

<https://doi.org/10.1007/s10357-023-4282-y>

# Zukunftsfähige Agrarlandschaften in Deutschland – praktische Maßnahmen und ihre Wirksamkeit im Vergleich\*

Stefan Möckel, Marieke Cornelia Baaken, Bartosz Bartkowski, Michael Beckmann,  
Michael Strauch, Jessica Stubenrauch, Martin Volk, Felix Witing und André Wolf

© Der/die Autor(en) 2024. Dieser Artikel ist eine Open-Access-Publikation.

Mit monatelangen Dürrephasen, Hitzesommern und Hochwasserereignissen ist die globale Klimaerwärmung auch in Deutschland in den letzten Jahren verstärkt in Erscheinung getreten. Im 2021 novellierten Klimaschutzgesetz wird daher eine Klimaneutralität bis 2045 angestrebt. Gleichzeitig sind in Agrarlandschaften trotz entsprechender europarechtlicher Verpflichtungen günstige Erhaltungszustände bei Habitaten, Arten und Gewässer weiterhin die Ausnahme. Im nachfolgenden Beitrag schätzen wir für verschiedene landschaftsgestaltende oder produktionsintegrierte Maßnahmen die potenziellen Wirkungen hinsichtlich Klimaschutz und -anpassung, günstiger Erhaltungszustände sowie für die langfristige Versorgungssicherheit und die Profitabilität von Landnutzungen ab. Anhand dieser Wirksamkeitsabschätzungen identifizieren wir anschließend prioritär zu ergreifende Maßnahmen. Die vergleichende Wirksamkeitsabschätzung soll helfen, in Anbetracht begrenzter finanzieller und personeller Ressourcen die geeignetsten Maßnahmen vorrangig zu ergreifen.

## 1. Einleitung

Der Klimawandel hat in Mitteleuropa im Jahr 2022 den Trend der vergangenen Jahre fortgesetzt und in weiten Teilen Deutschlands erneut zu längeren Dürreperioden geführt. Die Niederschlagsdefizite der letzten 5 Jahre haben sich insgesamt weiter erhöht, was in den Wäldern und Gewässern die Probleme (u. a. Baum- und Fischsterben) verschärfte und auch in der Landwirtschaft teilweise erhebliche Ertragseinbußen bewirkte.<sup>1</sup> Das Wetter scheint sich in Mitteleuropa schneller zu ändern als in den Klimaprojektionen bisher angenommen.<sup>2</sup> Auch die Durchschnittstemperaturen lagen in den letzten Jahren in Europa schon über der globalen 2 °C Grenze.<sup>3</sup> Entsprechend hoch ist der Handlungsdruck sowohl beim Klimaschutz als auch bei der Klimaanpassung. Agrarlandschaften besitzen eine hervorgehobene Bedeutung in beiden Handlungsfeldern, da sie weite Teile Deutschlands prägen sowie unter besonderem Anpassungsdruck stehen<sup>4</sup> und erhebliche Potenziale zum Klimaschutz bieten.<sup>5</sup>

Im vorangehenden Aufsatz „Zukunftsfähige Agrarlandschaften in Deutschland“ haben wir für Deutschland Ziele und Anforderungen aus ökologischer, ökonomischer und rechtlicher Sicht an landwirtschaftlich dominierte Landschaften zusammengetragen.<sup>6</sup> Zukunftsfähig sind Agrarlandschaften nach unserem Nachhaltigkeitsverständnis, wenn in ihnen dauerhaft landwirtschaftliche sowie andere Landnutzungen möglich sind und gleichzeitig die Leistungsfähigkeit der Ökosysteme sowie die Qualität als Lebensraum erhalten bleiben bzw. – sofern degradiert – wiederhergestellt werden. Der Sachverständigenrat für Umweltfragen bezeichnet dies als dauerhaft-umweltgerecht.<sup>7</sup> Bisher erfolgte in Deutschland in den meisten Agrarlandschaften aufgrund ökonomischer und sozialer Zielsetzungen und Rahmenbe-

dingungen eine Intensivierung der anthropogenen Landnutzungen (insbesondere der Agrarproduktion sowie von Siedlung und Verkehr) unter Inkaufnahme einer zunehmenden Degradierung der Ökosystemfunktionen und Verdrängung wildlebender Pflanzen und Tiere.<sup>8</sup> Dies widerspricht nicht nur den internationalen ‚Sustainable Development Goals‘ und nationalen Nachhaltigkeitszielen,<sup>9</sup> sondern auch bestehenden rechtlichen Vorgaben des internationalen und europäischen Rechts sowie Art. 20a Grundgesetz, die Deutschland zum Schutz der natürlichen Lebensgrundlagen und zur Wiederherstellung guter ökologischer Zustände bei Habitaten, Arten und Gewässern verpflichten.<sup>10</sup>

### \* Förderhinweis

Der vorliegende Beitrag ist Teil eines UFZ-Forschungsvorhabens zu nachhaltigen Agrarlandschaften in Deutschland welches mitfinanziert wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Förderinitiative „Boden als nachhaltige Ressource für die Bioökonomie – BonaRes“ (Förderkennzeichen 031B0511A) und der Nachwuchsgruppe „AgriScape – Zielkonflikte auf dem Weg zu multifunktionalen Agrarlandschaften“ (Förderkennzeichen 01UU2203) sowie durch die vom EU-Rahmenprogramm Horizon 2020 für Forschung und Innovation geförderten Projekte OPTAIN (Grant Agreement 862756) und BESTMAP (Grant Agreement 817501).

- 1) Siehe UFZ, Dürremonitor Deutschland, <https://www.ufz.de/index.php?de=37937> 2023; UBA, Niedrigwasser, Dürre und Grundwasserneubildung, Dessau 2021; Schulte u. a., Fischsterben in der Oder, 2022; BMEL, Erntebericht 2022 – Mengen und Preise, 2022; BMEL, Ergebnisse der Waldzustandserhebung 2021, 2022.
- 2) Vgl. die Übersichts- zu den Projektionen und Unsicherheitsfaktoren in Möckel u. a., Zukunftsfähige Agrarlandschaften in Deutschland – Ziele und Anforderungen aus ökologischer, ökonomischer und rechtlicher Sicht, NuR 2022, 611–621, <https://doi.org/10.1007/s10357-022-4073-x>.
- 3) Copernicus Climate Change Service, European State of the Climate 2022, 2023; FAO, Temperature change by region, <http://doi.org/10.4060/cb4477en-fig68> 2021.
- 4) Renner u. a., Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland – Teilbericht 2: Risiken und Anpassung im Cluster Land, 2021; Seppelt u. a., in: Wiegandt, 3 Grad mehr, 2022, S. 55 ff.
- 5) BMUV, Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz – Kabinettsbeschluss vom 29. März 2023; Bundesregierung, Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050, 2019.
- 6) Möckel u. a. 2022 (Fn. 2).
- 7) SRU, Umweltgutachten 1994 des Rates von Sachverständigen für Umweltfragen, Bundestag-Drucksache 12/6995, S. 45 ff.
- 8) Dies anerkennend u. a. ZKL, Zukunft Landwirtschaft. Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe – Empfehlungen der Zukunftskommission Landwirtschaft, 2021; BMEL, Ackerbaustrategie 2035 – Perspektiven für einen produktiven und vielfältigen Pflanzenbau, 2021; Industrieverband Agrar e. V., Diskussionspapier: Konzept für Biodiversitätsförderung in der ackerbaulich genutzten Agrarlandschaft, 2022.
- 9) Vgl. UN, Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development – Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015; Bundesregierung, Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie – Weiterentwicklung 2021.
- 10) Im Einzelnen siehe Tabelle 2 in Möckel u. a. 2022 (Fn. 2, S. 618 ff.) und die im Trilog-Verfahren am 17. 11. 2023 vereinbarte zukünftige europäische Verordnung zur Wiederherstellung der Natur.

Stefan Möckel<sup>a</sup> (korrespondierender Autor), Marieke Cornelia Baaken<sup>b</sup>, Bartosz Bartkowski<sup>a</sup>, Michael Beckmann<sup>a</sup>, Michael Strauch<sup>a</sup>, Jessica Stubenrauch<sup>a</sup>, Martin Volk<sup>a</sup>, Felix Witing<sup>a</sup> und André Wolf<sup>a</sup>

a: Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Leipzig, Deutschland

b: Fachbereich Wirtschaftswissenschaften, Institut für Umweltsystemwissenschaft, Universität Osnabrück, Osnabrück, Deutschland

Gute ökologische Zustände sind Voraussetzung für viele Ökosystemleistungen, die unsere Gesellschaft kostenlos nutzt. Hinzu kommt, dass die Vulnerabilität von Agrarlandschaften gegenüber klimatischen Veränderungen und Extremereignissen umso größer ist, je gestörter, übernutzter oder verarmter Böden, Gewässer und Habitate sind.<sup>11</sup> Umgekehrt lassen sich die Auswirkungen des Klimawandels abmildern, wenn in Agrarlandschaften die vorhandenen Umweltprobleme soweit wie möglich minimiert werden und Agrarlandschaften mittelfristig klimaneutral und langfristig möglichst CO<sub>2</sub>-Senken werden.<sup>12</sup>

Dynamische Veränderungen für Agrarlandschaften entstehen nicht nur aufgrund des Klimawandels, sondern auch durch Populationsveränderungen bei wildlebenden Arten, die Einwanderung nichtheimischer Arten sowie gesellschaftliche Veränderungen wie u. a. bei den rechtlichen Rahmenbedingungen, der wirtschaftlichen Marktlage, den Konsummustern oder beim Freizeitverhalten der Bevölkerung. Klimaangepasste und dauerhaft-umweltgerechte Agrarlandschaften müssen daher eine hohe Resilienz, Toleranz und Flexibilität gegenüber kurzfristigen Störungen und langfristigen Veränderungen aufweisen, die trotz modernster Computermodelle bezüglich Art, Ausmaß und Zeitpunkt ungewiss bleiben. Maßnahmen zur Beförderung derartiger Agrarlandschaften sind Maßnahmen der Risikoversorge im Sinne des Vorsorgeprinzips.<sup>13</sup>

Im nachfolgenden Beitrag stellen wir eine Auswahl an Maßnahmen zur Förderung klimaangepasster, dauerhaft-umweltgerechter Agrarlandschaften vor und bewerten diese hinsichtlich folgender Ziele:

- Erhöhung der Resilienz gegenüber durch Klimawandel verstärkten Extremwetterereignissen (u. a. Starkregen, Hochwasser, Stürme, Hitze und Dürre, Spätfröste);
- Klimaneutralität der Agrarlandschaften;
- gute ökologische Erhaltungszustände bei Gewässern, Habitaten und Arten;
- langfristige Versorgungssicherheit für Nahrungsmittel, Trinkwasser und Biomasse sowie
- langfristige ökonomische Profitabilität und Einkommenssicherung.

Die Auswahl der obigen Ziele beruht auf einer Priorisierung durch das Autorenteam anhand der im vorangehenden Aufsatz herausgearbeiteten Ziele und Verpflichtungen aus ökologischer, rechtlicher und ökonomischer Sicht.<sup>14</sup> Die Ziele bilden nach unserer Ansicht die wichtigsten gesellschaftlichen Interessen bei Agrarlandschaften ab und integrieren eine Vielzahl von spezifischeren Zielen, wie z. B. die Erhaltung bzw. Wiederherstellung der Wasseraufnahmefähigkeit und des Wasserspeichervermögens von Böden, die Schaffung von Retentionsflächen oder die Reduzierung von Nähr- und Schadstoffeinträgen zum Schutz von Ökosystemen.<sup>15</sup> Zwischen den 5 Zielen bestehen Wechselbeziehungen, weshalb es teilweise auch zu Überschneidungen kommt.

