

Wassermanagement in der Landwirtschaft

Ergebnisse aus dem Resilienz-Check



Downloadversion
foresight.tab-beim-bundestag.de

Oktober 2025
Resilienz-Dossier

Resilienz-Dossier: Wassermanagement in der Landwirtschaft, Oktober 2025, Downloadversion

Die TAB-Resilienz-Dossiers fassen die Ergebnisse der Resilienz-Checks zusammen und erscheinen seit 2025 jährlich auf der Microsite <https://foresight.tab-beim-bundestag.de/>.

Im jährlich durchgeführten Resilienz-Radar werden jeweils neun Fokusthemen vorgeschlagen, von denen eins durch die Berichterstattergruppe TA einem [Resilienz-Check](#) unterzogen wird. Ziel des Resilienz-Checks ist es, auf der Grundlage eines strukturierten Analyse- und Szenarioprozesses tragfähige Resilienzstrategien zu entwickeln, die sich vor dem Hintergrund systemischer Risiken ergeben. Das methodische Vorgehen verbindet ebenfalls eine systematische Literatur- und Dokumentenanalyse mit partizipativen Formaten, in die Akteure aus Wissenschaft, Wirtschaft, Politik, Verwaltung und Zivilgesellschaft kooperativ eingebunden werden. Die Analysen des Resilienz-Checks werden in den jährlich erscheinenden Resilienz-Dossiers veröffentlicht.



Das TAB analysiert im Auftrag des Deutschen Bundestages umfassend und vorausschauend die Potenziale

Inhalt

Resilienz-Dossier: Wassermanagement in der Landwirtschaft	3
Systembild und Herausforderungen.....	4
Status quo und Potenziale	10
Innovative Bewässerungssysteme	11
Status quo	12
Potenziale und Entwicklungsdynamiken	18
Neue Bewirtschaftungsformen	22
Status quo	23
Potenziale und Entwicklungsdynamiken	27
Geschlossene Produktionssysteme	32
Status quo	33
Potenziale und Entwicklungsdynamiken	39
Szenarien: Wassermanagement in der Landwirtschaft.....	44
Szenarienrahmen.....	45
Fokusszenario: Innovative Bewässerungssysteme	51
Neue Vulnerabilitäten	53
Fokusszenario: Neue Bewirtschaftungsformen.....	54
Neue Vulnerabilitäten	56
Fokusszenario: Geschlossene Produktionssysteme	58
Neue Vulnerabilitäten	60
Handlungsfelder	62
Übergreifende Handlungsfelder	63
Handlungsfelder: Innovative Bewässerungssysteme.....	65
Handlungsfelder: Neue Bewirtschaftungsformen.....	68
Handlungsfelder: Geschlossene Produktionssysteme.....	71

Resilienz-Dossier: Wassermanagement in der Landwirtschaft

In diesem Dossier werden die Ergebnisse des Resilienz-Checks zum Fokusthema „Wassermanagement in der Landwirtschaft“ präsentiert. Das Thema wurde von der Berichterstattergruppe für Technikfolgenabschätzung auf Basis der Analysen des Resilienz-Radars 2023/2024 ausgewählt. Dessen Ergebnisse zum [Infrastruktursystem Landwirtschaft und Ernährung](#) haben gezeigt, dass in Deutschland eine hohe Gefährdungslage durch systemische Risiken wie globale Erwärmung und zunehmende Wetterextreme besteht. Die Landwirtschaft wird daher neue Wege finden müssen, um mit den veränderten Bedingungen umzugehen.

Effiziente Bewässerungstechniken, neue Bewirtschaftungsformen sowie geschlossene Produktionssysteme gelten als strategische Themenfelder mit besonderem Potenzial zur Stärkung der Resilienz in der Landwirtschaft. Sie bieten vielversprechende Ansätze, um Wasserressourcen besser zu nutzen und landwirtschaftliche Systeme widerstandsfähiger gegenüber negativen Umwelteinflüssen zu machen. Vor diesem Hintergrund richtet der Resilienz-Check 2024/2025 seinen analytischen Fokus gezielt auf diese drei strategischen Themenfelder, um deren Resilienzpoteziale differenziert zu erfassen und zu bewerten.

Für jedes strategische Themenfeld wurden Status quo, Entwicklungstrends und Fokusszenarien bis 2050 analysiert, bestehend aus einem übergreifenden Szenarienrahmen für das Jahr 2050 sowie themenfeldspezifischen Fokusszenarien. Die Szenarien werden ergänzt durch Bewertungen zentraler Vulnerabilitäten. Abschließend werden übergreifende wie themenfeldspezifische Handlungsfelder zur Stärkung der Resilienz der landwirtschaftlichen Wasserversorgung aufgezeigt. Das [methodische Vorgehen](#) verbindet eine systematische Literatur- und Dokumentenanalyse mit partizipativen Formaten, in die Akteure aus Wissenschaft, Wirtschaft, Politik, Verwaltung und Zivilgesellschaft kooperativ eingebunden werden. Die Analysen des Resilienz-Checks werden in den jährlich erscheinenden Resilienz-Dossiers veröffentlicht.

Systembild und Herausforderungen

Das Wassermanagement in der Landwirtschaft wird – wie unten in der Abbildung dargestellt – maßgeblich von zwei zentralen Faktoren geprägt: dem Wasserdargebot und der Wassernachfrage. Das Wasserdargebot ergibt sich aus natürlichen und technischen Gegebenheiten, darunter die Grundwasserneubildung, Niederschläge, Oberflächengewässer (z. B. Flüsse, Seen), Speichersysteme (z. B. Rückhaltebecken, Drainagen) sowie mögliche alternative Wasserquellen. Es wird wesentlich durch die geografische Lage und die klimatischen Rahmenbedingungen einer Region beeinflusst. Die Wassernachfrage hängt von der Größe und Nutzung landwirtschaftlicher Flächen, der Fruchtfolge, den Bewirtschaftungsformen (z. B. Pflanzenbau, Tierhaltung), den Bodeneigenschaften sowie der Struktur und Entwicklung der Betriebe ab. Darüber hinaus spielen gesellschaftliche Trends, wie demografischer Wandel oder Veränderungen im Konsumverhalten, eine zentrale Rolle für die wasserbezogenen Anforderungen in der Landwirtschaft.

Das Wasserdargebot und die Wassernachfrage einschließlich ihrer dynamischen Wechselwirkungen sind eingebettet in einen komplexen politischen, gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und rechtlichen Rahmen. Auf europäischer Ebene kommt der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) eine Schlüsselrolle zu. Sie definiert verbindliche Vorgaben für Umwelt- und Klimaschutz, die Erhaltung der Biodiversität, die Einkommenssicherung von Landwirt/innen sowie die Entwicklung ländlicher Räume. Die Stärkung der Resilienz in der Landwirtschaft zählt dabei explizit zu ihren strategischen Zielen. Darüber hinaus wirken weitere sektorübergreifende Politiken direkt auf das Wassermanagement ein, darunter die EU-Biodiversitätsstrategie 2030 [\[1\]](#), die nationale Wasserstrategie [\[2\]](#), die nationale Bioökonomiestrategie [\[3\]](#), die derzeit in einer Neuauflage befindliche Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt [\[4\]](#) sowie die Moorstrategie zur Wiedervernässung [\[5\]](#). Diese Strategien formulieren ambitionierte Ziele für die nachhaltige Nutzung von Wasserressourcen, die Wiederherstellung ökologischer Funktionen und die langfristige Sicherung von Ernährungssystemen.

Allerdings sind die Maßnahmen nicht immer widerspruchsfrei: Zielkonflikte zwischen landwirtschaftlicher Nutzung, Biodiversitätsschutz und Wasserverfügbarkeit können sich verschärfen und erfordern integrierte, sektorübergreifende Lösungsansätze im Rahmen eines koordinierten Wassermanagements.



