

Fruchtfolgen geben könne, da in diesen Fällen die gesetzlich vorrangigen Maßnahmen des IPS (biologische, physikalische, biotechnologische, weitere nicht-chemische Maßnahmen, siehe Abbildung 1) nicht ausgeschöpft worden sind. Es wird deshalb eine konkretere und überprüfbare Zielsetzung zur PSM-Reduktion gefordert, wodurch die im aktuellen Koalitionsvertrag weiter ausgeführten Pläne (*Der integrierte Pflanzenschutz wird ergänzt, wir stärken seine Forschung und Förderung*) umgesetzt würden. Auch vor diesem Hintergrund sollten die belegbaren Wirkungen der betrachteten IPS-Maßnahmen und vor allem der Maßnahmenkombinationen auf die Reduktion des PSM-Einsatzes evaluiert werden.

Für das Ziel einer Halbierung der PSM-Anwendung bis zum Jahr 2030, wie mit der F2F-Strategie vorgesehen, ist die konkrete Implementierung von nicht-chemischen Maßnahmen des IPS wichtig. Es ist sehr unwahrscheinlich, dass das 50 %-Reduktions-Ziel der EU nur durch Appelle und mit Beratungsangeboten erreicht werden kann. Strengere Vorschriften, wie im Aktionsprogramm Insektenschutz vorgesehen, werden Ertragseinbußen zur Folge haben (Isermeyer et al., 2020). Nachdem in der Umsetzung der bisherigen Richtlinie zur Nachhaltigen Verwendung von PSM große Defizite in der Umsetzung und Zielerreichung festgestellt wurden, umfasst der im Jahr 2022 von der Europäischen Kommission veröffentlichte Vorschlag für eine Verordnung zur nachhaltigen Anwendung von PSM auch eine Stärkung und finanzielle Förderung nicht-chemischer PS-Maßnahmen dar (Europäische Kommission, 2022).

Am Schluss stellt sich jedoch die Frage, ob ein konsequent und flächendeckend umgesetzter IPS, der die strukturelle Prävention und vorausschauende Schädlingskontrolle über intensive Flächennutzung und chemische Schädlingsbekämpfung stellt, eine nachhaltige Zukunft der Landwirtschaft in Europa ermöglichen kann. Bei der Vielfalt europäischer Landwirtschaftssysteme, wie auch angesichts der deutlichen regionalen Unterschiede hinsichtlich des Klimas, der Bodenverhältnisse und der Anbauhistorie in einem großen Flächenland wie Deutschland, ist es allerdings schwierig, allgemeingültige Empfehlungen zu geben (wie Barzman et al., 2015, ebenfalls konstatierten). Der IPS ist in den bestehenden Richtlinien und Verordnungen des PS-Regelungs-Paketes (Kapitel 1.2) bereits verankert und soll mit der revidierten und in eine bindende Verordnung überführten Richtlinie 2009/128/EC zur Nachhaltigen Verwendung von PSM verbindlich für alle Mitgliedsstaaten gemacht werden (*enforcement*). Der politische Prozess ist am Anfang des Jahres 2022 mit dem Beginn des Russland-Ukraine-Krieges und der zunehmenden Sorge um die Versorgungssicherheit mit Nahrungsmitteln in Europa ins Stocken geraten. Umso mehr wird deutlich, dass eine nachhaltig funktionierende Landwirtschaft in Europa unbedingt notwendig ist. Die EU-Kommission allerdings hat die Veröffentlichung der angepassten Richtlinie zunächst verschoben und andere Neuregelungen zur Ökologisierung der Landwirtschaft (wie die verpflichtende Stilllegung von 4 % der Betriebsfläche) in der GAP ausgesetzt. So kann bezweifelt werden, ob sich die ursprünglichen Absichten des Green-Deal und der F2F-Strategie bald umsetzen lassen. Ein erster Entwurf einer neuen Verordnung zur nachhaltigen Anwendung von PSM (SUR), ist von der EU-Kommission zwar kürzlich veröffentlicht worden (Europäische Kommission, 2022), eine praktische Umsetzung der geforderten Maßnahmen (EU-weite PSM-Abgaben, digitale Erfassung von PSM-Anwendungsdaten, wirksamer Schutz sensibler Gebiete, Indikatorentwicklung zur Erfolgsevaluation) steht jedoch noch aus.

Entgegen der allgemeinen Erwartung ist ein konsequent angewendeter IPS geeignet, die applizierten PSM-Mengen stark zu verringern und dabei gleichzeitig die Erträge zu erhalten oder zu steigern. Dies gilt insbesondere für Fungizide und Insektizide, für deren Verwendung viele nicht-chemische Verfahren zur Verfügung stehen. Für Herbizide sind weniger oder sehr langfristig angelegte alternative Maßnahmen beschrieben worden (wie zum Beispiel die Ausdünnung der Beikraut-Samenbank des Bodens im ökologischen Landbau). Pretty & Bharucha (2015) konnten in zahlreichen Projekten mit kombinierten IPS-Maßnahmen an