Die Abschnitte 2 und 3 dieses Aufsatzes sollen politischen Entscheidungsträgern sowie Landeigentümern und -nutzern einen Überblick über verschiedene Maßnahmen mit positiven Effekten für möglichst viele der 5 genannten Ziele geben sowie mögliche Konflikte zu bestimmten Zielen aufzeigen und diskutieren.

## 2. Maßnahmen zur Förderung klimaangepasster und dauerhaft-umweltgerechter Agrarlandschaften

Die Tabellen 1 bis 3 umfassen eine Auswahl an Maßnahmen. Wir haben zur besseren Übersichtlichkeit bei den Tabellen zwischen landschaftsgestaltenden Maßnahmen und produktionsintegrierten Maßnahmen der land- und forstwirtschaftlichen Bewirtschaftung differenziert. Der Übergang zwischen beiden Kategorien ist fließend, da landschaftsgestaltende Maßnahmen die Art und Weise der land- und forstwirtschaftlichen Bodennutzung verändern und umgekehrt die Art und Weise der Bewirtschaftung

das Landschaftsbild prägen sowie die Ökosysteme in einer Landschaft direkt oder mittelbar beeinflussen (u. a. stofflich, hydrologisch, klimatisch).

Wir haben die beiden Maßnahmengruppen danach abgegrenzt, inwieweit es sich im Sinne der Rechtsprechung des Bundesverwaltungsgericht zu § 14 Abs. 2 BNatSchG um Maßnahmen der „täglichen Wirtschaftsweise“ innerhalb einer bestimmten land- und forstwirtschaftlichen Bodennutzung handelt (dann produktionsintegriert) oder Maßnahmen eine Änderung der Nutzungsart zur Folge haben (dann landschaftsgestaltend).<sup>16</sup> Nicht alltägliche Wirtschaftsweisen sind dabei auch Maßnahmen der Melioration sowie Änderungen am Wasserregime bei Flächen (z. B. Anlegen von Terrassen und Gräben, Rückbau von Entwässerungsgräben oder Drainagen).

Für die Auswahl der Maßnahmen und die Bewertung wurden verschiedene Studien herangezogen.<sup>17</sup> Diese wurden, insbesondere im Falle der ökonomischen Profitabilität, wo die Evidenz größtenteils punktuell und unsystematisch vorliegt, durch das Expertenwissen im Autorenteam ergänzt. Die ökonomische Bewertung ist betriebswirtschaftlich und nicht volkswirtschaftlich. Hierbei wurden vorhandene oder zukünftige staatliche Subventionen (z. B. Direktzahlungen oder Förderungen der zweiten Säule der Gemeinsamen Agrarpolitik) aus zwei Gründen nicht berücksichtigt. Zum einen verfälschen diese die betriebswirtschaftliche Bewertung. Zum anderen wird erst aufgrund der Nichtberücksichtigung ein möglicher Förderbedarf bei z. B. Umstellungskosten oder höheren Bewirtschaftungskosten erkennbar.

Die betrachteten Maßnahmen sind nicht neu, sondern werden schon länger wissenschaftlich erforscht und in der Praxis in unterschiedlichem Umfang angewandt. Gleichwohl bewegen sich unsere Bewertungen auf einem hohen Abstraktionsniveau. Zum einen, da vorhandene Feldstudien weder alle Maßnahmen noch alle Landschaftstypen in Deutschland und nur teilweise die Effekte hinsichtlich der von uns ausgewählten Ziele untersuchten. Zum anderen, da die betrachteten Maßnahmen in unterschiedlicher Art und Weise sowie Umfang ausführbar sind und sie darüber hinaus auch in den spezifischen Landschaften je nach standörtlichen Gegebenheiten unterschiedliche Wirkun-

11) Vgl. *Kahlenborn u. a.*, Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland – Kurzfassung, 2021, S. 42, 47, 50, 69.

12) Vgl. den Überblick über die Herausforderungen von Agrarlandschaften in *Möckel u. a.* (Fn. 2, S. 612f.).

13) Vgl. Art. 191 Abs. 2 AEUV; *Köck/Hansjürgens*, Das Vorsorgeprinzip – Refine it or replace it?, *GAIA* 2002, 42.

14) Siehe Tabelle 2 in *Möckel u. a.* 2022, (Fn. 2, S. 618ff.).

15) Ziele 3g und 6b in der Tabelle 2 in *Möckel u. a.* 2022, (Fn. 2, S. 619).

16) Vgl. BVerwG, Beschl. v. 4. 6. 2003 – 4 BN 27.03; Beschl. v. 26. 2. 1992 – 4 B 38/92, NuR 1992, 328f.; Beschl. v. 14. 4. 1988 – 4 B 55/88, NuR 1989, 84f.; Beschl. v. 29. 11. 1985 – 4 B 213.85, NuR 1986, 251–251; Urt. v. 13. 4. 1983, – 4 C 76.80, BVerwGE 67, 93, 94.

17) Hervorzuheben ist insbesondere die umfangreiche Literaturauswertung von *Baaken*, Sustainability of agricultural practices in Germany: a literature review along multiple environmental domains, *Regional Environmental Change* 2022, <https://doi.org/10.1007/s10113-022-01892-5> sowie *WBAEV/WBW*, Klimaschutz in der Land- und Forstwirtschaft sowie den nachgelagerten Bereichen Ernährung und Holzverwendung, 2016; *Ledère u. a.*, Bending the curve of terrestrial biodiversity needs an integrated strategy, *Nature* 2020, 1, <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2705-y>; *Hennenberg/Böttcher*, Biomasse und Klimaschutz, 2023; *Wiegandt*, 3 Grad mehr, 2022; Leopoldina, acatech und Akademienunion, Biodiversität und Management von Agrarlandschaften, 2020; *Wirz/Kasperczyk/Thomas*, Kursbuch Agrarwende 2050 – Ökologisierte Landwirtschaft in Deutschland, 2017; *Spietmann/Franck*, Anpassung an den Klimawandel in der räumlichen Planung, 2014; *Palomo-Campesino/González/García-Llorente*, Exploring the Connections between Agroecological Practices and Ecosystem Services: A Systematic Literature Review, *Sustainability* 2018, 4339, <https://doi.org/10.3390/su10124339>.

**Tabelle 1** Landschaftsbezogene Maßnahmen<sup>18</sup>

Maßnahmen	Ziele Erhöhung der Resilienz gegenüber Extremwetterereignissen (Klimaanpassung)	Klimaneutrale Agrarlandschaften	Versorgungssicherheit für Nahrungsmittel, Trinkwasser und Biomasse für energetische und stoffliche Nutzung	Gute ökologische Erhaltungszustände bei Gewässern, Habitaten und Arten	Ökonomische Profitabilität und Einkommenssicherung
<b>Nutzungsänderungen</b>					
<b>Etablierung von extensiven Agroforstsystemen auf Dauergrünland mit Obst-, Nussbäumen, Eichen, Ess-/Roskastanien, Weiden u. a.</b> (z. B. klassische Streuobstwiesen, Hute-Eichen-Wiesen)	(+ bis ++) gegenüber Dürren und Hitze aufgrund Beschattung und Reduzierung der Windgeschwindigkeit	(+) kurz- bis mittelfristige CO <sub>2</sub> -Bindung in mehrjährigen Pflanzen (+) Erhöhung der Kohlenstoffgehalte im Boden durch Baumwurzeln	(+ bis ++) Steigerung der Nahrungsmittelproduktion durch Früchte der Bäume und besserer Wasserverfügbarkeit für das Dauergrünland (+) Steigerung der Biomasseproduktion (+) Holzproduktion	(+ bis ++) Erweiterung der Habitatvielfalt je nach Standort und Art der Gehölze (-) Verschlechterung bei Grünlandhabitaten, die auf möglichst geringe Beschattung angewiesen sind	(-) kurzfristig: Investitionskosten für Pflanzung (+/- bis +) höhere Einnahmen aufgrund Nutzungsdiversifizierung und Klimaanpassung, trotz höherer Bewirtschaftungskosten
<b>Etablierung von Agroforstsystemen auf Acker mit Kurzumtriebs- oder Wertholzreihen oder Obst-, Kastanien- oder Nussplantagenreihen</b>	(+ bis ++) gegenüber Dürren, Frost, Hitze, Starkregen und Erosionsereignissen aufgrund Beschattung, Reduzierung der Windgeschwindigkeit sowie höherem Wasser- und Sedimentrückhalt bei dauerhaft begrünten Gehölzreihen	(+ bis ++) Erhöhung der Kohlenstoffgehalte im Boden im Bereich der Gehölzreihen (+ bis ++) mittel- bis langfristige CO <sub>2</sub> -Bindung in mehrjährigen Pflanzen	(+ bis ++) Risikominderung bezüglich Häufigkeit und Umfang von Ertragsausfällen aufgrund Klimaanpassung, Nutzungsdiversifizierung und erhöhtem Potenzial natürlicher Schädlingskontrolle (- bis +) Biomasseproduktion (+) Holzproduktion (- bis +/-) Verringerung der Nahrungsmittelerzeugung aufgrund Verlust an Ackerflächen im Bereich der Gehölzreihen, sofern kein Ausgleich aufgrund Obst- und Nussproduktion sowie Klimaanpassung	(+ bis ++) Erweiterung der Habitatvielfalt und Biotopeverbindungen je nach Art des Agroforstsystems (+) geringere Boden- und Schadstoffeinträge in angrenzende Gewässer und Habitats aufgrund Wasserrückhalt und Reduzierung der Windgeschwindigkeit	(-) kurzfristig: Investitionskosten für Pflanzung und Umstellung (- bis +) langfristig: bessere Ertragsicherung aufgrund Klimaanpassung, Nutzungsdiversifizierung und höherer Biodiversität, aber Verlust an Ackerfläche sowie höhere Bewirtschaftungskosten

Fortgesetzt auf der nächsten Seite.

gen entfalten. Die Bewertungen sind daher als Trends und Entwicklungslinien für die durchschnittlichen Effekte der Maßnahmen zu verstehen, die nach unserem Erkenntnisstand als plausibel anzusehen sind.