Systembild Wassermanagement in der Landwirtschaft

Das Wassermanagement in der Landwirtschaft steht vor zunehmend komplexen Herausforderungen. Deutschland galt lange Zeit als wasserreiches Land, in dem Wasserknappheit – wenn überhaupt – nur lokal und temporär auftrat. Diese Einschätzung ist inzwischen nicht mehr haltbar. In den letzten zwei Jahrzehnten haben sich die Rahmenbedingungen des Wasserhaushalts insbesondere infolge des Klimawandels so grundlegend verändert, dass die bisherige Planungssicherheit für das Wasserdargebot zunehmend infrage steht [6]. Steigende Temperaturen, veränderte saisonale Niederschlags- und Verdunstungsmuster sowie eine Zunahme von Wetterextremen führen regional zu häufigeren und intensiveren Trockenperioden und Dürren. Gleichzeitig nehmen Starkregenereignisse und damit verbundene Überflutungen zu. Diese klimatischen Veränderungen wirken sich direkt auf die landwirtschaftliche Produktion aus – sowohl auf den Pflanzenanbau als auch auf die Tierhaltung – und erfordern eine grundlegende Anpassung bestehender Bewirtschaftungs- und Wassermanagementstrategien.

Diese Entwicklungen verschärfen bestehende Nutzungskonflikte um Wasser und beeinträchtigen nachhaltig den regionalen Wasserhaushalt, die Wasserwirtschaft sowie die ökologische Funktion der Gewässer. Strukturelle Veränderungen, insbesondere Flächenversiegelung und zunehmende Flächennutzung, mindern den natürlichen Wasserrückhalt, erhöhen den Oberflächenabfluss in Vorfluter, Kanalsysteme und Gewässer und destabilisieren dadurch hydrologische Kreisläufe. Neben dem globalen Klimawandel wirkt auch der Wandel der Landnutzung als wesentlicher Treiber dieser Entwicklungen. Beide Prozesse wirken synergetisch und verstärken sich gegenseitig: Die veränderte Landnutzung beeinflusst den Bodenwasserhaushalt negativ, indem sie ebenfalls (laterale) Abflüsse erhöht und damit die tatsächliche Wasserspeicherkapazität senkt [7][8]. Zusammengenommen entstehen daraus erhebliche Herausforderungen für ein resilientes Wassermanagement in der Landwirtschaft. Die Ergebnisse des Resilienz-Radars zum Infrastruktursystem Landwirtschaft und Ernährung zeigen, dass sich die Gefährdungslagen insbesondere infolge der globalen Erwärmung und zunehmender Wetterextreme künftig deutlich verschärfen werden [9], mit direkten und indirekten Effekten auf das verfügbare Wasserdargebot, etwa durch regional und saisonal veränderte Niederschlagsmuster, eine veränderte Verdunstungsdynamik sowie die Neubildung und Verfügbarkeit von Grundwasser.

Klimaprojektionen zeigen, dass die Zahl der Sommertage ($T \geq 25\text{ °C}$) und der heißen Tage ($T \geq 30\text{ °C}$) in Deutschland flächendeckend deutlich zunehmen wird. Trockenperioden treten zukünftig häufiger, länger und intensiver auf, insbesondere in den Sommermonaten, wenn der Wasserbedarf besonders hoch ist. Zwar ist im Mittel mit steigenden Temperaturen auch eine Zunahme der Niederschläge zu erwarten, jedoch mit großer regionaler und saisonaler Unsicherheit. Zukünftige Veränderungen des Wasserdargebots werden maßgeblich durch Änderungen der Niederschlagsmenge sowie deren zeitlicher und räumlicher Verteilung bestimmt [10]. Ausbleibende Niederschläge begünstigen Trockenperioden und Dürren, während gleichzeitig mit häufigeren Starkregenereignissen zu rechnen ist. Bis 2050 werden diese laut Prognosen hinsichtlich Häufigkeit, Intensität und Dauer weiter zunehmen, mit regional steigenden jährlichen Abflussmengen, die das Wassermanagement zusätzlich herausfordern.

Die fortschreitende Klimakrise verändert die Rahmenbedingungen für den Pflanzenbau in der Landwirtschaft grundlegend. Der Anstieg der

mittleren Lufttemperaturen erhöht die Evapotranspiration erheblich und führt folglich zu einem gesteigerten Wasserbedarf insbesondere während des Frühlings- und Sommerhalbjahres. Zusätzlich können höhere Starkniederschlagsereignisse zu mehr Direkt- und Zwischenabfluss führen und damit die Verfügbarkeit pflanzenverfügbaren Wassers verringern.

Ein weiteres Problem ergibt sich aus der saisonalen Verschiebung der Niederschläge in die Wintermonate. In dieser Zeit sind die Böden häufig bereits bis zur Feldkapazität gesättigt, so dass zusätzliches Wasser oberflächlich abfließt und nicht zur Grundwasseranreicherung oder zur Nutzung durch Pflanzen beiträgt – insbesondere in grundwasserfernen Regionen. Trockenphasen in der Vegetationszeit führen dadurch vermehrt zu Wachstumsstress und Ertragseinbußen.

Die Ergebnisse aktueller Klima- und Wasserforschung zeigen, dass die Wasserversorgung der Landwirtschaft in Deutschland künftig erheblichen klimabedingten Risiken ausgesetzt sein wird. Die zentralen Gefährdungslagen lassen sich wie folgt systematisieren:

Veränderte Niederschlagsmuster: Der Klimawandel führt zu unvorhersehbaren und oft extremen Änderungen in den Niederschlagsmustern, einschließlich häufiger Dürreperioden und intensiver Regenfälle. Diese Unbeständigkeit erschwert die strategische Planung und operative Steuerung der landwirtschaftlichen Wassernutzung erheblich. In der Vegetationszeit können Niederschlagsdefizite zu kritischem Wassermangel führen, während Starkregen lokale Überschwemmungen verursachen und landwirtschaftliche Flächen temporär unbrauchbar machen kann.

Zunehmende Häufigkeit und Intensität von Dürren: Längere und intensivere Dürreperioden reduzieren die Verfügbarkeit von Wasser für die landwirtschaftliche Nutzung und Bewässerung signifikant. Dadurch steigt die Konkurrenz um knappe Wasserressourcen zwischen Landwirtschaft, kommunaler Versorgung, Industrie und Ökosystemschutz. Ertragsverluste, eine sinkende Resilienz landwirtschaftlicher Produktion sowie eine zunehmende Abhängigkeit von Bewässerungssystemen sind mögliche Folgen.

Schwankende Wasserverfügbarkeit in Flüssen und Grundwasser: Der Klimawandel beeinflusst die Menge und den Zeitpunkt des Wasserflusses in Flüssen und die Grundwasserneubildung. Eine geringere saisonale und langfristige Verfügbarkeit von Wasserressourcen insbesondere in Trockenzeiten und eine

unregelmäßige Grundwasserneubildung können Engpässe verursachen, die eine nachhaltige Nutzung der Wasserressourcen infrage stellen. Die Resilienz der landwirtschaftlichen Wasserversorgung ist damit zunehmend standortabhängig und von regionalen Boden- und Klimaverhältnissen geprägt.

Verschlechterung der Wasserqualität: Wetterextreme wie Starkregen und Überflutungen erhöhen den Oberflächenabfluss und begünstigen Erosionsprozesse. Dadurch gelangen Nährstoffe, Sedimente und Schadstoffe in Gewässer, was die Wasserqualität beeinträchtigt. Infolgedessen kann die Eignung des Wassers für die landwirtschaftliche Nutzung und Bewässerung eingeschränkt sein und eine zusätzliche technische Aufbereitung erfordern.

Veränderte Anforderungen an Bewässerungssysteme: Der steigende Bewässerungsbedarf infolge klimatischer Veränderungen stellt hohe Anforderungen an die Effizienz und Anpassungsfähigkeit bestehender Bewässerungssysteme. Veralterte oder wenig anpassungsfähige, ineffiziente Systeme können den zunehmenden Anforderungen nicht mehr gerecht werden, was zu erhöhten Wasserverlusten, Ineffizienzen und wirtschaftlichen Belastungen führt.

Nutzungskonflikte: Mit steigendem Wasserbedarf in der Landwirtschaft, insbesondere in den Sommermonaten, nehmen Nutzungskonflikte zwischen Sektoren und Regionen zu. Fragen der Wasserallokation, Nutzungsrechte und mögliche Regulierungserfordernisse – etwa durch Wasserentnahmebeschränkungen – gewinnen an Relevanz. Die Intensivierung von Hitzewellen und die Häufung temporärer, langanhaltender Dürren verschärfen diese Dynamik zusätzlich.