Standorten auf den afrikanischen und asiatischen Kontinenten einen direkten positiven Zusammenhang zwischen dem IPS, einem reduzierten PSM-Einsatz und den Erträgen zeigen. Außerhalb Europas ist die Bereitschaft alternative, kostengünstige, nicht-chemische PS-Methoden zu suchen aus ökonomischen Erwägungen der Landwirte*Landwirtinnen größer als in der EU. Es sind aber keine offensichtlichen Gründe vorhanden, die eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus Afrika und Asien verhindern sollten. Dabei werden die Vorteile eines wohlüberlegten Umgangs mit der Anwendung von PSM auf verschiedenen räumlichen Skalenebenen sichtbar. So werden auf dem *einzelnen Feld* durch ökonomischen Einsatz von geringeren PSM-Mengen die Schaderreger effektiv reguliert, während die Nichtzielorganismen geschont werden. Auf der Betriebsebene zeigt sich, dass die Profitabilität steigt, während eine Zertifizierung (z. B. als umweltfreundlicher Betrieb) möglich und das Potenzial für biologische Schädlingskontrolle erhöht wird. Beim Übergang auf die Landschaftsebene zeigen sich positive Effekte bezüglich einer geringeren Belastung der Umwelt mit PSM, damit einhergehend ein höherer monetärer Wert der Flächen und auf gesellschaftlicher Ebene ein verbesserter Umweltschutz, qualitativ höherwertige Produkte und ein gesünderes Leben für alle (Guedes et al., 2016).

Die konventionelle Landwirtschaftspraxis schaut ähnlich wie auf die konsequente Umsetzung des IPS mit großen PSM-Einsparungen, grundlos pessimistisch auf die mögliche Transformation der Landwirtschaft vom *intensiven Landbau* über den *IPS* weiter in Richtung *Verzicht auf chemisch-synthetischen PS* und die Etablierung diversitätssteigernder Maßnahmen bis zum *ökologischen Landbau*. Letzterer erzielt zwar in den meisten Fällen etwas niedrigere Erträge als die konventionelle Anbau-Methodik (zwischen 5 % und 30 %, im Mittel 25 % weniger). Die Höhe der Ertragseinbußen hängt von der Bewirtschaftungsweise und der Management-Praxis ab (Seufert et al., 2012). Die durch eine ökologische Landwirtschaft erzielbaren Gewinne für die Biodiversität sind unbestritten. So kann sich die lokale Artenvielfalt im weltweiten Vergleich bei einer Umstellung von konventioneller auf ökologische Landwirtschaft um mehr als 30 % erhöhen, während die Abundanz der Nichtzielorganismen um mehr als 50 % höher ausfallen kann. Speziell in sehr intensiv behandelten Apfelplantagen wurden jedoch im Ökolandbau im Mittel 48 % weniger Ertrag im Vergleich zum IPS erzielt. Der Nutzen bestand in einer deutlich erhöhten Artenvielfalt und Bestäubungsleistung mit ökologischen Anbauverfahren im Vergleich zu IPS (Samnegard et al., 2019). Grenzen dieser Strategie werden deutlich, wenn in die Bilanz des Ökolandbaus der erhöhte Flächenverbrauch aufgrund des geringeren Ertrages, der wiederum ebenfalls eine Intensivierung des Ökolandbaus mit sich bringt, einbezogen wird (Tschardt et al., 2021). Wie in einem wirksamen IPS die Kombination verschiedener Maßnahmen notwendig ist, so lassen sich auch die Zielkonflikte umgehen, die durch eine flächendeckende Umsetzung der Prinzipien des Ökolandbaus entstehen. Schader et al. (2017) modellieren die Umweltauswirkungen verschiedener Szenarien mit unterschiedlichen Anteilen des Ökolandbaus, Parametern der Lebensmittelverschwendung und des Konsums tierischer Produkte auf Landnutzung und Düngemittelbedarf. Sie sind so in der Lage, modellbasierte Kompromiss-Szenarien vorzuschlagen: Zum Beispiel könnten bei einem Anteil des Ökolandbaus von 60 %, einer um 50 % geringeren Lebensmittelverschwendung und einem um 35 % geringeren Konsum tierischer Produkte signifikant geringere Umweltschäden ohne wesentlich erhöhten Flächenverbrauch erreicht werden. Die Schweiz setzt bei der Transformation der Landwirtschaft nicht ausschließlich auf den Ökolandbau, sondern seit 30 Jahren unter dem Label *IP-Suisse* auf PSM-reduzierte Anbaukonzepte. In einer Studie zur Weizenproduktion unter dem *IP-Suisse*-Label konnte gezeigt werden, dass eine hochskalige Produktion PSM-frei möglich ist und dass dieses Konzept mit einer hohen Akzeptanz in der Landwirtschaft rechnen kann (solange sich die Ertragseinbußen und weitere Risiken in Grenzen halten).

Die Aufwertung der Landschaft wird von deutschen Anbauverbänden zwar empfohlen, ist aber keine Voraussetzung für eine Mitgliedschaft und wird nicht oft in die Betriebsführung einbezogen. Weitere Zielkonflikte zwischen beabsichtigten, positiven und unvermeidlichen, negativen Wirkungen können sich durch eine erhöhte Umweltbelastung aufgrund häufiger Bodenbearbeitungen und Maschineneinsätze als Substitut für den Herbizideinsatz ergeben.