Bei der Bewertung der potenziellen Wirkungen haben wir folgende fünfteilige Bewertungsskala zu Grund gelegt:

- (++) Maßnahme fördert wesentlich das Ziel
- (+) Maßnahme wirkt sich überwiegend positiv auf das Ziel aus
- (+/-) Maßnahme verhält sich insgesamt neutral, d. h. sie entfaltet keine wesentlichen Auswirkungen auf das Ziel oder positive und negative Wirkungen gleichen sich annähernd aus
- (-) Maßnahme wirkt sich überwiegend negativ auf das Ziel aus
- (--) Maßnahme behindert wesentlich das Ziel

Die Bewertung ist relativ, da ihr die positiven oder negativen Zielabweichungen von einem Referenzzustand zu Grunde liegt. Der angenommen Referenzzustand orientiert sich am derzeit überwiegenden Zustand in hiesigen Agrarlandschaften. Bei den landschaftsbezogenen Maßnahmen ist

dies ein Landschaftsbild mit großen Schlägen, wenigen Landschaftselementen, meliorierten und entwässerten Flächen sowie weitgehend auf schellen, flächensparenden Wasserabfluss getrimmten Fließgewässern. Bei produktionsintegrierten Maßnahmen sind wir als Referenz von einer konventionellen Landwirtschaft mit reduzierten Fruchtfolgen ohne Zwischenfruchtanbau und Mischkulturen sowie einem auf hohen Erträgen ausgerichteten Einsatz von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln ausgegangen. Bei der Forstwirtschaft sind Reinkulturen aus Fichten, Kiefern oder Buchen die Referenzgröße. Die Annahme dieser stark vereinfachten Referenzzustände ist für die Vergleichbarkeit unumgänglich, auch wenn sie die heute schon in vielen Landschaften existierende Diversität der Landnutzungen und Bewirtschaftungsformen nicht abbildet (z. B. kleinstrukturierte Landschaftsanteile, Mischwälder). Anhand der Tabellen 1 bis 3 lassen sich daher auch gegenwärtige Landschaften danach bewerten, inwieweit sie die ausgewählten landschaftsbezogenen oder produktionsintegrierten Maßnahmen bereits aufweisen und insofern schon besser an die Klimaveränderungen angepasst und dauerhaft-umweltgerecht gestaltet sind.

18) Vgl. u. a. *Staton u. a.*, Evaluating the effects of integrating trees into temperate arable systems on pest control and pollination, *Agricultural Systems* 2019, 102676, <https://doi.org/10.1016/j.agry.2019.102676>; *Garibaldi u. a.*, Working landscapes need at least 20% native habitat, *Conservation Letters* 2021, e12773, <https://doi.org/10.1111/conl.12773>; *Veldkamp u. a.*, Multifunctionality of temperate alley-cropping agroforestry outperforms open cropland and grassland, *Communications Earth & Environment* 2023, <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00680-1>; *Martin u. a.*, The interplay of landscape composition and configuration: new pathways to manage functional biodiversity and agroecosystem services across Europe, *Ecology Letters* 2019, 1083, <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/ele.13265>; *Pörtner u. a.*, Overcoming the coupled climate and biodiversity crises and their societal impacts, *Science* 2023, eabl4881, <https://doi.org/10.1126/science.abl4881>; *Spiecker/Konold/Mastel*, Multifunktionale Bewertung von Agroforstsystemen, 2010; *Spiecker u. a.*, Neue Optionen für eine nachhaltige Landnutzung, 2009; *Torralba u. a.*, Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis, *Agriculture, Ecosystems & Environment* 2016, 150, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.002>; *Tanneberger u. a.*, Towards net zero CO<sub>2</sub> in 2050: An emission reduction pathway for organic soils in Germany, *Mires and Peat* 2021, 1, <https://doi.org/10.19189/MaP.2020.SNPG.StA.1951>; *Beisecker u. a.*, Veränderungen der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse, 2020; *Tscharntke u. a.*, Beyond organic farming; harnessing biodiversity-friendly landscapes, *Trends in Ecology & Evolution* 2021, 919, <https://doi.org/10.1016/j.tree.2021.06.010>; *Korell u. a.*, Responses of plant diversity to precipitation change are strongest at local spatial scales and in drylands, *Nature Communications* 2021, 2489, <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22766-0>; *Ökologie&Landbau*, Schwerpunkt Grüne Energie, Ausgabe 2/02023.

Tabelle 1 Fortgesetzt.

Maßnahmen	Ziele Erhöhung der Resilienz gegenüber Extremwetterereignissen (Klimaanpassung)	Klimaneutrale Agrarlandschaften	Versorgungssicherheit für Nahrungsmittel, Trinkwasser und Biomasse für energetische und stoffliche Nutzung	Gute ökologische Erhaltungszustände bei Gewässern, Habitaten und Arten	Ökonomische Profitabilität und Einkommenssicherung
<b>Umwandlung von Acker in Wald mit Mischbeständen</b>	(++) gegenüber Dürren, Frost, Starkregen und Erosionsereignissen aufgrund Beschattung, Reduzierung der Windgeschwindigkeit sowie höherem Wasser- und Sedimentrückhalt und insgesamt ausgeglicheneren Mikroklimas im Wald	(++) mittel- bis langfristig CO <sub>2</sub> -Bindung im Holz möglich, bei baulicher Verwendung (++) Erhöhung der Kohlenstoffgehalte im Boden (+) Wegfall der Lachgasemissionen aus Düngung	(++) Festholzproduktion (++) Verbesserung der Wasserqualität (je nach Intensität der bisherigen Ackerbewirtschaftung) (--) Verringerung der Nahrungsmittelerzeugung aufgrund Verlust an Ackerflächen (--) bis +/- Verringerung der Biomasseproduktion, da mit Ackerkulturen oder KUP höhere Biomasserträge pro Jahr als mit Wald möglich	(+ bis ++) Erweiterung der Habitatvielfalt innerhalb agrarisch geprägter Räume (++) geringere Boden- und Schadstoffeinträge in angrenzende Gewässer und Habitats	(-) kurz- und mittelfristig: Investitionskosten für Pflanzung sowie weitgehender Einnahmefall bis zur Hiebperiode (- bis +/-) langfristig: geringere Profite je nach Holzpreisen und sonstigen Vergütungen (-) höhere potenzielle Schadenshöhe von Wald gegenüber Ackerkulturen bei Stürmen, Bränden, Krankheits- und Schädlingsbefall
<b>Umwandlung von Acker in Dauergrünland</b>	(++) gegenüber Stürmen, Starkregen und Dürren aufgrund ganzjährigem Bewuchs mit teilweise tiefwurzelnden Pflanzen bzw. trockenheitsresistenten Gräsern	(+ bis ++) Erhöhung der Kohlenstoffgehalte im Boden	(+ bis ++) Verbesserung der Wasserqualität (je nach Intensität der bisherigen Ackerbewirtschaftung und der zukünftigen Grünlandbewirtschaftung) (-) Verringerung der Nahrungsmittelerzeugung, da nur Futtermittelproduktion/Beweidung möglich	(+ bis ++) Erweiterung der Habitatvielfalt je nach Intensität und Art der Dauergrünlandbewirtschaftung (++) geringere Boden- und Schadstoffeinträge in angrenzende Gewässer und Habitats	(- bis --) geringere Profitabilität
<b>Umwandlung von Dauergrünland in Wald mit Mischbeständen</b>	(+/- bis +) gegenüber Dürren, Frost und Starkregen aufgrund Beschattung, Reduzierung der Windgeschwindigkeit sowie insgesamt ausgeglicheneren Mikroklimas (-) höhere Vulnerabilität bei ungünstiger Grundwasserverfügbarkeit für Wald	(++) mittel- bis langfristig CO <sub>2</sub> -Bindung im Holz (+/- bis +) Erhöhung der Kohlenstoffgehalte im Boden	(+/- bis +) Steigerung der Biomasseproduktion (++) Festholzproduktion (++) Verbesserung der Wasserqualität (je nach Intensität der bisherigen Grünlandbewirtschaftung) (-) Verringerung der Nahrungsmittelerzeugung	(++) Förderung von Waldhabitaten und Arten (--) Rückgang bei Offenlandarten aufgrund Habitatverluste (+/-) Gewässer	(-) kurz- und mittelfristig: Investitionskosten für Pflanzung sowie weitgehender Einnahmefall bis zur Hiebperiode (+/- bis +) langfristig: voraussichtlich höhere Profite je nach Holzpreisen und Vergütung (- bis --) höhere potenzielle Schadenshöhe von Wald bei Stürmen, Bränden, Krankheits- und Schädlingsbefall
<b>Umwandlung von Wald mit Reinbeständen in Agroforstsysteme mit Dauergrünland</b>	(- bis +) höhere Vulnerabilitäten gegenüber Dürren und Hitze, sofern nicht hohe Vulnerabilität bei der Waldnutzung aufgrund ungünstiger Grundwasserverfügbarkeit	(-) geringere Kohlenstoffspeicherung im Boden (--) bei Nutzung der entfernten Bäume als Brennstoff, statt Baustoff	(+) Erhöhung der Nahrungsmittelerzeugung über Tierhaltung, Obst-, Nuss-, Kastanienkulturen (+/- bis -) gegebenenfalls Verschlechterung der Wasserqualität (je nach Intensität) (- bis +) Biomasseproduktion (- bis --) Verringerung Festholzproduktion	(++) Förderung von Offenlandarten (--) Rückgang Waldarten	(++) kurzfristig: hohe Erträge aus Holzverkauf (+) langfristig: Nutzungsdiversifizierung ermöglicht höhere und v.a. kurzfristigere Erträge und verringert ökonomische Risiken (++) geringere potenzielle Schadenshöhen bei Stürmen, Bränden, Krankheits- und Schädlingsbefall
<b>Umwandlung von Wald mit Reinbeständen in Agroforstsysteme auf Acker</b>	(- bis --) höhere Vulnerabilitäten gegenüber Dürren, Hitze, Starkregenereignissen und Hochwasser, sofern nicht hohe Vulnerabilität bei der Waldnutzung aufgrund ungünstiger Grundwasserverfügbarkeit	(--) starke Verringerung der Kohlenstoffgehalte im Boden (--) bei Nutzung der entfernten Bäume als Brennstoff, statt Baustoff	(+ bis ++) Erhöhung der Nahrungsmittelerzeugung (- bis --) Verschlechterung der Wasserqualität bei Acker-Forstsystemen (+/- bis +) Steigerung der Biomasseproduktion (- bis --) Verringerung der Festholzproduktion	(+) Förderung von Offenlandarten je nach Art (--) Rückgang Waldarten	(++) kurzfristig: hohe Erträge aus Holzverkauf (++) langfristig: Nutzungsdiversifizierung ermöglicht höhere und v.a. kurzfristigere Erträge und verringert ökonomische Risiken (+) geringere potenzielle Schadenshöhen bei Stürmen, Bränden, Krankheits- und Schädlingsbefall

Fortgesetzt auf der nächsten Seite.

Tabelle 1 Fortgesetzt.