Die aufgezeigten Entwicklungen sind insgesamt stark abhängig vom Ausmaß des Klimawandels und zeigen deutliche regionale Unterschiede. Besonders in Teilen Süd- und Ostdeutschlands – etwa der Rheinebene oder im kontinental geprägten Binnenland – sind vermehrt längere Trockenperioden und Phasen mit geringer Grundwasserbildung zu erwarten [\[11\]](#).

In der Landwirtschaft erfordern Wasserknappheit, saisonale Engpässe und sektorale Nutzungskonflikte zunehmend Maßnahmen zur Krisenvorsorge und ein integriertes Wassermanagement, das sich am natürlichen Wasserhaushalt orientiert [\[6\]](#). Zur Steigerung der Resilienz werden verschiedene Maßnahmen diskutiert:

Flächenhafter Wasserrückhalt: Rückbau bestehender Drainagesysteme, Anlage von Versickerungsmulden, technische Maßnahmen zur

Grundwasseranreicherung sowie der Bau von Rückhaltebecken zur Regulierung des Wasserhaushalts. Ergänzt werden diese durch naturnahe Maßnahmen wie Wiedervernässung, Bodenentsiegelung oder die Renaturierung von Auen.

Verbesserung der Bodenqualität: Maßnahmen zur Steigerung der Wasserspeicherkapazität landwirtschaftlicher Böden, etwa durch Humusaufbau, Erosionsschutz und die Vermeidung von Bodenverdichtung.

Reduktion der Flächenversiegelung: Minimierung neuer Versiegelungen sowie Einsatz wasserdurchlässiger Beläge, um Infiltration zu fördern und Grundwasserneubildung zu ermöglichen.

Wiederherstellung der Speicherfunktion der Landschaft: Förderung flächendeckender Infiltration, Reduktion der Entwässerung in Agrar- und Forstflächen sowie Revitalisierung natürlicher Wasserhaltefunktionen.

Einsatz regulierbarer Entwässerungssysteme: Installation steuerbarer Drainagen und dezentraler Speicherlösungen (z.B. Teiche) zur temporären Speicherung von Drainagewasser mit gezielter Nutzung in Trockenphasen.

Erhalt und Wiederherstellung aquatischer Ökosystemfunktionen: Schutz und Renaturierung von Flussgewässern und Seen sowie gezielte Rückhaltung und Speicherung von Winterniederschlägen zur Deckung des landwirtschaftlichen Wasserbedarfs in sommerlichen Trockenperioden.

Vor diesem Hintergrund lassen sich verschiedene strategische Ansätze zur Steigerung der Resilienz als zentrale Handlungsfelder für ein zukunftsfähiges Wassermanagement in der Landwirtschaft identifizieren. Diese adressieren zentrale Risiken und Gefährdungslagen, zielen auf eine ausgewogenere Balance zwischen Wasserdargebot und -nachfrage ab und können einen wesentlichen Beitrag zur Stärkung der Resilienz landwirtschaftlicher Produktionssysteme leisten: Innovative Bewässerungssysteme, neue Bewirtschaftungsformen und geschlossene Produktionssysteme.

Referenzen

1. Europäische Kommission (2020): EU-Biodiversitätsstrategie für 2030. www.eur-lex.europa.eu (05.04.2025)
2. BMUV (2023): Nationale Wasserstrategie. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, Berlin

3. BMBF; BMEL (2020): Nationale Bioökonomiestrategie. Zusammenfassung. Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Berlin www.bmleh.de (14.04.2025)
4. BMUV (2024a): Nationale Strategie zur Biologischen Vielfalt 2030 (NBS 2030). Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, Berlin
5. BMUV (2022): Nationale Moorschutzstrategie. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, Berlin
6. Drewes, J. (2022): Auf jeden Tropfen kommt es an. In: Politische Ökologie 186, S. 65–70
7. Neunteufel, R. et al. (2010): Studie Wasserverbrauch und Wasserbedarf. Lebensministerium, Wien www.info.bml.gv.at (04.04.2025)
8. Niehues, B. (2024): Szenarien der zukünftigen Wassergewinnung aus den natürlichen Süßwasserressourcen für Deutschland. Überblick aus aktuellen DVGW- Studien und statistischen Daten. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches, www.dvgw.de (04.04.2025)
9. TAB (2024): Foresight-Report zum Infrastruktursystem Landwirtschaft und Ernährung. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, (Autor/innen: Bledow, N.; Eickhoff, M.; Evers-Wölk, M.; Kahlisch, C.; Kehl, C.; Nolte, R.; Rioussel, P.), Berlin, www.foresight.tab-beim-bundestag.de (14.04.2025)
10. Marx, A. et al. (2022): Zur Entwicklung des Wasserdargebotes im Kontext des Klimawandels. Ergebnisse des Forschungsprojekts „UFZ-Klimafolgenstudie“ für das DVGW Zukunftsprogramm Wasser. In: Energie und Wasserpraxis 08, S. 16–21
11. DVGW (2022): Auswirkungen des Klimawandels auf das Wasserdargebot Deutschlands. Überblick zu aktuellen Ergebnissen der deutschen Klimaforschung. Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V., Bonn

Status quo und Potenziale

Für das zukünftige Wassermanagement in der Landwirtschaft wurden drei strategische Themenfelder als zentrale Ansatzpunkte zur Stärkung der Resilienz identifiziert und in das dem Resilienz-Check zugrunde liegende Systembild integriert. Diese Themenfelder umfassen erstens innovative Bewässerungssysteme, die durch den Einsatz digitaler Technologien und neuer Materialien eine ressourcenschonende und

effiziente Wassernutzung ermöglichen und zunehmend auch Konzepte der Wasserwiederverwendung einbeziehen. Zweitens werden neue Bewirtschaftungsformen betrachtet, darunter Agroforstsysteme als Integration von Gehölzen in landwirtschaftliche Flächen, Agri-Photovoltaik zur kombinierten Nutzung von Fläche für Nahrungs- und Energieproduktion sowie die Wiedervernässung von Mooren. Als drittes strategisches Themenfeld werden geschlossene Produktionssysteme analysiert, etwa vertikale Farmen, Bioreaktoren und hydroponische Systeme, die eine weitgehend unabhängige und kontrollierte Erzeugung ermöglichen.

In allen drei strategischen Themenfeldern wurden der aktuelle Stand, die wesentlichen Potenziale sowie die zukünftigen Entwicklungsdynamiken systematisch untersucht. Die Ergebnisse dieser Analysen werden auf den folgenden Seiten dargestellt.

Innovative Bewässerungssysteme



Innovative Bewässerungssysteme in der Landwirtschaft umfassen Verfahren, die eine gezielte, effiziente und nachhaltige Wasserversorgung für Pflanzen bei minimalem Verbrauch ermöglichen. Sie kombinieren Tropf- und Mikrobewässerung mit Sensorik und datenbasierten Anwendungen, unterstützt durch künstliche

Intelligenz und das Internet der Dinge. Durch präzise Steuerung gelangt Wasser direkt zu den Pflanzenwurzeln, wodurch Verdunstungsverluste sinken und die Wasseraufnahme verbessert wird. Echtzeitdaten erlauben es, den Wasserbedarf dynamisch an Umweltbedingungen anzupassen und so übermäßige Bewässerung zu vermeiden, insbesondere in Hitze- und Trockenperioden. Neben herkömmlichen Wasserquellen setzen innovative Bewässerungssysteme auf alternative Einspeisekonzepte, wie die Wiederverwendung von aufbereitetem Abwasser, auf Regenwasserspeicherung und eine salzarme Wasseraufbereitung. So werden Wasserressourcen geschont, die Wasserversorgung in niederschlagsarmen Gebieten gesichert und die Landwirtschaft widerstandsfähiger gegenüber Wetterextremen und den langfristigen Folgen des Klimawandels.

Im Folgenden werden der Status quo sowie die [Potenziale und Entwicklungsdynamiken](#) in diesem strategischen Themenfeld beschrieben.