Es erscheint notwendig, weitere Schritte in Richtung einer umfassenderen Reform und Denkweise für eine nachhaltige Landwirtschaft der Zukunft zu unternehmen. Lecuyer et al. (2021) und viele weitere Autoren kritisieren die Steuerungsinstrumente der EU-Agrarumweltmaßnahmen als ein untaugliches Anreizsystem, weil der Erfolg eines Programmes in der GAP an der Anzahl der teilnehmenden Landwirte und nicht an der Erreichung der mit einer Maßnahme angepeilten Zielen gemessen wird. Als Ausweg wird häufig die Utopie einer *Agrarökologie* als das zukunftsweisende Konzept für die Herstellung einer weltweiten Nahrungsmittelsicherheit ins Feld geführt, so von der Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, 2014). Die FAO weist aber auch auf die Schwierigkeiten der Implementierung (am Beispiel Ostafrikas, die Situation lässt sich auf andere Regionen übertragen) der IPS-Maßnahmenbündel hin, die eine gemeinsame Anstrengung und Strategie der gesamten Gesellschaft erfordern. Einen Überblick über Konzepte der *Agrarökologie* geben Rusch et al. (2017). Die *Agrarökologie* wird als Konzept gesehen, das Wissenschaft, landwirtschaftliche Praxis und eine soziale Bewegung vereint und deshalb geeignet erscheint, viele Zielkonflikte zwischen intensiver Nutzung und Biodiversität, aber auch zwischen Landeigner*innen und Autonomie aus der Vergangenheit zu überwinden.

Das Fazit aus dieser Untersuchung ist positiv. Die europäische Landwirtschaft hat sich auf den (alternativlosen) Weg zu einer ökonomisch und ökologisch nachhaltigeren Praxis gemacht. Es wurden politische Weichenstellungen vorgenommen, die Berufsverbände und Naturschutzorganisationen arbeiten beispielhaft an der Erprobung und Umsetzung von Konzepten und die Instrumente des IPS werden weiterentwickelt. Der Weg ist frei, nun braucht es Entschlusskraft und Mut, die gewohnten Pfade zu verlassen!

5 Referenzen

- Altieri MA, Gurr G, Wratten SD (Genetic engineering and ecological engineering: a clash of paradigms or scope of synergy?) 2004. In: Gurr G, Wratten SD, Altieri MA (eds.): Ecological engineering for pest management - Advances in habitat manipulation for arthropods. Csiro publishing, Collingwood, Australia. 244 Seiten
- Andersen A (1997) Densities of overwintering carabids and staphylinids (Col., Carabidae and Staphylinidae) in cereal and grass fields and their boundaries. *Journal of Applied Entomology* 121: 77-80
- Asplen MK, Anfora G, Biondi A, Choi DS, Chu D, Daane KM, Gibert P, Gutierrez AP, Hoelmer KA, Hutchison WD, Isaacs R, Jiang ZL, Kárpáti Z, Kimura MT, Pascual M, Philips CR, Plantamp C, Ponti L, Véték G, Vogt H, Walton VM, Yu Y, Zappalà L, Desneux N (Invasion biology of spotted wing *Drosophila* (*Drosophila suzukii*): a global perspective and future priorities) 2015. *Journal of Pest Science* 88 (3): 469-494
- Bajwa WI, Kogan M (2002) Compendium of IPM Definitions (CID). What is IPM and how is it defined in worldwide literature? Integrated Plant Protection Center (IPPC). Oregon State University, Corvallis. Publication Number 998
- Barnes AD, Scherber C, Brose U, Borer ET, Ebeling A, Gauzens B, Giling DP, Hines J, Isbell F, Ristok C, Tilman D, Weisser WW, Eisenhauer N (2020) Biodiversity enhances the multitrophic control of arthropod herbivory. *Science Advances* 6 (5): 9 Seiten
- Barzman M, Bàrberi P, Birch ANE, Boonekamp P, Dachbrodt-Saaydeh S, Graf B, Hommel B, Jensen JE, Kiss J, Kudsk P, Lamichhane JR, Messéan A, Moonen AC, Ratnadass A, Ricci P, Sarah JL, Sattin M (2015) Eight principles of integrated pest management. *Agronomy for Sustainable Development* 35: 1199-1215
- Bastiaans L, Paolini R, Baumann D (2008) Focus on ecological weed management: What is hindering adoption? *Weed Research* 48(6): 481-491
- Batary P, Galle R, Riesch F, Fischer C, Dormann CF, Musshoff O, Cszasz P, Fusaro S, Gayer C, Happe AK, Kurucz K, Molnar D, Rosch V, Wiertzke A, Tscharrntke T (2017) The former Iron Curtain still drives biodiversity-profit trade-offs in German agriculture. *Nature Ecology & Evolution* 1: 1279-1284
- Begg GS, Cook SM, Dye R, Ferrante M, Franck P, Lavigne C, Lövei GL, Mansion-Vaquie A, Pell JK, Petit S, Quesada N, Ricci B, Wratten SD, Birch ANE (2017) A functional overview of conservation biological control. *Crop Protection* 97: 145-158
- Bielza P (2008) Insecticide resistance management strategies against the western flower thrips, *Frankliniella occidentalis*. *Pest Management Science* 64(11): 1131-1138
- Bioland e.V. (2020) Bioland Richtlinien. Verband für organisch biologischen Landbau
- BMELV - Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2013) Nationaler Aktionsplan zur nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln inklusive der Indikatoren. Online im Internet: www.nap-pflanzenschutz.de/ueber-den-aktionsplan. (Zuletzt aufgerufen November 2021)
- Bosco L, Moraglio S, Tavella L (2018) *Halyomorpha halys*, a serious threat for hazelnut in newly invaded areas. *Journal of Pest Science* 91: 661-670
- Brewer MJ, Goodell PB (2012) Approaches and incentives to implement integrated pest management that addresses regional and environmental issues. *The Annual Review of Entomology* 57: 41-59
- Campos MR, Biondi A, Adiga A, Guedes RNC, Desneux N (2017) From the Western Palaearctic region to beyond: *Tuta absoluta* 10 years after invading Europe. *Journal of Pest Science* 90: 787-796
- Chamberlain S (2021) fulltext: Full Text of 'Scholarly' Articles Across Many Data Sources. R package version 2.0. <https://CRAN.R-project.org/package=fulltext>
- Collins DA (2006) A review of alternatives to organophosphorus compounds for the control of storage mites. *Journal of Stored Products Research* 42(4): 395-426