Maßnahmen	Ziele Erhöhung der Resilienz gegenüber Extremwetterereignissen (Klimaanpassung)	Klimaneutrale Agrarlandschaften	Versorgungssicherheit für Nahrungsmittel, Trinkwasser und Biomasse für energetische und stoffliche Nutzung	Gute ökologische Erhaltungszustände bei Gewässern, Habitaten und Arten	Ökonomische Profitabilität und Einkommenssicherung
<b>Einbringung von Landschaftselementen</b>					
<b>Anlegen von Hecken oder Baumreihen an Feldrändern oder in Schlägen</b>	ähnliche Wirkungen wie Agroforstsysteme bei Acker bzw. Grünland, allerdings umso geringer je größer die Abstände zwischen den Hecken				
<b>Morphologische Diversifizierungsmaßnahmen (Anlegen von Terrassen, Wällen, Gräben, Rückhaltebecken, Teichen ...)</b>	(++) gegenüber Starkregen, Hochwasser Erosionsereignissen und Dürren aufgrund Verlangsamung des Abflusses von Oberflächenwasser sowie höherem Wasser- und Sedimentrückhalt	(+) Humusanreicherung in Sedimentfallen (-) Methangasbildung in Teichen und Rückhaltebecken	(+) langfristige Sicherung der Nahrungsmittelerzeugung aufgrund geringerer Bodenerosion (+) Risikominderung bezüglich Häufigkeit und Umfang von Ertragsausfällen aufgrund besserer Klimaanpassung (+ bis ++) Verbesserung der Wasserqualität (- bis --) Verringerung der Nahrungsmittelerzeugung aufgrund von Verlusten oder Nutzungseinschränkungen bei Acker- und Grünlandflächen	(+ bis ++) Erweiterung der Habitatvielfalt und Biotopverbindungen (+) geringere Boden- und Schadstoffeinträge in angrenzende Gewässer und Habitats	(- bis -) kurzfristig: hohe Investitionskosten für Umgestaltungsmaßnahmen (- bis +/-) langfristig: zwar gewisse Verluste an Acker- und Grünlandflächen, aber insgesamt Sicherung der Erträge durch Risikominimierung
<b>Gewässerbezogene Maßnahmen</b>					
<b>Anhebung des Grundwasserspiegels durch Änderung des Entwässerungsregimes, Rückbau von Entwässerungsanlagen; Sohl-anhebung oder Anstauung bei Fließgewässern (einschließlich Wiedervernässung von Mooren und Auen)</b>	(+ bis ++) gegenüber Hochwasser und Dürren aufgrund verringerter Entwässerung und verlangsamten Abflusses von Grund- und Oberflächenwasser (-) bei anhaltender Ackernutzung Gefahr von Bodenverdichtung und Bodenerosion	(++) Erhalt der Kohlenstoffgehalte bei Moor- und Auenböden (+) langfristige Kohlenstoffanreicherung, insbesondere bei Wiederherstellung von Mooren mit Torfmoos	(+) Risikominderung bezüglich Häufigkeit und Umfang von Ertragsausfällen aufgrund Klimaanpassung (- bis --) Verringerung der Nahrungsmittelerzeugung aufgrund von Nutzungseinschränkungen bei Acker- oder Grünlandbewirtschaftung (+) Steigerung der Biomasseproduktion bei Nutzungsänderung in Paludikultur oder Wald (+) Verbesserung Wasserverfügbarkeit	(+ bis ++) Verbesserung von Habitateigenschaften, insbesondere bei Mooren und Auen	(- bis --) Ertragsrückgänge oder Nutzungsaufgabe bei Acker- und Grünlandflächen (+) Risikominimierung gegenüber Dürren und Hochwasser (+) Bewirtschaftungsalternativen (Carbon Farming, Paludikulturen, Wald, Dauergrünland)
<b>Renaturierung von Fließgewässern (Rückbau von Begräbungen und anderen degradierenden Umgestaltungen, Schaffung von Retentionsflächen)</b>	(+) gegenüber Hochwasser und Dürren aufgrund verlangsamten Abflusses von Grund- und Oberflächenwasser sowie aufgrund Retentionsflächen	(+) langfristige Kohlenstoffspeicherung aufgrund Humusanreicherung in Uferbereichen und Retentionsflächen	(+) Verbesserung der Wasserqualität von Fließgewässern (+) Erhöhung der Fischbestände (- bis --) Verringerung der Nahrungsmittelerzeugung aufgrund von Verlusten oder Nutzungseinschränkungen bei Acker- und Grünlandflächen	(++) Verbesserung der Gewässermorphologie und von Habitateigenschaften	(- bis --) Ertragsrückgänge oder Nutzungsaufgabe bei Acker- und Grünlandflächen (+) Risikominimierung gegenüber Hochwasser
<b>Etablierung von dauerhaft begrüntem Pufferstreifen an Gewässern</b>	(+) gegenüber Erosionsereignissen (Starkregen, Hochwasser) aufgrund verlangsamten Abflusses von Oberflächenwasser	(+) langfristige Kohlenstoffspeicherung im Boden der Randstreifen (+) kurz- bis mittelfristige CO <sub>2</sub> -Bindung in mehrjährigen Pflanzen	(+) Verbesserung der Wasserqualität von Oberflächengewässern (+) langfristige Sicherung der Nahrungsmittelerzeugung aufgrund geringerer Bodenerosion (- bis --) Verringerung der Nahrungsmittelerzeugung aufgrund Verlust oder Nutzungseinschränkungen bei Acker- und Grünlandflächen	(++) Verbesserung der chemischen Zustände von Oberflächengewässern (+) Schaffung von Habitaten und Biotopverbindungen	(- bis --) Ertragsrückgänge oder Nutzungsaufgabe bei Acker- und Grünlandflächen (+) Risikominimierung gegenüber Erosionsereignissen und Umwelthaftungsansprüchen
<b>Technische Systeme</b>					
<b>Agro-Photovoltaik-Systeme mit Dauergrünland oder Ackernutzung</b>	(+) gegenüber Hagel, Starkregen, Stürmen, Hitzestress und Dürren aufgrund Abschirmung, Beschattung und Reduzierung Windgeschwindigkeit	(++) Substituierung von fossilen Brennstoffen	(+) Risikominderung bezüglich Häufigkeit und Umfang von Ertragsausfällen aufgrund besserer Klimaanpassung (- bis +/-) geringere Nahrungsmittelerzeugung aufgrund Nutzungseinschränkungen oder Verluste bei Acker- und Grünlandflächen, sofern nicht kompensiert durch Klimaanpassung und ausgeglicheneres Mikroklima	(+/-) positive und negative Veränderungen der Habitateigenschaften gleichen sich weitestgehend aus, ohne Habitat grundlegend zu ändern	(-) kurzfristig: hohe Investitionskosten (++) langfristig: rentable Einnahmequelle (+) Risikominimierung aufgrund mehr Schutz vor Extremereignissen und Nutzungsdifferenzierung (-) Steigerung der potenziellen Schadenshöhe

**Tabelle 2** Produktionsintegrierte Maßnahmen bei Ackerflächen<sup>19</sup>

Maßnahmen	Ziele Erhöhung der Resilienz gegenüber Extremwetterereignissen (Klimaanpassung)	Klimaneutrale Agrarlandschaften	Versorgungssicherheit für Nahrungsmittel, Trinkwasser und Biomasse für energetische und stoffliche Nutzung	Gute ökologische Erhaltungszustände bei Gewässern, Habitaten und Arten	Ökonomische Profitabilität und Einkommenssicherung
<b>Diversifizierung der Kulturen</b>					
<b>Diversifizierung der mehrjährigen Fruchtfolge einschließlich Zwischenfrüchte (z. B. Leguminosen) oder begrünten Rotationsbrachen</b>	(+/- bis ++) gegenüber Dürren und Starkregenereignissen aufgrund verbesserter Bodenstruktur und verringerten Zeiträumen ohne Bodenbedeckung (-) bei Zwischenfrüchten evtl. Gefahr von Wasserknappheit für nachfolgende Hauptkultur	(+/- bis +) kurz- bis mittelfristige C-Anreicherung im Boden aufgrund tiefwurzelnder Kulturen, Brachen und Gründüngung (+) Reduzierung des Düngemittleinsatzes	(+/- bis +) langfristig höhere Hektarerträge (sowohl Biomasse als auch je nach Fruchtfolge Nahrungsmittel) aufgrund Klimaanpassung, geringem Krankheits- und Schädlingsdruck sowie besserer Bodenstruktur (+/- bis +) Verbesserung der Wasserqualität (u. a. aufgrund geringerer Nährstoffauswaschungen)	(+) Verbesserung der Böden bzgl. Eigenschaften und Biodiversität (+) Verbesserung Eigenschaften des Habitats Acker (u. a. für Nützlinge) (+/- bis +) bezüglich Schadstoffeinträge in Oberflächengewässer und Habitate	(+/- bis +) höhere Erträge aufgrund Risikominimierung, verbessertem Pflanzenschutz und besserer Bodenstruktur (+/- bis +) Kosteneinsparung bei Pestiziden und Düngemitteln (- bis +/-) höherer Arbeitsaufwand und Kosten
<b>Diversifizierung der angebauten Kulturen auf dem Schlag (Mischkulturen, Ober- und Unterkulturen)</b>	(+) generell aufgrund Kulturdiversität und verbesserter Bodenstruktur				
<b>Intensität des Düngemittel- und Pestizideinsatzes</b>					
<b>Reduzierter Einsatz von Mineral- und Wirtschaftsdünger, der nicht auf Maximalerträge ausgerichtet ist</b>	(+) gegenüber Starkregen aufgrund geringeren Risiko von Nährstoffauswaschungen (+) teilweise größere Robustheit der Kulturpflanzen	(+ bis ++) je nach Umfang der Düngemittelreduzierung	(+ bis ++) Verbesserung der Qualität von Nahrungsmitteln und Wasser (- bis +/-) geringere Hektarerträge je nach Umfang der Düngemittelreduzierung sowie Anbau von Leguminosen, aber zugleich auch Verringerung des Krankheits- und Schädlingsdrucks	(+ bis ++) Verbesserung der Eigenschaften des Habitats Acker sowie angrenzender Habitate (u. a. für Nützlinge) und Oberflächengewässer je nach Umfang der Düngemittelreduktion	(+) Risikominimierung von Ernteausfällen aufgrund geringem Krankheits- und Schädlingsdruck (+) Kosteneinsparung bei Düngung und auch Pflanzenschutz (- bis +/-) geringere Hektarerträge
<b>Reduzierter Einsatz von chemischen Pflanzenschutzmitteln und Ausweitung nicht-chemischer Pflanzenschutzmaßnahmen entsprechend Grundsätzen des integrierten Pflanzenschutz</b>	(+ bis -) nicht-chemische Pflanzenschutzmaßnahmen können Resilienz gegenüber Extremwetterereignissen erhöhen (z. B. bei Kulturdiversifizierung), aber auch reduzieren (z. B. bei pflügender Bodenbearbeitung)	(+/- bis -) je nach Art und Umfang nicht-chemischer Pflanzenschutzmaßnahmen und diesbezüglich verwendeter Energieträger	(+) Verbesserung der Qualität von Nahrungsmitteln und Wasser (+/- bis -) geringere Hektarerträge je nach Umfang der Pestizidreduktion und des nicht-chemischen Pflanzenschutzes	(+ bis ++) Verbesserung der Eigenschaften des Habitats Acker sowie angrenzender Habitate (u. a. für Nützlinge) und von Oberflächengewässer je nach Umfang der Pestizidreduktion	(- bis +/-) nicht-chemischen Pflanzenschutz bisher teurer als chemischer Pflanzenschutz (- bis +/-) geringere Hektarerträge

Fortgesetzt auf der nächsten Seite.