Status quo

Im weltweiten Vergleich werden in Deutschland landwirtschaftliche Flächen nur in geringem Maße bewässert. Im Jahr 2022 wurden in Deutschland etwa 3,3 % der landwirtschaftlich genutzten Freilandfläche bewässert. Das entspricht rund 554.000 Hektar [\[1\]\[2\]](#). Sowohl die bewässerte Fläche als auch die Anzahl der Betriebe mit Bewässerungstechnik sind ungleichmäßig über die Bundesländer verteilt. Den weitaus größten Anteil aller deutschen Bundesländer hat Niedersachsen mit 47 % der gesamten landwirtschaftlich bewässerten Fläche in Deutschland [\[3\]](#). Hauptursachen sind die sandigen Böden mit geringer Wasserhaltekapazität, die besondere Anfälligkeit für Dürreperioden sowie der umfangreiche Anbau empfindlicher Kulturen wie Kartoffeln und Gemüse.

Vorteile für landwirtschaftliche Betriebe, die sich durch den Einsatz von Bewässerungssystemen ergeben können, betreffen vier Bereiche: (1) die Ertragssicherung, d.h. die Sicherung der Ernte; (2) die Qualitätssicherung, etwa durch die Vermeidung von Dürreschäden, welche wiederum Auswirkungen auf den erzielbaren Preis der Ware hat; (3) die Möglichkeit, hinsichtlich des Wasserbedarfs anspruchsvollere Kulturen anzubauen; (4) die besonders intensive, mehrfache Nutzung derselben Fläche für unterschiedliche Kulturen [\[4\]](#).

Die eingesetzten Bewässerungstechniken unterscheiden sich zum Teil deutlich hinsichtlich ihres Effizienzgrades, der aufzuwendenden Investitionskosten sowie möglicher Einsatzgebiete. Grundsätzlich wird technisch zwischen Oberflächenbewässerung und Druckbewässerung unterschieden. Während bei der Oberflächenbewässerung das Wasser an der Oberfläche angestaut wird, bevor es mithilfe von Kanälen oder einer anderen Vorrichtung über das Feld verteilt wird, wird bei der Druckbewässerung das Wasser über ein Rohrsystem zum Feld gepumpt und dort per Restdruck weiterverteilt. In Deutschland werden aktuell fast ausschließlich unterschiedliche Verfahren der Druckbewässerung genutzt [\[3\]](#). Zu diesen zählen etwa die Bewässerung mittels Beregnungsmaschinen, die oberirdische Tropfbewässerung und die unterirdische (Tropf-)Bewässerung. Welche Methode von Landwirtschaftsbetrieben eingesetzt wird, hängt letztlich von einer

Kombination unterschiedlicher Faktoren ab. Dazu zählen neben den Investitionskosten und der Umsetzbarkeit auch natürliche Einflussgrößen wie der Bodentyp, die Wasserverfügbarkeit oder das Gefälle. Auch die Art der angebauten Pflanzenkulturen spielt eine Rolle.

Die **Oberflächenbewässerung** zählt zu den ältesten Bewässerungstechniken. Außerhalb Deutschlands spielen viele Arten der Oberflächenbewässerung auch heute noch eine wichtige Rolle, da sie relativ einfach, mit geringem Kostenaufwand und ohne aufwendige technische Vorrichtungen implementiert werden können. Grundsätzlich besteht das Prinzip der Oberflächenbewässerung in einer natürlichen Bewegung des Wassers über das Feld, wobei die Art der angewendeten Bewässerung unter anderem vom Neigungswinkel und Relief der zu bewirtschaftenden Fläche abhängt. Dazu zählen unterschiedliche Stauverfahren, wie etwa der Beckenstau, Flächenstau oder Furchenstau, bei denen bestimmte Bereiche des Feldes zeitweise unter Wasser gesetzt werden, sowie Verfahren der Berieselung, wie etwa die Streifenberieselung oder die Furchenberieselung, bei denen Wasser durch Äcker und geneigte Flächen hindurchfließt. Die Oberflächenbewässerung eignet sich nicht für alle Böden bzw. Pflanzenkulturen und kann zu starker Bodenerosion führen. Ein weiteres Problem sind der sehr hohe Wassereinsatz und eine damit zusammenhängende geringe Effizienz aufgrund von hohen Verdunstungs- und Versickerungsraten bei nahezu allen Arten dieser Bewässerungstechnik. In Deutschland hat die Oberflächenbewässerung daher für den landwirtschaftlichen Bereich derzeit keine Bedeutung mehr [3]. Ein zukünftiger Einsatz wäre nur unter Extrembedingungen wie dramatisch steigende Energiekosten bzw. weitgehende Energieknappheit bei gleichzeitig hohem Wasserdargebot denkbar.

Im Gegensatz zur Oberflächenbewässerung kommt bei der **Druckbewässerung** technischer Aufwand zum Einsatz, um das Wasser aktiv über das Feld zu verteilen. Ein typisches Verfahren ist die Beregnung, bei der Wasser unter Druck in Form von Regen- und Sprühbewässerung großflächig ausgebracht wird. Unter dem Begriff „Beregnung“ werden verschiedene Techniken zusammengefasst, die sich hinsichtlich ihrer technischen Ausstattung und Mobilität unterscheiden. Dazu zählen mobile Beregnungsmaschinen mit Großflächenregner, mobile Beregnungssysteme mit Düsenwagen, stationäre Großflächenbewässerungsanlagen und fest installierte Sprinkleranlagen.

Zu den am weitesten verbreiteten Berechnungstechniken in Deutschland zählt die **mobile Beregnung mittels Großflächenregnern**. Gründe für den häufigen Einsatz dieser Technik, mit der bis zu acht Hektar Fläche bewässert werden können, sind eine sehr hohe Flexibilität bei der Flächenbewirtschaftung bei relativ niedrigen Investitionskosten und die Möglichkeit, Fruchtfolgen mit bewässerten und nicht bewässerten Kulturen anzubauen. Allerdings fallen hohe Energiekosten für den laufenden Betrieb an, zudem können ungünstige Windverhältnisse die Verteilung des Wassers negativ beeinflussen [\[1\]\[3\]](#). Insbesondere wegen der weiten Verbreitung dieser Technologie sowie wegen der vergleichsweise niedrigen Investitionskosten werden mobile Beregnungsmaschinen in Deutschland vermutlich auch in absehbarer Zukunft eine zentrale Rolle bei der Bewässerung in der Landwirtschaft spielen. Die Maschinen werden zunehmend mit webbasierten Dokumentations- und Überwachungssystemen ausgestattet, um Arbeitsabläufe besser planen und Störungen schnell beheben zu können. Die Regner sind mit GPS-Sender und Drucksensoren ausgestattet, die entsprechende Daten permanent an Webserver senden und somit kann unmittelbar auf Störungen reagiert werden, was den Aufwand für Kontrollfahrten reduziert. Eine Kopplung mit Pumpsteuerungen ermöglicht einen Start von Elektro- oder auch Dieselpumpaggregaten auch per Smartphone [\[5\]](#).

Eine weitere auch in Deutschland eingesetzte Variante der Beregnungssysteme ist die **mobile Beregnungsmaschine mit einem Düsenwagen**. Im Gegensatz zu Großflächenregnern, die nach dem Prinzip des klassischen Rasensprengers funktioniert, wird bei diesen Wagen Wasser durch Schläuche gepumpt und strömt dann durch Düsen sehr gleichmäßig und bodennah auf die Pflanzen. Ihre Vorteile bestehen vor allem in einer wesentlich besseren Wasserverteilung gegenüber Großflächenregnern bei Wind, einer generell höheren Präzision bei der Wasserverteilung und einem geringeren Wasserdruck an den Düsen, was eine Energieeinsparung von etwa 20 % bewirken kann. Allerdings wird diese Art der Beregnung eher in kleineren Betrieben und bei neuen Anbauversuchen eingesetzt, da die Investitionskosten für einen breiten Einsatz auf großen Flächen relativ hoch sind.

Zu den nicht mobilen, sondern **stationär installierten Großflächenbewässerungstechniken** gehören Kreis- und Linearberegnungsmaschinen, die für große Flächen ab 25 Hektar eingesetzt werden. Ihre Tragwerke sind mit anhängenden Niederdruckdüsen dicht bestückt, was nur geringe Wasserwurfweiten

an den Einzeldüsen erfordert und einen besonders energieeffizienten Betrieb dieser Anlagen mit geringem Wasserdruck bei gleichzeitig hoher Verteilgenauigkeit ermöglicht. Der Einspareffekt an Energie liegt im Vergleich zur mobilen Beregnungsmaschinen bei mindestens 50 %. Eine deutliche Ersparnis an Arbeitszeit bietet einen weiteren Vorteil zu allen anderen aktuell eingesetzten Bewässerungstechniken. Allerdings muss unter anderem wegen des Investitionsaufwandes eine gewisse Flächenmindestgröße gegeben sein.