Cook SM, Khan ZR, Pickett JA (2007) The use of push-pull strategies in integrated pest management. Annual Reviews in Entomology 52: 375-400

Council of the European Union (1991) Council Directive 15 July 1991 concerning the placing of plant protection products on the market (91/414/EEC). Official Journal of the European Communities L 230: 1-210

Deguine JP, Aubertot JN, Flor RJ, Lescourret F, Wyckhuys KAG, Ratnadass A (2021) Integrated pest management: good intentions, hard realities. A review. Agronomy for Sustainable Development 41: article 38

Dennis P, Fry GLA (1992) Field margins: can they enhance natural enemy population densities and general arthropod diversity on farmland. Agriculture Ecosystems and Environment 40: 95-115

Duru M, Therond O, Martin G, Martin-Clouaire R, Magne MA, Justes E, Journet E, Aubertot J, Savary S, Bergez JE, Sarthou JP (2015) How to implement biodiversity-based agriculture to enhance ecosystem services: a review. Agronomy for Sustainable Development 35: 1259-1281

EFSA - European Food Safety Authority (2009) Submission of scientific peer-reviewed open literature for the approval of pesticide active substances under Regulation (EC) No 1107/2009. OJ L 309, 24.11.2009, p. 1-50; EFSA Journal 9(2): 2092

EFSA - European Food Safety Authority (2021) Evaluation of the emergency authorisations granted by Member State Germany for plant protection products containing thiamethoxam. EFSA supporting publication 2021: EN-6969. 12 Seiten

Ehler LE, Bottrell DG (2000) The Illusion of Integrated Pest Management. Issues in Science and Technology 16(3): 61-64

Eilenberg J, Hajek A, Lomer C (2001) Suggestions for unifying the terminology in biological control. BioControl 46: 387-400

Elsevier (2021) Scopus Fact Sheet. Online im Internet: Highlights of Scopus facts as of August 2021. Online im Internet: https://www.elsevier.com/_data/assets/pdf_file/0017/114533/Scopus-fact-sheet-2022-web.pdf. (Zuletzt abgerufen November 2021)

Europäische Kommission (2021) Durchführungsverordnung (EU) 2021/1165 der Kommission vom 15. Juli 2021 über die Zulassung bestimmter Erzeugnisse und Stoffe zur Verwendung in der ökologischen/biologischen Produktion und zur Erstellung entsprechender Verzeichnisse. Amtsblatt der Europäischen Union L 253/13

Europäische Kommission (2022) Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on the sustainable use of plant protection products and amending Regulation (EU) 2021/2115. COM (2022) 305 final. 2022/0196 (COD)

Europäische Union (1998) Richtlinie 98/8/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Februar 1998 über das Inverkehrbringen von Biozid-Produkten. Amtsblatt der Europäischen Union L 123

Europäische Union (2009A) Richtlinie 2009/128/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 über einen Aktionsrahmen der Gemeinschaft für die nachhaltige Verwendung von Pestiziden. Amtsblatt der Europäischen Union L 309/71

Europäische Union (2009B) Richtlinie 2009/127/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 zur Änderung der Richtlinie 2006/42/EG betreffend Maschinen zur Ausbringung von Pestiziden. Amtsblatt der Europäischen Union L 310/29

Europäische Union (2009C) Verordnung (EG) Nr. 1107/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 über das Inverkehrbringen von Pflanzenschutzmitteln und zur Aufhebung der Richtlinien 79/117/EWG und 91/414/EWG des Rates. Amtsblatt der Europäischen Union L 309/1

Europäische Union (2009D) Verordnung (EG) Nr. 1185/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. November 2009 über Statistiken zu Pestiziden (Text von Bedeutung für den EWR). Amtsblatt der Europäischen Union L 324/1

Europäischer Rat (2007) Verordnung (EG) Nr. 834/2007 des Rates vom 28. Juni 2007 über die ökologische/biologische Produktion und die Kennzeichnung von ökologischen/biologischen Erzeugnissen und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 2092/91. Amtsblatt der Europäischen Union L189/1

Europäischer Rechnungshof - European Court of Auditors (2020) Nachhaltige Verwendung von Pflanzenschutzmitteln: begrenzter Fortschritt bei der Messung und Verringerung von Risiken. Sonderbericht DE 05/2020

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations (2014) Agroecology for food security and nutrition - Biodiversity & ecosystem services in agricultural production systems. Final report for the International Symposium on Nutrition, 18–19 September 2014, Rome. ISBN 978-92-5-108807-4

Farrell G, Schulten GGM (2002) Larger grain borer in Africa; a history of efforts to limit its impact. *Integrated Pest Management Reviews* 7: 67-84

Fartmann T, Jedicke E, Stuhldreher G, Streitberger M (2021) Insektensterben in Mitteleuropa - Ursachen und Gegenmaßnahmen. Ulmer Verlag. 303 Seiten

Feinerer I, Hornik K (2020) tm: Text Mining Package. R package version 0.7-8. <https://CRAN.R-project.org/package=tm>

Forister ML, Pelton EM, Black SH (2019) Declines in insect abundance and diversity: We know enough to act now. *Conservation Science and Practice* 1: e80

Frederiks C, Wesseler J (2019) A comparison of the EU and US regulatory frameworks for the active substance registration of microbial biological control agents. *Pest Management Science* 75(1): 87-103