19) Vgl. u. a. *Tilman u. a.*, Agricultural sustainability and intensive production practices, *Nature* 2002, 671, <https://doi.org/10.1038/nature01014>; *The State of Carbon Dioxide Removal*, *The State of Carbon Dioxide Removal*, <https://www.stateofcdr.org/s/SoCDR-1st-edition.pdf> 2023; *Chenu u. a.*, Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations, *Soil and Tillage Research* 2019, 41, <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.04.011>; *Kurth u. a.*, The Case for Regenerative Agriculture in Germany – and Beyond, 2023; *Tanneberger u. a.*, Saving soil carbon, greenhouse gas emissions, biodiversity and the economy: paludiculture as sustainable land use option in German fen peatlands, *Regional Environmental Change* 2022, 69, <https://doi.org/10.1007/s10113-022-01900-8>; *Finckh u. a.*, Pflanzengesundheit richtig managen, *Ökologie & Landbau* 2021, 41; *Finckh u. a.*, Intra- and interspecific diversity: the cornerstones of agroecological crop health management, *Aspects of Applied Biology* 2021, 193; *Beillouin/Ben-Ari/Makowski*, Evidence map of crop diversification strategies at the global scale, *Evidence map of crop diversification strategies at the global scale* 2019, 123001, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab4449>; *Lehmann u. a.*, Biochar in climate change mitigation, *Nature Geoscience* 2021, 883, <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00852-8>; *Li u. a.*, Conservation agriculture practices increase soil microbial biomass carbon and nitrogen in agricultural soils: A global meta-analysis, *Soil Biology and Biochemistry* 2018, 50, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.02.024>; *Basche/DeLonge*, Comparing infiltration rates in soils managed with conventional and alternative farming methods: A meta-analysis, *PLOS ONE* 2019, e0215702, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215702>; *Li u. a.*, Residue retention and minimum tillage improve physical environment of the soil in croplands: A global meta-analysis, *Soil and Tillage Research* 2019, 104292, <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.06.009>; *Razzaghi/Obour/Arthur*, Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis, *Geoderma* 2020, 114055, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114055>; *Farhangi-Abriž u. a.*, Biochar effects on yield of cereal and legume crops using meta-analysis, *Science of The Total Environment* 2021, 154869, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145869>; *Palm u. a.*, Conservation agriculture and ecosystem services: An overview, *Agriculture, Ecosystems & Environment* 2014, 87, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.010>; *Pittelkow u. a.*, Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture, *Nature* 2015, 365, <https://doi.org/10.1038/nature13809>; *Gentsch u. a.*, Catch crop diversity increases rhizosphere carbon input and soil microbial biomass, *Biology and Fertility of Soils* 2020, 943, <https://doi.org/10.1007/s00374-020-01475-8>; *Glaze-Corcoran u. a.*, in: Sparks, *Advances in Agronomy*, 2020, 199; *Altieri/Ponti/Nicholls*, in: Gurr/Wratten/Snyder u. a., *Biodiversity and insect pests: key issues for sustainable management*, 2012, 72.

Tabelle 2 Fortgesetzt.

Ziele	Erhöhung der Resilienz gegenüber Extremwetterereignissen (Klimaanpassung)	Klimaneutrale Agrarlandschaften	Versorgungssicherheit für Nahrungsmittel, Trinkwasser und Biomasse für energetische und stoffliche Nutzung	Gute ökologische Erhaltungszustände bei Gewässern, Habitaten und Arten	Ökonomische Profitabilität und Einkommenssicherung
<b>Art der Bodenbearbeitung</b>					
<b>Konservierende Bodenbearbeitung mit dauerhafter Bodenbedeckung</b>	(++) gegenüber Hochwasser und Erosionsereignissen aufgrund dauerhafter Bodenbedeckung und höherem Infiltrationsvermögen des Bodens (+) gegenüber Dürren aufgrund erhöhter Wasserspeicherung und verbesserte Bodenstruktur	(+) Erhöhung des Bodenkohlenstoffgehalts durch höhere Biomassezufuhr	(+) langfristige Sicherung der Nahrungsmittelerzeugung und Biomasseproduktion aufgrund verringerter Erosion (++) Verbesserung der Wasserqualität (insbesondere durch Reduktion von Phosphor- und Sedimenteinträgen in die Gewässer) (+/- bis +) langfristig: höhere Hektarerträge aufgrund verbesserter Bodenstruktur	(++) Erhöhung der Bodenbiodiversität aufgrund stark verringerte Störung (-) negative Einflüsse für Biodiversität bei Einsatz von Totalherbiziden zur Saatbettvorbereitung (-) eventuell erhöhter Pestizeinsatz bei Nichteinhaltung von Fruchtfolgeregeln	(-) kurz- bis mittelfristig: höhere Investitionskosten bei Maschinen (+) langfristig: höhere und stabilere Erträge aufgrund Klimaanpassung
<b>Einbringung von Pyrolyse-Pflanzkohle</b>	(+) gegenüber Dürren aufgrund Verbesserung der Wasserspeicherung im Boden	(+) bei Pflanzkohle aus Reststoffen aufgrund langfristiger C-Speicherung im Boden (+/-) bei Pflanzkohle aus Frischholz, da hier langfristige C-Speicherung auch mit baulicher Nutzung möglich	(+/- bis +) höhere Hektarerträge bei manchen Kulturen (bspw. Mais, Weizen) (+/- bis +) Verbesserung der Wasserqualität aufgrund Bindung von Schadstoffen an Pflanzkohle (Aktivkohleeffekt)	(+/-) unklare Auswirkungen auf Bodenbiodiversität	(-) Hohe Kosten der Pflanzkohle und ihrer Einarbeitung (+) höhere und stabilere Erträge möglich aufgrund geringerer Anfälligkeit gegenüber Trockenheit
<b>Verringerung und Beseitigung mechanischer Bodenverdichtungen (u. a. mittels bodenschonender Maschinen, Pflügen verdichteter Böden einschließlich Tiefpflügen bei Pflugsohlen)</b>	(+) gegenüber Dürren, Hochwasser und Erosionsereignissen aufgrund erhöhter Wasserspeicherkapazität, Infiltrationsleistung und Kapillareffekte durch verbesserte Bodenstruktur	(+) aufgrund geringerer Methan- und Lachgasbildung im Boden (+/-) kein signifikanter Einfluss auf Bodenkohlenstoff bei verdichtungsschonender Bearbeitung (-) höhere Treibhausgasemissionen bei Pflügen bei fossilen Kraftstoffen	(+) Erhöhung der Wasserverfügbarkeit für Landwirtschaft und Wasserversorgung (+) langfristige Sicherung der Nahrungsmittelerzeugung und Biomasseproduktion aufgrund verringerter Bodenerosion	(+) Erhöhung der Bodenbiodiversität aufgrund Verbesserung der Bodenstruktur	(-) kurz- bis mittelfristig: höhere Investitionskosten für Maschinen (+) langfristig: höhere und stabilere Erträge aufgrund geringerer Anfälligkeit gegenüber Trockenheit und Stauässe
<b>Technische Spezialmaßnahmen für Extremereignisse</b>					
<b>Bewässerung und Benebelung</b>	(+ bis ++) gegenüber Dürren, Hitze und Spätfrösten	(-) aufgrund Energiebedarf für Pumpen und für Herstellung der Systeme, insbesondere bei fossilen Energieträgern	(+ bis ++) Ertragssicherung (+/- bis --) Konkurrenz zur Trinkwassernutzung je nach Wasserverfügbarkeit	(-- bis +/-) je nach Wasserverfügbarkeit kann Wasserentnahme mengenmäßige und gegebenenfalls auch ökologische und chemische Zustände bei Entnahme-Wasserkörpern und angrenzenden Habitaten (z. B. Auen) verschlechtern	(+ bis ++) Ertragssicherung (- bis --) Investitions- und Betriebskosten für Bewässerungs- bzw. Benebelungssysteme und Wasserentgelte
<b>Vliesabdeckung</b>	(+ bis ++) Schutz vor Starkregen, Hagel, Dürren und Frösten	(-) aufgrund Energiebedarf für Herstellung der Vliese sowie Entsorgung, insbesondere bei fossilen Energieträgern	(+) Ertragssicherung bei Extremereignissen und Minimierung von Schädlings- und Unkrautdruck (+) Steigerung der Nahrungsmittelerzeugung durch Ausweitung der Anbauzeiträume	(- bis +/-) je nach Flächenumfang und Freisetzung von Abbauprodukten (z. B. Mikroplastik) (-) Gefahr der Verfrachtung der Vliese bei Stürmen und Hochwasser	(+ bis ++) Ertragssicherung bei Extremereignissen und Schädlingen (+) Ausweitung der Anbauzeiträume (-) Kosten für Vliese
<b>Beheizung als Frostschutz</b>	(+) gegenüber Frösten	(-- ) aufgrund Energiebedarf für Heizen und für Herstellung der Heizsysteme, insbesondere bei fossilen Energieträgern	(+) Ertragssicherung bei Frösten	(- bis +/-) je nach Umfang der Beheizung	(+) Ertragssicherung (-) Kosten für Beheizung

**Tabelle 3** Produktionsintegrierte Maßnahmen bei Grünland und Wald<sup>20</sup>

Ziele	Erhöhung der Resilienz gegenüber Extremwetterereignissen (Klimaanpassung)	Klimaneutrale Agrarlandschaften	Versorgungssicherheit für Nahrungsmittel, Trinkwasser und Biomasse für energetische und stoffliche Nutzung	Gute ökologische Erhaltungszustände bei Gewässern, Habitaten und Arten	Ökonomische Profitabilität und Einkommenssicherung
<b>Grünlandflächen</b>					
<b>Maßnahmen</b>					
<b>Extensiv ohne Düngung und mit maximal 0,5 Großvieheinheiten bzw. maximal 3 Mahden</b>	(+) bezüglich Dürre aufgrund geringeren Beweidungsdruck bzw. seltenerer Mahd	(+/-) Kohlenstoffspeicherung im Boden kann je nach Standort die Treibhausgasemissionen der Tierhaltung zumindest ausgleichen	(+) Verbesserung der Wasserqualität (-) Reduktion der Nahrungsmittelerzeugung	(++) Verbesserung der Habitategenschaften als Weiden bzw. Mähwiesen	(-- bis +/-) Verringerung der Erträge wird nur teilweise durch geringere Betriebskosten und höhere Erlöse ausgeglichen
<b>Forstflächen</b>					
<b>Klimaangepasster Reinbestand</b>	(+) gegenüber Dürren und Hitzeperioden aufgrund höherer Resilienz gegenüber Trockenstress	(+/-)	(+/- bis +) Steigerung der Biomasseproduktion aufgrund verbesserter Klimaanpassung	(+/-) keine signifikante Verbesserung der Habitategenschaften (-) negative Auswirkungen bei Pesticideinsatz zur Abwehr von Schädlingen und Krankheiten	(+) höhere Erträge aufgrund Klimaanpassung (+) geringere Kosten bei Bewirtschaftung, Ernte und Vermarktung (-) höhere Ausfall- und Marktrisiken
<b>Mischbestände (altersgleiche Anpflanzungen)</b>	(+ bis ++) gegenüber Dürren, Hitzeperioden und Waldbränden aufgrund höherer Resilienz gegenüber Trockenstress und Schädlingsbefall	(+) langfristig sicherere Speicherung von Kohlenstoff im Boden aufgrund geringerer Gefahr des großflächigen Absterbens ganzer Waldflächen	(+ bis ++) Steigerung der Biomasseproduktion aufgrund verbesserter Klimaanpassung und reduziertem Ausfallrisiko	(+ bis ++) Verbesserung der Habitategenschaften	(+ bis ++) höhere Erträge aufgrund Klimaanpassung sowie reduzierten Ausfall- und Marktrisiken (+/- bis -) höhere Kosten bei Ernte und Vermarktung
<b>Mischbestände (altersgemischt mit natürlicher Verjüngung)</b>	(++) gegenüber Dürren, Hitzeperioden, Waldbränden und Stürmen aufgrund höherer Resilienz gegenüber Trockenstress, Schädlingsbefall und Windbruch	(++) langfristig sicherere Speicherung von Kohlenstoff im Boden aufgrund deutlich geringerer Gefahr des großflächigen Absterbens ganzer Waldflächen	(++) Steigerung der Biomasseproduktion aufgrund verbesserter Klimaanpassung, reduziertem Ausfallrisiko sowie kontinuierlicherer Holzernte (+) geringere Nährstoffeinträge in Gewässer aufgrund kontinuierlicherer Holzernte	(++) Verbesserung der Habitategenschaften	(++) höhere Erträge aufgrund Klimaanpassung sowie reduzierten Ausfall- und Marktrisiken (+) kontinuierlichere Erträge (-) höhere Kosten bei Ernte und Vermarktung