Schließlich zählen auch noch **Sprinkleranlagen** zu den Bewässerungssystemen mittels Beregnung. Sie bestehen meist aus mehreren Schläuchen, die in einem Abstand von zehn bis zwölf Metern im Feld verlegt werden. Sprinkler werden im landwirtschaftlichen Bereich allerdings nur auf kleinen Flächen oder für Kulturen eingesetzt, die eine hohe Wertschöpfung generieren, da sowohl die Anschaffungskosten als auch der Arbeitsaufwand beim Aufbau der Anlagen relativ hoch sind [\[1\]\[5\]](#).

Eine besonders effiziente Bewässerungstechnik ist die **Tropfbewässerung** bzw. lokale Beregnung. Dabei werden Schläuche oder Rohre eingesetzt, die das Wasser direkt zu den Wurzeln der Pflanzenkulturen befördern. Diese Technik hat einige Vorteile gegenüber anderen Techniken. Dazu zählen die präzise Wasserverteilung, eine Reduzierung des Wasserdrucks und somit der Energiekosten sowie die Einsparung von Wasser aufgrund geringer Verdunstung. Außerdem eignet sich die Tropfbewässerung besonders gut, um den Pflanzen über die Tropfschläuche Dünger zuzuführen (Fertigation). In Deutschland wird die Tropfbewässerung in der Landwirtschaft bisher vor allem bei Pflanzen eingesetzt, die besonders hohe Erträge versprechen, wie unterschiedliche Strauchobstsorten, Spargel, Zucchini etc. Wegen der relativ hohen Verfahrenskosten ist diese Technik für den klassischen Ackerbau aktuell wenig geeignet und bisher noch selten anzutreffen [\[6\]](#).

Eine relativ neue und bisher in Deutschland im Vergleich noch eher selten angewendete Bewässerungstechnik ist die **unterirdische Bewässerung**. Dabei wird über Rohrleitungen das Wasser direkt zu den Wurzeln der Pflanzen geleitet, was eine besonders effiziente und präzise Bewässerung bewirkt und kaum Wasserverlust durch Verdunstung mit sich bringt. Die Rohre werden in einer Tiefe von ca. 40 cm und in einem Abstand von einem halben bis einen Meter unterirdisch verlegt. Je höher die Lebensdauer einer solchen Bewässerungsanlage ist (aktuell in der Regel ca. zehn Jahre), desto

eher lohnen sich die hohen Investitions- und Betriebskosten, die durch das Verlegen und das Wiederentnehmen der Rohre anfallen [1].

Ein **Bewässerungssystem** ist dann vorteilhaft, wenn es Wasser **effizient** (also präzise) verteilt, Bodenerosion minimiert, Ernteerträge fördert, mit möglichst wenig Energie pro gefördertem Liter Wasser auskommt und wenn es hinsichtlich des Arbeitszeitbedarfs günstige Werte liefert – kurz: wenn das System grundsätzlich nachhaltig und langfristig kosteneffizient arbeitet [1][3][5]. Der Faktor der Effizienz – oder anders ausgedrückt: Die Möglichkeit, mit relativ wenig Wasser-, Energie- und Kostenaufwand möglichst hohe Erträge zu erzielen, entscheidet darüber, ob der Einsatz eines bestimmten Bewässerungssystems in der Landwirtschaft lohnenswert ist. Diese Bestimmungsfaktoren sind jedoch keineswegs statisch, sondern unterliegen ihrerseits eigenen Dynamiken, sind in ihrem Zusammenspiel komplex und jeweils mit eigenen Unsicherheiten behaftet. So setzen sich beispielsweise die Kosten aus unterschiedlichen Variablen zusammen – wie Investitions-, Material-, Arbeits- und Reparaturkosten –, die mit der Zeit starken Veränderungen unterliegen können. Auch die Entwicklung der Marktpreise bestimmter landwirtschaftlicher Erzeugnisse kann die Rentabilität des Einsatzes von Bewässerungssystemen bei einzelnen Kulturen stark beeinflussen. Darüber hinaus kann die für die Bewässerung benötigte Wassermenge durch betriebliche, technologische, produktionstechnische und agronomische Maßnahmen und ein gezieltes Monitoring positiv beeinflusst (minimiert) werden.

Ein entscheidender Faktor beim Einsatz von Bewässerungssystemen ist die **Entwicklung der Kosten** im Kontext der zukünftigen physischen und institutionellen Wasserverfügbarkeit sowie der erwarteten Wassernachfrage. Der Aufbau einer Bewässerungsinfrastruktur kann aus agronomischer Sicht sinnvoll sein, um Ertragsseinbußen bei unzureichenden Niederschlägen zu vermeiden. Ob sich diese Investitionen jedoch auch ökonomisch rechnen, hängt stark von regionalen Rahmenbedingungen, Wasserpreisen, Energieaufwand und Fördermöglichkeiten ab und ist daher in vielen Fällen nur eingeschränkt abschätzbar bzw. mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Wenn zur Bewässerung Grundwasser oder Wasser aus Oberflächengewässern verwendet wird, dann spielen zudem der Wasserstand und evtl. Entnahmeerlaubnisse für den Faktor der Wasserverfügbarkeit eine wichtige Rolle, die ihrerseits von den Wassernutzungsinteressen anderer Akteure sowohl innerhalb als auch außerhalb der Landwirtschaft abhängen können. Prinzipiell kann die Entnahme von

Grund- und Oberflächenwasser zu einer Beeinträchtigung der Grundwasserqualität, der Bodenqualität und der Wasserökologie sowie zur Absenkung des Grundwasserspiegels führen [7].

Bei sinkendem Wasserdargebot sowohl infolge von Trockenheitsereignissen als auch bei (zum Teil damit zusammenhängenden) **zunehmenden Interessenkonflikten** um die Nutzung der begrenzten Wasserressourcen steigt das Risiko der Kürzung oder Umverteilung von Entnahmeerlaubnissen. Das Risiko führt dann zu einer Beeinträchtigung der Rentabilität von Investitionen in die Bewässerungsinfrastruktur [3].

Ein Weg, den landwirtschaftliche Betriebe gehen können, um sowohl die Wasserverfügbarkeit abzusichern als auch Interessenskonflikte mit anderen Wassernutzern zu vermeiden, besteht in der **Erschließung und Nutzung alternativer Bewässerungsquellen**. Dazu zählt u.a. der Bau eigener Wasserspeicherbecken zum Auffangen und zur späteren landwirtschaftlichen Verwendung von Regenwasser. Allerdings stellt sich hier ebenfalls die Frage nach der Rentabilität aufgrund hoher Investitionskosten. Vor dem Hintergrund zunehmender Niederschlagsmengen während der Feuchtperioden und strengerer Regelungen bei den Entnahmeerlaubnissen kann sich eine solche Investition aber in Zukunft zunehmend als lohnenswert erweisen.

Eine weitere Möglichkeit ist die **Wiederverwendung von Brauchwasser** (Betriebs- oder Nutzwasser). **Eine EU-Verordnung über Mindestanforderungen bei der Wasserwiederverwendung trat 2020 in Kraft** [9] und gilt seit 2023 für alle Mitgliedstaaten, also auch für Deutschland [8]. Ziel ist es, die Wasserknappheit in Folge des Klimawandels durch Wasserwiederverwendung bei der landwirtschaftlichen Bewässerung zu verringern und den Mitgliedstaaten die Umsetzung mit einheitlichen Vorgaben zu erleichtern. Allerdings liegt die Entscheidung für die Umsetzung der Verordnung bei den einzelnen Mitgliedsstaaten. Was in einigen EU-Ländern wie Spanien, Italien oder Griechenland bereits seit einigen Jahren praktiziert wird, wird in anderen EU-Staaten wie Irland, Österreich oder Polen (noch) nicht erlaubt [9]. Hierzulande ist die Wasserwiederverwendung zwar grundsätzlich erlaubt, wird allerdings zum Teil immer noch kontrovers diskutiert. So wurde von der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) bereits 2022 ein Bericht vorgelegt, der eine Anpassung der EU-Richtlinien für Deutschland empfiehlt. Die Empfehlungen lauten unter anderem, die Anforderungen an die Wasserqualität bei Nahrungsmittelpflanzen zu

verschärfen, einen direkten Kontakt zwischen aufbereitetem Wasser und Nahrungsmitteln für den Rohverzehr zu vermeiden und eine regelmäßige Überwachung der Stoffeinträge zum Schutz von Böden, Grundwasser und Oberflächengewässern zu gewährleisten [\[10\]](#). Zudem liegt ein aktueller Referentenentwurf zum Dritten Gesetz zur Änderung des Wasserhaushaltsgesetzes [\[11\]](#) vor.