Freier B, Boller EF (2009) Chapter 14 Integrated Pest Management in Europe - History, Policy, Achievements and Implementation. In: Peshin R, Dhawan AK (2009) *Integrated Pest Management - Volume 2: Dissemination and Impact*. Springer Dordrecht. 628 Seiten

Freier B, Dachbrodt-Saaydeh S (2018) *Integrierter Pflanzenschutz*. Bundesamt für Landwirtschaft und Ernährung. ISBN/EAN 978-3-8308-1304-0. 52 Seiten

Freier B, Krengel S, Kula C, Kühne S, Kehlenbeck H (2017) Bericht über Erkenntnisse wissenschaftlicher Untersuchungen über mögliche direkte und indirekte Einflüsse des Pflanzenschutzes auf die Biodiversität in der Agrarlandschaft. *Berichte aus dem Julius-Kühn-Institut* 189: 1-72

Frielinghaus M (ed.) (2000) *Lexikon der Geowissenschaften*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg (Stichwort: conservation tillage)

Galli P (2005) 50 Jahre integrierter Pflanzenschutz im Obstbau in Baden-Württemberg. *Landinfo* 5: 6-10

Geiger F, Bengtsson J, Berendse F, Weisser WW, Emmerson M, Morales MB, Ceryngier P, Liira J, Tscharnkte T, Winqvist C, Eggers S, Bommarco R, Pärt T, Bretagnolle V, Plantegenest M, Clement LW, Dennis C, Palmerd C, Onate JJ, Guerrero I, Hawro V, Aavik T, Thies C, Flohre A, Hänke, Fischer C, Goedhart PW, Inchausti P (2010) Persistent negative effects of pesticides on biodiversity and biological control potential on European farmland. *Basic and Applied Ecology* 11(2): 97-105

Goicoechea N (2009) To what extent are soil amendments useful to control *Verticillium* wilt? *Pest Management Science* 65(8): 831-839

Grass I, Loos J, Baensch S, Batáry P, Librán-Embíd F, Ficiyan A, Klaus F, Riechers M, Rosa J, Tiede J, Udy K, Westphal C, Wurz A, Tscharnkte T (2019) Land-sharing/-sparing connectivity landscapes for ecosystem services and biodiversity conservation. *People and Nature* 1(2): 262-272

Guedes RNC, Smagghe G, Stark JD, Desneux N (2016) Pesticide-Induced Stress in Arthropod Pests for Optimized Integrated Pest Management Programs. *Annual Review of Entomology* 61: 43-62.

- Hass AL, Kormann UG, Tschardt T, Clough Y, Baillod AB, Sirami C, Fahrig L, Martin JL, Baudry J, Bertrand C, Bosch J, Brotons L, Burel F, Georges R, Giralt D, Marcos-Garcia MA, Ricarte A, Siriwardena G, Batary P (2018) Landscape configurational heterogeneity by small-scale agriculture, not crop diversity, maintains pollinators and plant reproduction in Western Europe. *Proceedings of the Royal Society - Biological Sciences* 285: 20172242
- Heidrich-Riske H (2004) Bericht zur Durchführung einer räumlichen Stichprobe für das Forschungs- und Entwicklungsvorhaben „Monitoring von Vogelarten in Deutschland“ des Bundesamtes für Naturschutz. Monitoringmodul I: Zustand der Normallandschaft. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden. 22 Seiten
- Heinrich-Böll-Stiftung (2020) Agrar-Atlas 2019 - Daten und Fakten zur EU-Landwirtschaft. Online im Internet: www.boell.de/de/agraratlas. 3. Auflage. (Zuletzt aufgerufen Oktober 2022)
- Helbig J, Paap M, Gummert A, Schlage B, Sellmann J, Strassemer J, Suhl F, Pramschüfer L, Stosius H, Herzer A, Eberhardt G, Kehlenbeck H (2021) Modell- und Demonstrationsvorhaben „Demonstrationsbetriebe integrierter Pflanzenschutz“. Abschlussbericht Teilprojekt „Koordination“, BMEL-Modell- und Demonstrationsvorhaben „Demonstrationsbetriebe integrierter Pflanzenschutz“ Teilprojekt „Koordination“ Förderkennzeichen: 2810MD001. 419 Seiten
- Hodgson JA, Kunin WE, Thomas CD, Benton TG, Gabriel D (2010) Comparing organic farming and land sparing: optimizing yield and butterfly populations at a landscape scale. *Ecology Letters* 13(11): 1358-1367
- Holland JM, Luff ML (2000) The effects of agricultural practices on Carabidae in temperate agroecosystems. *Integrated Pest Management Reviews* 2: 109-129
- Isermeyer F, Nieberg H, Banse M, Bolte A, Inken C, Dauber J, De Witte T, Dehler M, Döring R, Elsasser P, Fock H, Focken U, Freund F, Goti L, Heidecke C, Kempf A, Koch G, Kraus G, Krause A, Kroiher F, Lasner T, Lüdtke J, Olbrich A, Osterburg B, Pelikan J, Probst WN, Rahmann G, Reiser S, Rock J, Röder N, Rüter S, Sanders J, Stelzenmüller V, Zimmermann C (2020) Auswirkungen aktueller Politikstrategien (Green Deal, Farm-to-Fork, Biodiversitätsstrategie 2030; Aktionsprogramm Insektenschutz) auf Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei. Thünen Working Paper 156. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig
- Johannes A, Picon A, Alvarez-Gila A, Echazarra J, Rodriguez-Vaamonde S, Navajas A, Ortiz-Barredo A (2017) Automatic plant disease diagnosis using mobile capture devices, applied on a wheat use case. *Computers and Electronics in Agriculture* 138: 200-209
- Keller M, Gutjahr C, Mohring J, Weis M, Sokefeld M, Gerhards R (2014) Estimating economic thresholds for site-specific weed control using manual weed counts and sensor technology: an example based on three winter wheat trials. *Pest Management Science* 70: 200-211
- Khan ZR, Midega CAO, Bruce TJA, Hooper AM, Pickett JA (2010) Exploiting phytochemicals for developing a “push–pull” crop protection strategy for cereal farmers in Africa. *Journal of Experimental Botany* 61: 4185-4196
- Koalitionsvertrag (2021) Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. Koalitionsvertrag 2021 – 2025 zwischen der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), BÜNDNIS 90 / DIE GRÜNEN und den Freien Demokraten (FDP). Berlin
- Köninger J, Lugato E, Panagos P, Kochupillai M, Orgiazzi A, Briones MJJ (2021) Manure management and soil biodiversity: Towards more sustainable food systems in the EU. *Agricultural Systems* 194: 1-24
- Kormann U, Rösch V, Batáry P, Tschardt T, Orci K, Samu F, Scherber C, Kühn I (2015) Local and landscape management drive trait-mediated biodiversity of nine taxa on small grassland fragments. *Diversity and Distributions* 21(10): 1204-1217
- Kremen C (2020) Ecological intensification and diversification approaches to maintain biodiversity, ecosystem services and food production in a changing world. *Emerging Topics in Life Sciences* 4 (2): 229-240
- Lamichhane JR, Bischoff-Schaefer M, Bluemel S, Dachbrodt-Saaydeh S, Dreux L, Jansen JP, Kiss J, Köhl J, Kudsk P, Malausa T, Messéan A, Nicot PC, Ricci P, Thibierge J, Villeneuve F (2017) Identifying obstacles and ranking