2.1 Diskussion der Wirksamkeitsabschätzung

Die Tabellen 1 bis 3 verdeutlichen, dass zwischen den Maßnahmen größere Unterschiede hinsichtlich der 5 Zielgrößen bestehen. Maßnahmen, die durch Ausweitung der Anbausysteme oder Veränderung von Landschaftselementen und -strukturen zu einer Diversifizierung der Agrarlandschaften beitragen, erhöhen die Resilienz von Agrarlandschaften gegenüber Extremwetterereignissen.<sup>21</sup> Dies wirkt grundsätzlich positiv auf die allgemeine Versorgungssicherheit mit Nahrungsmitteln, Biomasse sowie Trinkwasser aus. Zugleich befördern die meisten Maßnahmen den Klimaschutz und das Erreichen guter Erhaltungszustände bei Gewässern, Böden und der biologischen Vielfalt. Nach der Zukunftskommission Landwirtschaft und auch dem Industrieverband Agrar sollten zum Erhalt der biologischen Vielfalt nicht genutzte Landschaftsteile und -strukturen auch in der Normallandschaft einen Mindestanteil von 10 % im Offenland aufweisen.<sup>22</sup>

Zwischen diesen Diversifizierungsmaßnahmen bestehen allerdings größere Unterschiede hinsichtlich der Effektivität, großflächigen Umsetzbarkeit sowie der Kosten (Investitions-, Bewirtschaftungs- sowie Opportunitätskosten). Die größten Kosten in Form von Opportunitätskosten entstehen, wenn land- oder forstwirtschaftliche Flächen aus der produktiven Nutzung genommen werden (z.B. Hecken, Pufferstreifen, Verbreiterung von Gewässerbereichen). Hier wird regelmäßig auch die Versorgungssicherheit hin-

sichtlich Nahrungsmittelerzeugung negativ tangiert. Dies kann bei einer gleichbleibenden heimischen Nachfrage nach Nahrungs- und Futtermitteln über die dann stei-

20) Vgl. u. a. BMEL, Klimaangepasstes Waldmanagement – Förderprogramm des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft, <https://www.klimaanpassung-wald.de/hintergrund> 2023; Wissenschaftlichen Beirat für Waldpolitik, Die Anpassung von Wäldern und Waldwirtschaft an den Klimawandel, 2021; Garnett u. a., Grazed and confused? Ruminating on cattle, grazing systems, methane, nitrous oxide, the soil carbon sequestration question – and what it all means for greenhouse gas emissions, 2017; Pretzsch/Biber/Schütze, Effekt der Mischung auf die Struktur, die Dichte und das Ertragsniveau von Fichtenbeständen, LWF Wissen 2017, 131; Tretter, Wege zum Mischwald, LWF aktuell 2017, 6–9; Henning, Waldumbau: Gesunden Mischwald bewirtschaften, 2017; Jentsgen, Vom Altersklassen-Einheitsforst zum naturgemäßen Dauerwald, 2017; Zerbe, Renaturierung von Ökosystemen im Spannungsfeld von Mensch und Umwelt, 2019, 107; Wiechmann, Waldumbau mit Naturverjüngung, LWF aktuell 2009, 36; Henning, Erfolgreiche Waldverjüngung, 2015.

21) Vgl. Frei u. a., A brighter future: Complementary goals of diversity and multifunctionality to build resilient agricultural landscapes, Global Food Security 2020, 100407, <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100407>.

22) ZKL, 2021 (Fn. 8, S. 102); Industrieverband Agrar e.V., 2022 (Fn. 8, S. 16).



genden Importe mittelbar die Umweltsituation in anderen Staaten verschlechtern.<sup>23</sup>

Demgegenüber haben Diversifizierungsmaßnahmen, welche die landwirtschaftlichen Fruchtfolgen bzw. angebauten Kulturen ausweiten oder wie bei Agroforstsystemen Polykulturen aus ein- und mehrjährigen Kulturen etablieren, regelmäßig langfristig einen positiven Effekt auf die Einkommenssicherung der land- und forstwirtschaftlichen Betriebe.<sup>24</sup> Zwar sinkt kurzfristig die Profitabilität aufgrund der anfallenden Umstellungs- und Investitionskosten. Nach dem Ende der Umstellungsphase und bei erfolgreicher Etablierung von diversifizierten Anbausystemen überwiegen jedoch die Vorteile, da die Diversifizierung sowohl die Resilienz gegenüber Extremwetterereignissen als auch gegenüber Marktschwankungen steigert sowie Schädlings- und Krankheitsrisiken reduziert. Zudem könnten sich im Zuge der angestrebten Klimaneutralität von Deutschland bis 2045 für Landeigentümer und Landnutzer neue Einkommensquellen im Bereich Carbon Farming<sup>25</sup> und bei bestimmten, bisher wenig nachgefragten Agrar- und Forstprodukten (z.B. Bau- und Produktionsrohstoffe, Proteinpflanzen) erschließen.

Um die ökonomisch und ökologisch langfristig vorteilhafte Diversifizierung von Anbausystemen zu beschleunigen, könnte – wie bei der Umstellung auf ökologischen Landbau – die Gesellschaft einen Teil der Kosten für die Etablierung von Agroforstsystemen und Mischwäldern sowie morphologische Maßnahmen über staatliche Investitionsförderungen übernehmen. Des Weiteren könnte Deutschland die Diversifizierung landwirtschaftlicher Kulturen durch staatliche Beratungen befördern bzw. diese noch stärker – als bisher im Rahmen der Direktzahlungen – einfordern. Diese staatliche Kostenübernahme lässt sich damit rechtfertigen, dass die Gesellschaft von der Reduzierung externer Umwelteffekte und -kosten sowie einer Verbesserung der Erhaltungszustände von Gewässern, Habitaten und Arten profitiert, was sich positiv auf die Verfügbarkeiten von Ökosystemleistungen und das Erreichen völker- und europarechtlicher Ziele auswirkt.<sup>26</sup>

Die weitreichendsten Einschränkungen und Auswirkungen auf die land- und forstwirtschaftliche Produktion und damit auf die Versorgungssicherheit haben Änderungen des regionalen Wasserhaushaltes. Hierzu gehört die Wiederanhebung des Grundwasserspiegels. Allerdings ist insbesondere die Wiedervernässung von entwässerten Moor- und Auenböden unverzichtbar für die Erreichung der Klimaneutralität, da diese Flächen erhebliche Mengen an Treibhausgasen emittieren.<sup>27</sup> Bei diesen wiederzuvernässenden Flächen sollten daher alternative Landnutzungsformen (u. a. Paludikulturen bei Niedermooren und Wiederaufforstung von Auen) gefördert sowie aufgrund ihres Klimaschutzbeitrages und der Einkommensmöglichkeiten auch die Errichtung von Agro-Photovoltaik-Systemen rechtlich erleichtert werden.

Parallel sollte für großflächige Moor- und Auenflächen mit hohem Naturschutzwert ein Ankaufprogramm gestartet sowie das Eintauschen dieser Flächen im Rahmen von Flurbereinigungsverfahren verstärkt werden, um in Deutschland große Schutz- und Wildnisgebiete zu etablieren. Als Ausgleich für den damit verbundenen Verlust an land- und forstwirtschaftlichen Flächen könnte man die Anzahl der sehr kleinen Natura 2000-Gebiete in hiesigen Agrarlandschaften reduzieren, bei denen langfristig aufgrund der Einwirkungen der umgebenden Landnutzung und der genetischen Isolation keine oder nur mit großem Aufwand günstige Erhaltungszustände erreichbar sind, während sie gleichzeitig größeres Konfliktpotenzial bergen.<sup>28</sup> Sofern diese zu kleinen Gebiete nicht dauerhaft für die Kohärenz des Natura 2000 Netzes erforderlich sind (z.B. als Trittsteine), ließe sich mit ihrer

Aufgabe zugunsten von großen Schutz- und Wildnisgebieten voraussichtlich mehr für die biologische Vielfalt in Deutschland erreichen. Die aus Klimaschutzgründen erforderliche großflächige Wiedervernässung von Mooren und Auen könnte insofern auch eine Schlüsselmaßnahme für den Naturschutz sein.

Maßnahmen der Extensivierung bei Acker- und Grünlandnutzungen verbessern v. a. die Erhaltungszustände bei Gewässern, Böden, Habitaten und Arten. Dies erhöht auch die Resilienz gegenüber Extremwetterereignissen (u. a. aufgrund besserer Bodenstruktur und -bedeckung, natürlichem Pflanzenschutz, besserer Wasserqualität). Regelmäßig gehen allerdings Extensivierungen bei Düngemitteln, Pestizideinsatz und Viehbesatz mit verringerten landwirtschaftlichen Erträgen einher, sofern nicht lediglich eine Überversorgung reduziert wird bzw. Ertragsrückgänge durch eine ökologische Intensivierung mittels Diversifizierung und Polykulturen ausgleichbar sind. Trotz geringerer Erträge kann betriebswirtschaftlich die ökonomische Profitabilität gleich bleiben oder sogar steigen, wenn die Betriebskosten im gleichen oder höheren Maße sinken. Derzeit ist dies aber eher selten der Fall, da aufgrund der Externalisierung von ökologischen Folgekosten noch nicht die tatsächlichen Kosten für Düngung, Pestizideinsatz oder höhere Viehbestände von den land- und forstwirtschaftlichen Betrieben zu tragen sind.<sup>29</sup> Volkswirtschaftlich ist eine Extensivierung solange vorteilhaft, wie die Umweltkosten aus intensiven Landnutzungen die ökonomischen Mehrwerte bei der Sicherung der Versorgung und Einkommen übersteigen.<sup>30</sup> Dabei müssen allerdings indirekte Landnutzungsänderungen im Blick behalten werden, die

23) Vgl. *Smith u. a.*, The greenhouse gas impacts of converting food production in England and Wales to organic methods, *Nature Communications* 2019, 4641, <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12622-7>.

24) *Abson/Fraser/Benton*, Landscape diversity and the resilience of agricultural returns: a portfolio analysis of land-use patterns and economic returns from lowland agriculture, *Agriculture & Food Security* 2013, 2, <https://doi.org/10.1186/2048-7010-2-2>; *Lin*, Resilience in Agriculture through Crop Diversification: Adaptive Management for Environmental Change, *BioScience* 2011, 183, <https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.3.4>.