Potenziale und Entwicklungsdynamiken

Es ist davon auszugehen, dass die Nutzung alternativer Bewässerungsquellen, vor allem die Nutzung von Regenwasser aus Speicherbecken wie auch die Wasserwiederverwendung, in Zukunft in Deutschland einen entscheidenden Beitrag zur landwirtschaftlichen Bewässerung leisten können. Begünstigende Faktoren sind eine Absenkung der Investitionskosten bzw. eine positive Entwicklung beim Kosten-Nutzen-Verhältnis für den Bau von eigenen Wasserspeicherbecken, die Umsetzung der oben genannten Empfehlungen zur Wasserwiederverwendung sowie Fördermaßnahmen zur Finanzierung und Implementierung entsprechender Vorhaben.

Was die Bewässerungssysteme selbst betrifft, so weisen aktuelle technologische Entwicklungen sowie eine engere Verknüpfung von Bewässerungssystemen mit digitalen Technologien auf ein deutliches Effizienzsteigerungspotenzial hin. Dies betrifft vor allem den Einsatz von Sensoren und KI zur besseren Überwachung des Zustands der Böden und der Kulturpflanzen (Smart Irrigation), Automatisierungsansätze zur besseren Steuerung der Bewässerung sowie eine Verbesserung und höhere Langlebigkeit eingesetzter Materialien. Insgesamt ist seit einigen Jahren eine Entwicklung ausgehend vom Prinzip des „Precision Farming“ hin zu einem umfassenden Konzept des „Digital Farming“ zu beobachten [\[12\]](#). Viele Landwirtschaftsbetriebe setzen bereits heute digitale Lösungen ein, etwa digitale Zwillinge der zu bewirtschaftenden Felder, welche es erlauben, den Feuchtigkeitsbedarf kontinuierlich zu überwachen und die Bewässerung in Echtzeit dem Bedarf anzupassen. Andere Autor/innen beschreiben, wie Wasserhaushaltsmodelle in Kombination mit Sensorik und Wetterdaten dabei helfen können, den Wasserhaushalt ganzheitlich zu betrachten und das Wasser zielgenauer – und letztendlich sparsamer – zu verteilen [\[13\]](#). Solche Modelle können darüber hinaus aber auch als Instrument zur Planung eingesetzt werden, etwa um unterschiedliche Bewässerungsstrategien zuerst am Modell digital zu

testen, bevor sie real angewendet werden und unter Umständen Erträge gefährden. Eine Kombination aus Modellen und internetbasierten Systemen ermöglicht die Integration sowohl von Sensordaten als auch Satelliten- bzw. Wetterdaten, wodurch die Automatisierung von Bewässerungssystemen sowie deren Effizienz deutlich verbessert werden kann [\[13\]](#)[\[7\]](#).

Die fortschreitende digitale Vernetzung und eine KI-gestützte Datenanalyse in der Landwirtschaft werden im Rahmen unterschiedlicher Forschungsvorhaben und Pilotprojekte seit einigen Jahren erforscht und getestet. Bereits 2017 wurden erfolgreiche Feldtests in Pakistan durchgeführt, bei denen durch den Einsatz von KI für Bewässerungssysteme Wassereinsparungen von bis zu 40 % erzielt wurden. Das System, entwickelt von einem Projektkonsortium aus dem Deutschen Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI), der in Karachi ansässigen NED University of Engineering & Technology sowie dem Research Center for Artificial Intelligence (RCAI), errechnet dabei über den Einsatz von Sonden den optimalen Wasserbedarf in Abhängigkeit von den Bedürfnissen der jeweiligen Pflanzenkulturen, der Bodensituation und den aktuellen lokalen Wetterbedingungen [\[14\]](#). Ein weiteres Forschungs- und Entwicklungsprojekt, welches 2022 an der Technischen Universität Wien abgeschlossen wurde, hatte ebenfalls die Entwicklung und Erprobung eines Prototyps für ein neues und intelligentes Bewässerungssystem zum Ziel. Dabei wurde eine umfassende Evaluation von auf dem Markt bereits verfügbaren Bewässerungssystemen durchgeführt, um auf der Basis dieser Erkenntnisse ein optimiertes System zu entwickeln [\[15\]](#).

In Deutschland wird aktuell im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM) des Bundeswirtschaftsministeriums ein neues Pflanzenüberwachungssystem entwickelt, bei dem spezielle, an den Blättern der Kulturpflanzen angebrachte Sonden eingesetzt werden, um die Bewässerung so passgenau und effizient wie möglich zu gestalten [\[16\]](#). Dabei werden auf einem 20 ha großen Feld ca. sechs Sonden mit Hilfe von Magneten an den Blättern angebracht. Auf diese Weise wird der sogenannte Turgordruck der Pflanze – vergleichbar mit dem Blutdruck beim Menschen – gemessen. Die Differenz zwischen magnetischem Druck und Turgordruck gibt Aufschluss über den Wassergehalt und wird durch die Sonde per Mobilfunk in Echtzeit an einen Server übermittelt, von welchem der Landwirt die entsprechenden Daten abrufen kann. Mithilfe dieser Technologie wurden

Wassereinsparungen von bis zu 40 % und gesteigerte Ernteerträge von über 30 % erzielt. Aktuell sind weltweit ca. 1.500 Sonden im Einsatz. In der zweiten Ausbaustufe gibt das System nicht nur Auskunft über den Wasserbedarf, sondern veranlasst auch die Bewässerung automatisiert und eigenständig über eine Verbindung zum Bewässerungssystem [16].

Auch abseits des Landwirtschaftssektors werden neue, internetbasierte Bewässerungssysteme erprobt. So wurde in Erlangen 2023 im Rahmen eines Pilotprojekts ein System aus Sensoren und KI entwickelt, welches Kommunen in Bayern dabei unterstützen soll, die Bäume im öffentlichen Raum effizienter und ressourcenschonender zu bewässern [17]. Ein anderes IoT-basiertes Bewässerungssystem zur vertikalen Begrünung von Gebäuden – als Beitrag zur Klimatisierung urbaner Räume und zur Milderung von Klimafolgen wie zunehmende Hitze und Trockenheit – wurde am Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik entwickelt [18].

Die beschriebenen Entwicklungen im Bereich von Digitalisierung, Datenintegration und Vernetzung deuten darauf hin, dass vor allem in diesem Bereich besonders große Potenziale auf dem Weg hin zu einem hoch effizienten Bewässerungsmanagement bestehen. Daneben werden auch politische Steuerungsinstrumente eine zentrale Rolle spielen. Dazu zählen etwa die Einführung einer verpflichtenden Betriebsberatung und die Erstellung von Anpassungsplänen, die vermehrte Förderung von Forschungsprojekten zur Weiterentwicklung von Bewässerungssystemen, um Wassereffizienz, Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit zu steigern, oder auch die Förderung der Erstellung von regionalen Beregnungskonzepten [19].