common biological control research priorities for Europe to manage most economically important pests in arable, vegetable and perennial crops. *Pest Management Science*: 14-21

Le Provost G, Thiele J, Westphal C, Penone C, Allan E, Neyret M, Van der Plas F, Ayasse M, Bardgett RD, Birkhofer K, Boch S, Bonkowski M, Buscot F, Feldhaar H, Gaulton R, Goldmann K, Gossner M, Klaus VH, Kleinebecker T, Krauss J, Renner S, Scherreiks P, Sikorski J, Baulechner D, Blüthgen N, Bolliger R, Börschig C, Busch V, Chisté M, Fiore-Donno AM, Fischer M, Arndt H, Hoelzel N, John K, Jung K, Lange M, Marzini C, Overmann J, Pašalić E, Perović DJ, Prati D, Schäfer D, Schöning I, Schrumpf M, Sonnemann I, Steffan-Dewenter I, Tschapka M, Türke M, Vogt J, Wehner K, Weiner C, Weisser W, Wells K, Werner M, Wolters V, Wubet T, Wurst S, Zaitsev AS, Manning P (2021) Contrasting responses of above- and belowground diversity to multiple components of land-use intensity. *Nature Communications* 12: article number 3918

Lechenet M, Dessaint F, Py G, Makowski D, Munier-Jolain N (2017) Reducing pesticide use while preserving crop productivity and profitability on arable farms. *Nature Plants* 3: 17008

Lecuyer L, Alard D, Calla S, Coolsaet B, Fickel T, Heinsoo K, Henle K, Herzon I, Hodgson I, Quetier F, McCracken D, McMahon BJ, Melts I, Sands D, Skrimizea E, Watt A, White R, Young J (2021) Conflicts between agriculture and biodiversity conservation in Europe: Looking to the future by learning from the past. *Advances in Ecological Research*: 65: 3-56

LTZ - Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (2020) Die allgemeinen Grundsätze des integrierten Pflanzenschutzes - Hilfe zur Umsetzung und Dokumentation. Online im Internet: www.isip.de/isip/servlet/isip-de/regionales/nordrhein-westfalen/die-allgemeinen-grundsätze-des-integrierten-pflanzenschutzes-data.pdf. (Zuletzt aufgerufen November 2021)

LWK NRW - Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (2015) Ratgeber Pflanzenbau und Pflanzenschutz. Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen 1-672

LWK SH - Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein (2011) Pflanzenschutz-Warndienst für die Landwirtschaft Region Ost. Abteilung Pflanzenbau, Pflanzenschutz, Umwelt. Ausgabe 6, 05.05.2011.

Macías FA, Molinillo JMG, Varela RM, Galindo JCG (2007) Allelopathy - A natural alternative for weed control. *Pest Management Science* 63 (4): 327-348

Malézieux E, Crozat Y, Dupraz C, Laurans M, Makowski D, Ozier-Lafontaine H, Rapidel B, De Tourdonnet S, Valantin-Morison M (2009) Mixing plant species in cropping systems: Concepts, tools and models. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 29 (1): 43-62

Matyjaszczyk E (2018) "Biorationals" in integrated pest management strategies. *Journal of Plant Diseases and Protection* 125: 523-527

Meemken EM, Qaim M (2018) Organic Agriculture, Food Security, and the Environment. *Annual Review of Resource Economics*: 10: 39-63

Mitschke A, Sudfeldt C, Heidrich-Riske H, Dröschmeister R (2005) Das neue Brutvogelmonitoring in der Normallandschaft Deutschlands – Untersuchungsgebiete, Erfassungsmethode und erste Ergebnisse. *Vogelwelt* 126: 127-140

Möckel S, Gawel E, Liess M, Neumeister L (2021) Wirkung verschiedener Abgabekonzepte zur Reduktion des Pestizideinsatzes in Deutschland - eine Simulationsanalyse. Studie im Auftrag der GLS Bank und GLS Bank Stiftung. 136 Seiten

Muschelli J (2019) rscopus: Scopus Database API Interface. R package version 0.6.6. <https://CRAN.R-project.org/package=rscopus>.