25) Siehe Vorschlag der EU-Kommission für eine Verordnung zur Schaffung eines Unionsrahmens für die Zertifizierung von CO<sub>2</sub>-Entnahmen, COM(2022) 672 final. Kritisch hierzu *Paul u. a.*, Carbon farming: Are soil carbon certificates a suitable tool for climate change mitigation?, *Journal of Environmental Management* 2023, 117142, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117142>.

26) Vgl. zum gesellschaftlichen Netto-Nutzen *Pannell*, Public Benefits, Private Benefits, and Policy Mechanism Choice for Land-Use Change for Environmental Benefits, *Land Economics* 2008, 225, <https://doi.org/10.3368/le.84.2.225>.

27) Bundesregierung, Nationale Moorschutzstrategie, 2022; *Röder/Grützmacher*, Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Mooren – Vermeidungskosten und Anpassungsbedarf 2012, 56; *BMUV*, 2023 (Fn. 5); *Dewitz u. a.*, MOORATLAS – Daten und Fakten zu nassen Klimaschutzern, 2023.

28) Ausführlich *Möckel*, Natura 2000-Gebiete und land-, forst- und fischereiwirtschaftliche Bodennutzungen, *AuR* 2021, 2–9.

29) Ausführlicher zu den externen Umweltkosten z. B. *UBA*, Daten zur Umwelt: Umwelt und Landwirtschaft Dessau 2018; *FAO*, *Natural Capital Impacts in Agriculture*, 2015.

30) Vgl. *Naturkapital Deutschland – TEEB DE*, Ökosystemleistungen in ländlichen Räumen, 2016; *Oelmann u. a.*, Quantifizierung der landwirtschaftlich verursachten Kosten zur Sicherung der Trinkwasserbereitstellung, 2017; *Boston Consulting Group*, Die Zukunft der deutschen Landwirtschaft nachhaltig sichern – Denkanstöße und Szenarien für ökologische, ökonomische und soziale Nachhaltigkeit, 2019. Nach Abschätzungen des *UBA* lagen die gesellschaftlichen Kosten einer Tonne CO<sub>2</sub> im Jahr 2020 bei mindestens 195 EUR (*UBA*, *Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten – Kostensätze Stand 12/2020*, 2020, S. 8).

die volkswirtschaftlichen Vorteile der Extensivierung und deren Netto-Umweltwirkungen schmälern können. Dies gilt insbesondere für überregionale Umweltgüter.

Extensivierungen und der Verlust an land- und forstwirtschaftlichen Flächen können mit unerwünschten Verlagerungseffekten einhergehen (teilweise als *Telecouplingeffekte* bezeichnet). Dies ist u. a. der Fall, wenn die Produktionsrückgänge in einer Agrarlandschaft bzw. in Deutschland durch die Ausweitung und Intensivierung der land- und forstwirtschaftlichen Landnutzungen in anderen Regionen oder Staaten am Markt ausgeglichen werden und dadurch andernorts die Umwelt, das Klima oder die Resilienz mehr beeinträchtigt werden.<sup>31</sup> Umgekehrt reduzieren hiesige Extensivierungen die direkten Verlagerungen von Emissionen in andere Regionen und Länder, indem sich der Eintrag an Nährstoffen, Pestiziden, Tierarzneimitteln in die Flüsse und Meere sowie von Treibhausgasemissionen in die Atmosphäre verringert.

Das Verlagerungsdilemma zwischen intensiv und extensiv lässt sich allerdings nur im begrenzten Maße durch technischen Fortschritt und ökologische Intensivierung der Landnutzungen verringern. Es ist auch kein Problem der Zukunft, da Deutschland trotz hoher Bewirtschaftungsintensitäten schon heute mengenmäßig in erheblichem Umfang Nettoimporteure bei Agrar- sowie Forstprodukten ist und über die Märkte mehr als 11 Mio. ha Landfläche in anderen Staaten in Anspruch nimmt.<sup>32</sup> Entscheidend für die Auflösung des Dilemmas ist die Reduzierung der heimischen Nachfrage nach Agrarprodukten, indem insbesondere die hiesige Tierhaltung sowie die Nachfrage nach tierischen Lebensmitteln sich verringert.<sup>33</sup> Zudem ist ein schnellerer Rückgang der anhaltenden Umwandlung von Agrar- und Waldflächen in Siedlungs- und Verkehrsflächen in Deutschland erforderlich.

## 2.2 Priorisierung der Maßnahmen

In Anbetracht des zunehmenden Zeitdrucks insbesondere bei der Klimaanpassung und beim Klimaschutz sowie der begrenzten finanziellen, personellen und materiellen Ressourcen, stellt sich die Frage nach einer möglichen Priorisierung der Maßnahmen. Kriterien für eine Priorisierung sind üblicherweise neben der Wirksamkeit hinsichtlich der angestrebten Ziele (Effektivität) unter anderem das betriebs- oder volkswirtschaftlichen Kosten-Nutzen-Verhältnis (Effizienz), die Umsetzbarkeit (räumlich und zeitlich), die Langfristigkeit der Wirkungen und die Akzeptanz bei Betroffenen und in der Gesellschaft. Allen Kriterien ist gemein, dass sie mehr oder weniger Vorhersagen für die Zukunft beinhalten und im Einzelfall von vielen verschiedenen Umständen und Faktoren abhängen. Entsprechend hoch ist die Unsicherheit bei den Einschätzungen.

Wir haben uns daher auf die Effektivität hinsichtlich der ausgewählten 5 Ziele beschränkt, die in den Tabellen 1 bis 3 detaillierter – wenn auch auf hohem Abstraktionsniveau – bewertet wurde. Die Tabelle 4 stellt das Ergebnis einer numerischen Addition der Effektivitätseinschätzung für die 5 Ziele dar.

Auch wenn die Einschätzungen stark pauschalisierte Annahmen beinhalten und einzelne Maßnahmen in der Praxis je nach Ausgestaltung und Ausgangssituation davon abweichen können, so bestehen zwischen den Maßnahmen doch größere Unterschiede, die eine Priorisierung erlauben. Bei den landschaftsgestaltenden Maßnahmen erreicht das Etablieren von Agroforstsystemen auf vorhandenen Grünland- oder Ackerflächen die höchste Gesamtbewertung. Ausschlaggebend hierfür sind neben einer guten Performance bei Resilienz und Erhaltungszuständen v. a. die Vorteile hinsichtlich der Versorgungssicherheit und Profitabilität.

Eine Umwandlung von Wald in Agroforstsysteme ist aufgrund der negativen Effekte beim Klimaschutz und guten Erhaltungszuständen keine prioritäre Option, auch

wenn dies die Nahrungsmittelerzeugung erhöht. Aufgrund der hohen Vulnerabilität von Ackerflächen gegenüber Extremwetterereignissen sowie den negativen Wirkungen der Ackerbewirtschaftung für Klima und Umwelt erreicht die Umwandlung von Acker in Mischwald ebenfalls eine hohe Gesamtbewertung, wobei dies aufgrund der negativen Auswirkungen auf die Nahrungsmittelerzeugung nur auf schlechten bis mäßigen Ackerstandorten erfolgen sollte.

Aufgrund der mittleren bis hohen Wirksamkeit hinsichtlich der 5 Ziele erreichen Agro-PV-Systeme ebenfalls eine hohe Gesamtbewertung und sind daher trotz ihrer negativen Auswirkungen auf das Landschaftsbild insbesondere hinsichtlich der zu erreichenden Klimaneutralität eine bedeutsame Alternative zu Agroforstsystemen bei Acker- und Grünlandflächen.

Die geringe Gesamtpunktzahl bei gewässerbezogenen Maßnahmen resultiert aus den negativen Auswirkungen hinsichtlich der Profitabilität und der Verminderung der Nahrungsmittelproduktion. In Betracht der bis 2045 zu erreichenden Klimaneutralität von Deutschland ist allerdings der Wiedervernässung von Moor- und Auenböden gleichwohl eine hohe Priorität einzuräumen (siehe Abschnitt 3). Auch die Renaturierung von Fließgewässern und der Etablierung von begrünten Pufferstreifen an Gewässern ist für die Umsetzung der Wasserrahmen-Richtlinie 2000/60/EG von entscheidender Bedeutung, auch wenn ihr Beitrag bei den anderen Zielen geringer ist und sie die betriebswirtschaftliche Profitabilität schmälern.

Von den produktionsintegrierten Maßnahmen auf Acker- und Grünlandflächen weisen die konservierende Bodenbearbeitung und die Reduzierung des Düngeneiveaus hohe Gesamtbewertungen auf. Ähnlich ist die Gesamtpunktzahl auch bei der Diversifizierung mehrjähriger Fruchtfolgen sowie der angebauten Kulturen auf dem Schlag ab, wobei hier die Spannweite zwischen den verschiedenen Ausgestaltungsmöglichkeiten groß ist. Wichtige produktionsintegrierte Maßnahmen sind auch die Reduzierung der Bodenverdichtung sowie Einbringung von Pyrolyse-Pflanzenkohle.

Die schon heute praktizierten technischen Maßnahmen zum Schutz vor Extremwetterereignissen (Bewässerung, Vliese, Beheizung) erreichen u. a. aufgrund der negativen Auswirkungen für den Klimaschutz und die zu erreichenden guten Erhaltungszustände bei Gewässern, Habitaten und Arten nur geringe Gesamtbewertungen. Die Reduzierung des Pestizideinsatzes und die Extensivierung der Dauergrünlandnutzung erreichen zwar keine hohen Gesamtbewertungen, sind aber zum Erhalt der Biodiversität

31) Vgl. UBA, Von der Welt auf den Teller – Kurzstudie zur globalen Umweltinanspruchnahme unseres Lebensmittelkonsums, 2021; *Fuchs/Brown/Rounsevell*, Europe's Green Deal offshores environmental damage to other nations, *Nature* 2020, 671, <https://doi.org/10.1038/d41586-020-02991-1>; *Smith* u. a., The greenhouse gas impacts of converting food production in England and Wales to organic methods, *Nature Communications* 2019, 4641, <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12622-7>.

32) UBA, Von der Welt auf den Teller, (Fn. 31, S. 14). Vgl. auch European Commission, Joint Research Centre, *World Atlas of Desertification*, Luxembourg 2018, S. 40–41.

33) Vgl. Wissenschaftlichen Beirats für Agrarpolitik beim Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, *Wege zu einer gesellschaftlich akzeptierten Nutztierhaltung*, Berlin 2015; *Wirz/Kasperczyk/Thomas*, Kursbuch Agrarwende 2050, (Fn. 17); *Breunig/Mergenthaler*, Besonderheiten des Klimaschutzes im Agrar- und Ernährungssystem – was müssen wir neu denken?, *Berichte über Landwirtschaft* 2022, 1, <https://doi.org/10.12767/buel.v100i2.425>; *Hayek* u. a., The carbon opportunity cost of animal-sourced food production on land, *Nature Sustainability* 2021, 21, <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00603-4>; *Sorg* u. a., Perspektiven für eine umweltverträgliche Nutztierhaltung in Deutschland, 2021.