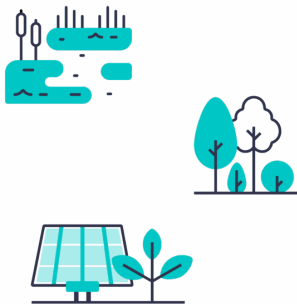
Referenzen

1. BZL (2024): Wie viel landwirtschaftliche Fläche wird in Deutschland bewässert? Bundesinformationszentrum Landwirtschaft. www.landwirtschaft.de (19.02.2025)
2. Destatis (2024): Im Jahr 2022 wurden 554 000 Hektar landwirtschaftlich genutzte Freilandfläche bewässert. Statistisches Bundesamt, (10.04.2024), www.destatis.de (05.07.2025)
3. Ebers, N. et al. (2023): Potenzialabschätzung von technischen Wasserspeicheroptionen, Bewässerungsansätzen und ihrer Umsetzbarkeit. Thünen-Institut, Thünen Working Paper Nr. 277, Braunschweig, DOI: [10.22004/ag.econ.338987](https://doi.org/10.22004/ag.econ.338987)
4. Sinabell, F. et al. (2021): Volkswirtschaftliche Aspekte der Klimaanpassung in der Landwirtschaft. Eine konzeptionelle Fallstudie

- zur Bewässerung in Österreich. Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung (Hg.), Wien
5. Schimmelpfennig, S. et al. (2018): Bewässerung in der Landwirtschaft. Tagungsband zur Fachtagung am 11./12.09.2017 in Suderburg. Braunschweig
 6. de Witte, T. (2017): Wirtschaftlichkeit der Feldbewässerung. Bundesinformationszentrum Landwirtschaft, www.praxis-agrar.de (19.02.2025)
 7. Jandl, R. et al. (Hg.) (2024): Kapitel 4. Anpassungsoptionen in der Landnutzung an den Klimawandel. APCC Special Report: Landnutzung und Klimawandel in Österreich, Berlin, Heidelberg
 8. UBA (2024b): EU-Verordnung zu Wasserwiederverwendung. Umweltbundesamt, 18.12.2024, www.umweltbundesamt.de (19.02.2025)
 9. EU (2024): WISE Freshwater – Freshwater Information System for Europe. Water Reuse. Europäische Union, water.europa.eu (19.02.2025)
 10. LAWA (2022): Endbericht der LAWA-Ad hoc AG/KG Water Reuse an die 163. LAWA-Vollversammlung. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, www.lawa.de (19.02.2025)
 11. BMUV (Hg.) (2024b): Referentenentwurf eines Dritten Gesetzes zur Änderung des Wasserhaushaltsgesetzes. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, www.bmuv.de (14.04.2025)
 12. Griepentrog, H. (2019): Digitalisierung in der Landwirtschaft. Wichtige Zusammenhänge kurz erklärt. www.dlg.org (19.02.2025)
 13. Keilholz, P. et al. (2021): Digitalisierung und Automatisierung der landwirtschaftlichen Bewässerung in Deutschland. Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge (Hg.), Jahrbuch Agrartechnik 2020, Braunschweig
 14. DFKI (2017): Künstliche Intelligenz für Bewässerungssysteme – Feldtests in Pakistan belegen Einsparung von 40%. Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH, www.dfki.de (19.02.2025)
 15. FFG (2022): I²B – Intelligentes, individuelles Bewässerungssystem. Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft, projekte.ffg.at (19.02.2025)
 16. BMWK (2024): Tropfen für Tropfen: Wasser sparen in der Landwirtschaft. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, www.bmwk.de (19.02.2025)
 17. STMD Bayern (2023): Intelligente Sensortechnologie hilft Kommunen bei effizienter und ressourcenschonender Bewässerung von Bäumen / Digitalministerin Gerlach besucht Projekt in Erlangen. Bayerisches

- Staatsministerium für Digitales, 09.10.2023, www.stmd.bayern.de (19.02.2025)
18. Fraunhofer UMSICHT (2022): Vertikale Begrünung im urbanen Raum. Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik, www.umsicht.fraunhofer.de (05.04.2025)
19. UBA (2020): Effiziente Bewässerungssysteme in der Landwirtschaft. Umweltbundesamt, 02.11.2020. www.umweltbundesamt.de (19.02.2025)

Neue Bewirtschaftungsformen



Neue Bewirtschaftungsformen in der Landwirtschaft bieten innovative Ansätze für einen nachhaltigeren Umgang mit Wasserressourcen und die Regeneration landwirtschaftlicher Flächen. Sie zielen insbesondere darauf ab, die Wasserspeicherfähigkeit von Böden zu verbessern, die Verdunstung zu reduzieren und die Wasserverfügbarkeit in der Fläche langfristig zu

sichern. Zu den wichtigsten Ansätzen zählen **Agroforstsysteme**, die Bäume und Sträucher mit landwirtschaftlichen Flächen kombinieren [1]. Sie verbessern die Bodenstruktur, verringern Erosion, wirken als natürliche Wasserpumpen und bieten Windschutz, wodurch Verdunstung reduziert wird und die Widerstandsfähigkeit gegenüber Trockenheit und Hitze steigt [2][3]. **Agri-Photovoltaikanlagen (Agri-PV)** ermöglichen eine Doppelnutzung von Flächen für Landwirtschaft und Energiegewinnung. Durch Verschattung senken sie den Wasserbedarf, schützen den Boden vor Verdunstung und liefern zugleich Energie für effiziente Bewässerungssysteme [4]. Ein weiterer Ansatz ist die **Wiedervernässung von Mooren** und ihre Nutzung als Paludikultur. Moore speichern große Wassermengen und geben diese langsam wieder ab, was die Wasserversorgung in Trockenperioden unterstützt und Hochwasser abmildert [5][2]. Zudem binden sie Kohlenstoff und fördern die Biodiversität, was die Resilienz des gesamten Ökosystems stärkt. Derzeit sind diese Bewirtschaftungsformen meist noch Nischenanwendungen in der Landwirtschaft, deren breitere Umsetzung mit Unsicherheiten und Hemmnissen verbunden ist.

Im Folgenden werden der Status quo sowie die [Potenziale und Entwicklungsdynamiken](#) in diesem strategischen Themenfeld beschrieben.

Status quo

Agroforstsysteme

Traditionelle Agroforstsysteme sind seit Langem weltweit und auch in Mitteleuropa in verschiedenen Ausprägungen verbreitet. Im Zuge der Modernisierung der Landwirtschaft wurde in Europa und Nordamerika jedoch zunehmend auf Gehölze auf Ackerflächen verzichtet, um Platz für Landmaschinen zu schaffen. Die Trennung von Land- und Forstwirtschaft sowie die Abkehr von Streuobstwiesen hin zu Obstplantagen verstärkten diese Entwicklung [\[6\]](#). Bereits seit 2012 werden Gehölze auf landwirtschaftlichen Flächen in Frankreich angebaut. In der EU sind derzeit etwa 9 % der landwirtschaftlichen Flächen Agroforstsysteme, wobei solche mit Viehhaltung überwiegen [\[7\]](#). Für Deutschland liegen keine genauen Daten vor. Der Deutsche Fachverband für Agroforstwirtschaft ermittelte auf der Grundlage freiwillig übermittelter Daten für Ende 2023 eine Fläche von 1.304 ha [\[8\]](#). Dies sind weniger als 0,01 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche. Erst seit einigen Jahren und ausgelöst durch die Auswirkungen des Klimawandels zeigt sich in Deutschland wieder ein Trend hin zur stärkeren Nutzung von Agroforstsystemen [\[6\]](#). Das Thema wird in Deutschland maßgeblich durch die Wissenschaft sowie durch den 2019 gegründeten Deutschen Fachverband für Agroforstwirtschaft (DeFAF) vorangetrieben, in dem Wissenschaftler/innen und Expert/innen verschiedener Fachrichtungen sowie Landwirt/innen und Vertreter/innen aus Kommunen zusammengeschlossen sind.