Möhring N, Finger R (2022) Pesticide-free but not organic: Adoption of a large-scale wheat production standard in Switzerland. *Food Policy* 106: 102188

- Muller A, Schader C, El-Hage Scialabba N, Brüggemann J, Isensee A, Erb KH, Smith P, Klocke P, Leiber F, Stolze M, Niggli U (2017) Strategies for feeding the world more sustainably with organic agriculture. *Nature Communications* 8: 1290-1302
- NABU - Naturschutzbund Deutschland (2005) Integrierter Pflanzenschutz - Situation und Handlungsempfehlungen im Hinblick auf die biologische Vielfalt. Broschüre, Naturschutzbund Deutschland e.V., Berlin
- Neuville S, Le Ralec A, Outreman Y, Jaloux B (2016) The delay in arrival of the parasitoid *Diaeretiella rapae* influences the efficiency of cabbage aphid biological control. *BioControl* 61: 115e126
- Neve P, Busi R, Renton M, Vila-Auib MM (2014) Expanding the eco-evolutionary context of herbicide resistance research. *Pest Management Science* 70: 1385-1393
- Ottermanns R, Ratte HT, Roß-Nickoll M (2010) A procedure to detect masked effects on macrochore-specific species communities in grassy field margins using residual variance patterns. *Umweltwissenschaften und Schadstoffforschung* 22: 20-35
- Outhwaite CL, McCann P, Newbold T (2022) Agriculture and climate change are reshaping insect biodiversity worldwide. *Nature* 605: 97-102
- Owen MDK, Beckie HJ, Leeson JY, Norsworthy JK, Steckeld LE (2015) Integrated pest management and weed management in the United States and Canada. *Pest Management Science* 71(3): 357-376
- Pertot I, Giovannini O, Benanchi M, Caffi T, Rossi V, Mugnai L (2017) Combining biocontrol agents with different mechanisms of action in a strategy to control *Botrytis cinerea* on grapevine. *Crop Protection* 97: 85-93
- Pestizid Aktions-Netzwerk e.V., BUND, NABU Deutschland, Greenpeace e.V. (2012) Stellungnahme - Nationaler Aktionsplan zur nachhaltigen Anwendung von Pestiziden. Entwurf vom 27.09.2012
- Pflanzenschutzgesetz (PflSchG) (2012) Pflanzenschutzgesetz vom 6. Februar 2012. BGBl. I 148 Seiten, 1281
- Pollard E (1968) Hedges III. The effect of removal of the bottom flora of a hawthorn hedge on the Carabidae of the hedge bottom. *Journal of Applied Ecology* 5: 125-39
- Pretty J, Bharucha Z (2015) Integrated pest management for sustainable intensification of agriculture in Asia and Africa. *Insects* 6(1): 152-182
- Priestel G (1997) Integrierter Pflanzenbau. Heft Pflanzenschutz Kurier, Sonderausgabe, Bayer AG, Leverkusen (eds.)
- R Core Team (2021) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Ramsden MW, Kendal SL, Ellis SA, Berry PM (2017) A review of economic thresholds for invertebrate pests in UK arable crops. *Crop Protection* 96: 30-43
- Rand TA, Tylianakis JM, Tschardt T (2006) Spill-over edge effects: the dispersal of agriculturally subsidized insect natural enemies into adjacent natural habitats. *Ecology Letters* 9: 603e614
- Richard B, Qi A, Fitt BDL (2021) Control of crop diseases through Integrated Crop Management to deliver climate-smart farming systems for low- and high-input crop production. *Plant Pathology* 71(1): 187-206
- Rusch A, Bommarco R, Ekbohm B (2017) Conservation Biological Control in Agricultural Landscapes. *Advances in Botanical Research* 81: 333-360
- Samnegård U, Alins G, Boreux V, Bosch J, García D, Happe AK, Klein AM, Miñarro M, Mody K, Porcel M, Rodrigo A, Roquer-Beni L, Tasin M, Hambäck PA (2019) Management trade-offs on ecosystem services in apple orchards across Europe: Direct and indirect effects of organic production. *Journal of Applied Ecology*: 56(4): 802-811

Sánchez-Bayo F, Wyckhuys KAG (2019) Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers. *Biological Conservation* 232: 8-27

Schaefer M (2012) Wörterbuch der Ökologie. Springer, Heidelberg

Schäffer A, Filser J, Frische T, Gessner M, Köck W, Kratz W, Liess M, Nuppenau EA, Roß-Nickoll M, Schäfer R, Scheringer M (2018) Der stumme Frühling – Zur Notwendigkeit eines umweltverträglichen Pflanzenschutzes. Diskussion Nr. 16. Nationale Akademie der Wissenschaften - Leopoldina, Halle (Saale).

Schellhorn NA, Bianchi FJJA, Hsu CL (2014) Movement of entomophagous arthropods in agricultural landscapes: links to pest suppression. *Annual Reviews of Entomology* 59: 559e581

Schulze ED, Beck E, Buchmann N, Clemens S, Müller-Hohenstein K, Scherer-Lorenzen M (2019) *Plant Ecology*. Springer, Second Edition.