Tabelle 4: Priorisierung der Maßnahmen

Maßnahmen	Ziele						Gesamt
	Resilienz- steigerung	Klima- neutralität	Versorgungs- sicherheit	gute Erhal- tungszustände	Profitabilität		
<b>Landschaftsbezogene Maßnahmen</b>							
<u>Agroforstsysteme auf Dauergrünland</u>	2	1	2	2	1	<b>8</b>	
<u>Agroforstsysteme auf Acker</u>	2	1	1	1	1	<b>6</b>	
Umwandlung von Acker in Mischwald	2	2	-1	2	-1	<b>4</b>	
Umwandlung von Acker in Dauergrünland	2	1	-1	1	-1	<b>2</b>	
Umwandlung von Dauergrünland in Mischwald	1	2	1	0	0	<b>4</b>	
Umwandlung von Wald mit Reinbeständen in Agro-Forst-Systeme auf Grünland	1	-1	1	0	1	<b>2</b>	
Umwandlung von Wald mit Reinbeständen in Agro-Forst-Systeme auf Acker	-1	-2	2	-1	2	<b>0</b>	
Anlegen von Hecken oder Baumreihen	1	1	0	1	0	<b>3</b>	
Morphologische Diversifizierungsmaßnahmen	2	0	0	1	-1	<b>2</b>	
Anhebung des Grundwasserspiegels	1	2	-1	1	-1	<b>2</b>	
Renaturierung von Fließgewässern	1	1	0	2	-1	<b>3</b>	
Etablierung von begrünten Pufferstreifen an Gewässern	1	1	0	2	-1	<b>3</b>	
<u>Agro-Photovoltaik-Systeme mit Dauergrünland- oder Ackernutzung</u>	1	2	0	0	2	<b>5</b>	
<b>Produktionsintegrierte Maßnahmen bei Ackerflächen</b>							
<u>Diversifizierung mehrjähriger Fruchtfolge (inkl. Zwischenfrüchte)</u>	1	1	1	1	1	<b>5</b>	
<u>Diversifizierung der angebauten Kulturen auf dem Schlag</u>	1	1	1	1	1	<b>5</b>	
<u>Reduzierter Einsatz von Mineral- und Wirtschaftsdünger</u>	1	2	0	2	0	<b>5</b>	
Reduzierter Einsatz chemischer Pflanzenschutzmittel	1	0	0	2	-1	<b>2</b>	
<u>Konservierende Bodenbearbeitung mit Bodenbedeckung</u>	2	1	1	1	1	<b>6</b>	
Einbringung von Pyrolyse-Pflanzenkohle	1	1	1	1	0	<b>4</b>	
Verringerung von Bodenverdichtungen	1	0	1	1	1	<b>4</b>	
Bewässerung und Benebelung	2	-1	1	-1	1	<b>2</b>	
Vliesabdeckung	2	-1	1	-1	1	<b>2</b>	
Beheizung als Frostschutz	1	-2	1	0	1	<b>1</b>	
<b>Produktionsintegrierte Maßnahmen bei Dauergrünland und Wald</b>							
Extensive Grünlandnutzung ohne Düngung und mit <0,5 Großvieheinheiten bzw. < 3 Mahd	1	0	0	2	-1	<b>2</b>	
Klimaangepasster Forst-Reinbestand	1	0	1	0	1	<b>3</b>	
<u>Forst-Mischbestände (altersgleiche Anpflanzungen)</u>	2	1	1	1	1	<b>6</b>	
<u>Forst-Mischbestände (altersgemischt mit natürlicher Verjüngung)</u>	2	2	2	2	1	<b>9</b>	

Hinweis: Die Gewichtung beruht auf den Einschätzungen der Autoren. Ihr liegt folgende fünfteilige Skala zu Grunde: -2 = deutlich negativ; -1 = mäßig negativ; 0 = weitgehend neutral, 1 = mäßig positiv, 2 = deutlich positiv. Unterstrichen sind alle Maßnahmen mit einer Gesamtpunktzahl von mehr als 5 Punkten. Die Anhebung des Grundwasserspiegels hat eine hohe Priorität für Klimaneutralität bis 2045.

wichtige Maßnahmen und damit für die Umsetzung der europäischen FFH-Richtlinie 92/43/EWG und der Vogel-schutz-Richtlinie 200/147/EG bedeutsam.

Hinsichtlich der Waldbewirtschaftung ist die Etablierung von altersgemischten Mischbeständen als wesentlich bedeutsamer einzustufen als die Aufforstung mit klimaangepassten Reinbeständen (z.B. Douglasie), da hier mit deutlichen Abstand die höchste Wirksamkeit hinsichtlich der 5 Ziele und bei natürlicher Verjüngung auch das beste volkswirtschaftliche Kosten-Nutzen-Verhältnis besteht. Ein weitgehend natürlicher Waldumbau ist allerdings eine langfristige Maßnahme. Insbesondere bei durch Trockenheit, Borkenkäfer oder Kahlschlag entwaldeten Flächen dürfte die Etablierung von altersgleichen Mischbeständen durch Anpflanzung schneller zum Ziel führen.

### 3. Fazit

Die letzten Dürrejahre in Deutschland zeigen, dass der Klimawandel um Mitteleuropa keinen Bogen macht, sondern schneller als gedacht das Wetter hier verändert. Dadurch nehmen Wetterextreme zu, was insbesondere die Land- und Forstwirtschaft vor wachsende Herausforderungen stellt. Gleichzeitig weisen hiesige Agrarlandschaften schon länger vielfältige Umweltprobleme auf, deren Lösung zum Erhalt der natürlichen Lebensgrundlagen sowie zur Erfüllung internationaler und europäischer Verpflichtungen dringend geboten ist. Die in den Tabellen 1 bis 3 aufgelisteten Maßnahmen zeigen, dass es verschiedene Möglichkeiten gibt, sowohl die Resilienz gegenüber Extremwetterereignissen zu stärken und die heimische Versorgungssicherheit zu gewähr-

leisten als auch die negativen Umweltauswirkungen land- und forstwirtschaftlicher Nutzungen zu verringern ohne die Profitabilität der Nutzungen übermäßig einzuschränken.

Insgesamt ist Diversifizierung in Agrarlandschaften und bei den einzelnen Acker-, Grünland- und Forstflächen der zu priorisierende Weg, um sowohl die Klimaanpassung zu befördern und gute Erhaltungszustände wiederherzustellen als auch mittel- und langfristig die Versorgungssicherheit und Profitabilität zu gewährleisten. Mit Agroforst bei Acker- und Grünlandflächen sowie Mischwälder ließen sich hierbei die größten Synergien erzielen. Zum Erreichen von nationaler Klimaneutralität bedarf es jedoch zusätzlicher Maßnahmen. Hierzu gehören in Agrarlandschaften insbesondere die Wiedervernässung von entwässerten Moor- und Auenböden, die naturschutzverträglich Ausweitung von Agro-PV-Systemen sowie die Reduzierung des Mineraldüngereinsatzes und der Viehbestände. Letzteres hätte auch größere positive Effekte für den Erhalt der biologischen Vielfalt an Land sowie in Nord- und Ostsee. Eine Ernährungswende hin zu weniger tierischen Lebensmitteln würde dabei nicht nur Treibhausgase und den Anfall von Wirtschaftsdünger reduzieren, sondern zugleich die hiesige und globale Flächeninanspruchnahme durch Futtermittelproduktion reduzieren.

Mit welchen Instrumenten und unter welchen Voraussetzungen der Staat am besten die Implementierung der hier betrachteten Maßnahmen befördern kann, werden wir in nachfolgenden Beiträgen näher erörtern.

**Open Access.** Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

## Weniger Licht! Straßenlaternen zwischen Umweltschutz und Verkehrssicherung

Wolf Herkner

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2024.

*Dämmerung, Mondlicht und Sternenglanz inspirieren und machen kreativ. Das Gemüt wird in einen anderen Zustand versetzt, sobald die Erde sich in den Schatten dreht. Die „To-dos“ des Tages sind abgehakt. Nicht-visuelle Sinne schärfen sich. Manch einer bekommt es da aber auch mit der Angst zu tun, vor dem Ungewissen, in dem Unholde lauern und Unfälle passieren.<sup>1</sup> Jedenfalls meinen das die Kommunen. Also zieht „Lichtsmog“ auf, wenn abends die Straßenlaternen und andere Lampen angehen, wie Glocken („sky-glow“) nicht nur über Städten, auch im ländlichen Raum blendet, blinkt und schimmert es. Das ist weder für den humanen Biorhythmus noch Flora und Fauna gut. Legitimation soll eine ominöse (Verkehrssicherungs-)Pflicht sein. Gegen dieses Narrativ oder gar Dogma tritt der vorliegende Aufsatz an.*

### 1. Redliche Bemühungen

Der Mensch hat sich und sein Umfeld durch Aufbau einer Infrastruktur künstlichen Lichts der Nacht(ruhe) beraubt. Auf diese „Lichtverschmutzung“ reagieren nun Legislative und Gubernative – unter plebisitärem Druck (Demokratie „von unten nach oben“<sup>2</sup>) durch Volksbegehren („Rettet die Bienen!“) und medienwirksame Aktionen wie der „Earth Night“ ([paten-der-nacht.de](http://paten-der-nacht.de)), oder auch aus schierer Strom-Not.

Die Verordnung der Bundesregierung über kurzfristige Energiesparmaßnahmen „EnSikuMaV“ v. 26. 8. 2022

(BGBI. I S. 1446) nebst Änderungen v. 28. 9. 2022 – die der DStGB als kommunaler Spitzenverband am 11. 10. 2022 wegen „größerer Handlungsspielräume“ begrüßte – wurde vom Kabinett bis 15. 4. 2023 verlängert (im BGBI. Nr. 37) und wird ggf. künftig wieder aufgerufen. § 8 Abs. 1 untersagt die Beleuchtung von öffentlichen Nichtwohngebäuden und Baudenkmälern von außen und § 11 S. 1 den Betrieb beleuchteter oder lichtemittierender Werbeanlagen von 22 Uhr bis 6 Uhr des Folgetages, wobei es jeweils auch – wie in nachfolgend genanntem Landesrecht – Ausnahmen v. a. zur Aufrechterhaltung der Verkehrssicherheit oder Abwehr anderer Gefahren gibt. Soweit die Erwägungen aus Wirtschaftlichkeit.

Das BNatSchG in der Fassung des Gesetzes v. 18. 8. 2021 (BGBI. I S. 3908) verbietet qua § 23 Abs. 4 Kunstlichtanlagen in Naturschutzgebieten (und entspr. in Kern- und Pflegezonen von Biosphärenreservaten gem. § 25 Abs. 3 S. 2) zumindest prinzipiell, während – noch der ausführenden RVO (§ 54 Abs. 4d) harrend – § 41a die „Naturvorsorge“ will. Dabei wird es um Leuchtenköpfe gehen, die nicht oberhalb der Horizontalen abstrahlen (*Upward Light Ratio* = 0% dank Schirm/Reflektor), zudem die Stärke (Lux/Einheitenzeichen lx) und Intensität (Lumen/lm), Lichtfarben (warmweiß

1) „Die dunkle Seite im Leben“, radioWissen des BR2, Sendung v. 17. 11. 2021 (Autorinnen *Müser* und *Zinner*).

2) Vgl. Art. 11 Abs. 4 BV, Art. 1 S. 2 BayGO und BayVerfGH v. 13. 4. 2000 – Vf. 4-IX-00, NVwZ-RR 2000, 737, 738; für Volkspartizipation als bereicherndes Element plädiert das Referat von *Möstl*, in: Biaggini (Red.), Bd. 72 der VVDStRL, 2013, S. 355, 368 ff.