Seufert V, Ramankutty N, Foley JA (Comparing the yields of organic and conventional agriculture) 2012. *Nature* 485 (7397): 229-232

Sharifzadeh M, Abdollahzadeh G, Damalas C, Rezaei R (2018) Farmers' criteria for pesticide selection and use in the pest control process. *Agriculture (Switzerland)* 8: 2

Smith RF, Apple JL, Bottrell DG (1976) The Origins of Integrated Pest Management Concepts for Agricultural Crops. In: Apple JL, Smith RF (eds) *Integrated Pest Management*. Springer, Boston, MA.

Sotherton NW (1985) The distribution and abundance of predatory Coleoptera overwintering in field boundaries. *Annals of Applied Biology* 106: 17-21

SRU - Sachverständigenrat für Umweltfragen und Wissenschaftlicher Beirat für Biodiversität und Genetischen Ressourcenschutz (2018) Für einen flächenwirksamen Insektenschutz. Stellungnahme. 54 Seiten

Steinmann HH, De Mol F, Kakau J, Gerowitt B (2021) Was ist eine ökologische Schadensschwelle? *Gesunde Pflanzen* 73: 135-147

Stern VM, Smith RF, van den Bosch R, Hagen KS (1959) The integrated control concept. *Hilgardia* 29: 81-101

Tijssen M, Verwoerd L, Brinks H, Westerhof R (2018) Handelingsperspectieven voor geïntegreerde gewasbescherming. Eindrapportage GGDO, Leiden, ORG-ID bv

Tiktak A, Bleeker A, Boezeman D, Van Dam J, Van Eerd M, Franken R, Kruitwagen S, Den Uyl R (2019) A closer look at integrated pest management. Interim assessment of the policy document Healthy Growth, Sustainable Harvest. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague

Toschki A, Oellers J, Rumohr Q, Roß-Nickoll M, Daniels B, Schäffer A, Sybertz A (2021) Integriertes Monitoring in der Agrarlandschaft - Erfassung der ökologischen Auswirkungen des chemischen Pflanzenschutzes. UBA Texte Berlin, 136/2021. ISSN: 1862-4804, 114 Seiten

Trouvelot S, Bonneau L, Redecker D, van Tuinen D, Adrian M, Wipf D (2015) Arbuscular mycorrhiza symbiosis in viticulture: a review. *Agronomy for Sustainable Development* 35: 1449-1467

Tscharntke T, Grass I, Wanger TC, Westphal C, Batáry P. (2021) Beyond organic farming – harnessing biodiversity-friendly landscapes. *Trends in Ecology & Evolution* 36(10): 919-930

Tscharntke T, Karp DS, Chaplin-Kramer R; Batáry P, DeClerck F, Gratton C, Hunt L, Ives A, Jonsson M, Larsen A, Martin EA, Martínez-Salinas A, Meehan TD, O'Rourke M, Poveda K, Rosenheim JA, Rusch A, Schellhorn N, Wanger TC, Wratten S, Zhang W (2016) When natural habitat fails to enhance biological pest control – Five hypotheses. *Biological Conservation* 204 (Part B): 449 - 458

Tscharntke T, Klein AM, Kruess A, Steffan-Dewenter I, Thies C (2005) Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity - ecosystem service management. *Ecology Letters* 8(8): 857-874

- Tschumi M, Albrecht M, Entling MH, Jacot K (2015) High effectiveness of tailored flower strips in reducing pests and crop plant damage. *Proceedings of the Royal Society - Biological Sciences* 282: 20151369
- Van Klink R, Bowler DE, Gongalsky KB, Swengel AB, Gentile A, Chase JM (2020) Meta-analysis reveals declines in terrestrial but increases in freshwater insect abundances. *Science* 368: 417-420
- Van Lenteren J (2000) A greenhouse without pesticides: Fact or fantasy? *Crop Protection* 1(6): 375-384
- Vereinte Nationen (1992) Agenda 21, Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung, Kapitel 14: Förderung einer nachhaltigen Landwirtschaft und ländlichen Entwicklung. Rio de Janeiro
- Wohlin C (2014) Guidelines for snowballing in systematic literature studies and a replication in software engineering. *EASE '14: Proceedings of the 18th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering*. Article No.: 38: 10 Seiten
- Wuest SE, Peter R, Niklaus PA (2021) Ecological and evolutionary approaches to improving crop variety mixtures. *Nature Ecology & Evolution* 5 (8): 1068-1077
- Zehnder G, Gurr GM, Kühne S, Wade MR, Wratten SD, Wyss E (2007) Arthropod pest management in organic crops. *Annual Review of Entomology* 5: 57-80
- Ziółkowska E, Topping CJ, Bednarska AJ, Laskowski R (2021) Supporting non-target arthropods in agroecosystems: Modelling effects of insecticides and landscape structure on carabids in agricultural landscapes. *Science of the Total Environment* 774: 145746
- ZKL - Zukunftskommission Landwirtschaft (2021) Zukunft Landwirtschaft. Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe - Empfehlungen der Zukunftskommission Landwirtschaft. Online im Internet: https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/abschlussbericht-zukunftskommission-landwirtschaft.pdf?__blob=publicationFile&v=16. (Zuletzt aufgerufen Oktober 2022)

6 Anhang

Die Gesamt-Ergebnislisten der Schneeballsuche und der systematischen Suche sowie die Auflistung der *Bewertungs-Scores* liegen dem Umweltbundesamt in Excel-Tabellen vor.