Mittlerweile wurde die Agroforstwirtschaft weiterentwickelt und an die heutigen landwirtschaftlichen Produktionsbedingungen angepasst. Die Bewirtschaftung soll dabei möglichst wenig durch Bäume und Gehölze beeinträchtigt werden, sodass eine ökonomisch konkurrenzfähige land- und forstwirtschaftlichen Produktion möglich ist. Das sogenannte „Alley Cropping“ orientiert sich an landwirtschaftlichen Maschinenbreiten. Dabei handelt es sich um Baum- oder Strauchreihen, die in regelmäßigen Abständen angelegt werden, um dazwischen Feldfrüchte

oder Futterpflanzen anzubauen. Mit einer an das Gelände angepassten Linienführung in den Feldern (Schlüssellinien werden waagrecht zum Hang/Berg angelegt), dem sogenannten „Keyline-Design“, können Niederschläge besser versickern und damit Trockenheit und Erosion vorgebeugt werden [\[1\]](#). Die typischen technologischen Entwicklungen in der konventionellen Landwirtschaft, wie autonome Traktoren, sind auf die Bedürfnisse von Monokulturen zugeschnitten und eignen sich nicht für strukturreiche Agroforstsysteme, die durch weniger freien Raum, teils unwegsames Gelände und häufig den Anbau unterschiedlicher Nutzpflanzen gekennzeichnet sind. Laufroboter hingegen, also mobile Maschinen mit beinähnlichen Fortbewegungsmechanismen, die sich auch in unwegsamem Gelände bewegen können, können auch in Agroforstsystemen eingesetzt werden. Durch die Entwicklungen in den Bereichen KI und Reinforcement Learning (RL) haben sich die Navigation und die Fähigkeiten dieser Roboter in den letzten Jahren deutlich verbessert [\[9\]\[10\]](#). Flexible Kleinroboter können sich auch gut in Mischkulturen bewegen. Die Preise für Laufroboter sind zudem stark gesunken. Auch die Drohnentechnologie zur Pflanzen- und Feldüberwachung entwickelt sich dynamisch [\[11\]](#). Technologische Entwicklungen im Bereich der KI könnten zukünftig auch die Pflanzenauswahl für Agroforstsysteme prägen. KI-Technologien werden in der Pflanzenzüchtung bisher nur sehr begrenzt eingesetzt. Datenbasierte KI-Anwendungen bergen jedoch enormes züchterisches Potenzial und könnten die Entwicklung widerstandsfähiger und standortangepasster Sorten substanziell voranbringen.

Aufgrund des wachsenden Interesses und der wissenschaftlich nachgewiesenen Vorteile werden Agroforstsysteme in der Agrarpolitik mittlerweile zunehmend als sinnvolle und nachhaltige Landnutzungsform anerkannt und politisch unterstützt. Die Bewirtschaftungsform ist in der ab 2023 geltenden Gemeinsamen EU-Agrarpolitik (GAP) als förderfähig anerkannt. Im Rahmen der Öko-Regelung 3 „Beibehaltung einer agroforstlichen Bewirtschaftungsweise auf Acker- und Dauergrünland“ der GAP wurden 2024 bundesweit 173 Hektar Fläche für Agroforstsysteme beantragt (2023 waren es noch 53 Hektar). Die GAP-Planzahlen liegen für das Jahr 2024 bei 7.500 Hektar Fläche. Laut deutschem GAP-Strategieplan von 2021 sollen bis 2026 ca. 200.000 ha Agroforst-Gehölzfläche in Deutschland etabliert werden [\[12\]](#). Doch der Deutsche Fachverband für Agroforstwirtschaft erklärte Anfang 2024, dass landwirtschaftliche Betriebe bei der

Umstellung auf Agroforstwirtschaft noch immer nicht ausreichend unterstützt werden [\[13\]](#).

Den Vorteilen für die Umwelt stehen ökonomische Nachteile und Risiken gegenüber. Als größter ökonomischer Nachteil gilt der erhöhte Zeit-, Arbeits- und Kapitalbedarf durch die Einführung des Systems und ggf. die Anschaffung neuer Maschinen. Zudem werden hohe Investitionskosten bei der Anlage und Pflege der Agroforstsysteme gesehen. Risiken bestehen zudem dann, wenn es sich um Pachtflächen handelt. Kapitalrückflüsse sind erst nach mehreren Jahren zu erwarten und die Anbauflexibilität ist durch die mehrjährige Flächenbindung eingeschränkt [\[14\]](#).

Agri-PV

Weltweit hat sich die Technologie der Agri-PV in den letzten Jahren sehr dynamisch entwickelt. Agri-PV bietet die Möglichkeit, die Flächeninanspruchnahme zur Umsetzung der Energiewende zu reduzieren und die landwirtschaftliche Fläche zu erhalten. Im Kontext der angestrebten 80 %-Quote erneuerbarer Energien am Strommix bis 2030 gewinnen die Potenziale der Agri-Photovoltaik zunehmend an Bedeutung, was eine verstärkte Förderung erwarten lässt [\[4\]\[15\]](#).

Darüber hinaus eröffnet Agri-PV auch neue Perspektiven im Bereich des Wassermanagements: Die Teilverschattung durch PV-Module kann die Verdunstung auf landwirtschaftlichen Flächen signifikant reduzieren und damit zur effizienteren Nutzung von Wasserressourcen beitragen. In trockenen oder von Wasserknappheit betroffenen Regionen kann dies die Bewässerungsbedarfe senken und die Resilienz der landwirtschaftlichen Produktion gegenüber klimabedingtem Wasserstress erhöhen. Somit kann Agri-PV nicht nur einen Beitrag zur Energiewende und Flächeneffizienz leisten, sondern auch zur nachhaltigen Bewirtschaftung von Wasser in der Landwirtschaft.

In Deutschland existieren bis dato allerdings erst wenige Agri-PV-Anlagen. Zudem ist Agri-PV im Vergleich zu Agroforstsystemen noch nicht umfassend wissenschaftlich untersucht. Untersuchungsbedarf besteht zur Optimierung der Anlagen (Größe und Abstände), zur Auswahl der Kulturen, zum pflanzenbaulichen Management und auch zu induzierten Mikroklimaveränderungen. Aus technischer Sicht wird weiter an einem gezielten Lichtmanagement unterhalb der Module geforscht, um Pflanzen beispielsweise in wichtigen

Wachstumsperioden mehr Licht zur Verfügung zu stellen. Zudem werden Gewächshaussysteme erforscht, bei denen PV-Anlagen in das Gewächshausdach integriert werden.

Die sichere Versorgung mit Solarkomponenten ist gegenwärtig problematisch, weil China mit Marktanteilen von über 80 % alle Wertschöpfungsstufen beherrscht [4]. Das gefährdet auch die weitere Verbreitung von Agri-PV: „Ein Einbruch im Handel mit China würde den PV-Ausbau in Deutschland ernsthaft gefährden und zusätzlich die hiesige Modulproduktion wegen fehlender Vorprodukte stark beeinträchtigen“ [4].

Wiedervernässung von Mooren und Paludikultur

Das Thema Wiedervernässung spielt vor allem vor dem Hintergrund der enormen Kohlenstoff-Speicherpotenziale der Moore eine Rolle und wird zunehmend diskutiert und umgesetzt. Die Wiedervernässung selbst kommt nur langsam voran und wird als sehr komplexe und herausfordernde Aufgabe eingestuft [5]. Landwirtschaft auf wiedervernässten Moorflächen mit Torferhalt, als Paludikultur bezeichnet, führt deshalb derzeit noch ein Nischendasein. Es gibt nur wenige praktische Erfahrungen und es fehlen Anreize sowie Nachfrage für eine Umstellung der landwirtschaftlichen Produktion auf Paludikultur und für die Nutzung von Paludi-Biomasse [16]. Das könnte sich aber mit Blick auf 2050 aufgrund der großen Klimaschutzpotenziale ändern.

Es ist davon auszugehen, dass für die Bewertung, das Monitoring und die Erfolgskontrolle von Wiedervernässungs- und Renaturierungsprojekten vermehrt innovative Methoden der Fernerkundung, der Umwelt-DNA-Biodiversitätsforschung sowie der künstlichen Intelligenz eingesetzt werden. Die so gewonnenen Daten und Informationen müssen kuratiert, langfristig gesichert und Dritten zur Verfügung gestellt werden. So fördert das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) derzeit 14 Forschungsprojekte im Rahmen des Programms „Methoden der Künstlichen Intelligenz als Instrument der Biodiversitätsforschung“ [5].

In der Landwirtschaft vollzieht sich gegenwärtig ein Paradigmenwechsel: Über Jahrzehnte bis Jahrhunderte stand die gefahrlose Ableitung von Wasser im Vordergrund – hierfür wurden in Moorlandschaften großflächige Meliorationssysteme, also technische

Entwässerungs- und Bodenverbesserungsanlagen installiert. Heute muss Melioration neu gedacht werden: Wasserrückhalt bildet die Grundlage einer Bodennutzung, die Degradierung und Torfschwund entgegenwirkt. Paludikulturen eröffnen dabei die Möglichkeit, Moorbodenschutz mit den ökonomischen Interessen von Eigentümer/innen und Nutzer/innen zu verbinden [\[17\]](#).

Die Wiedervernässung ist eine große politische und gesellschaftliche Herausforderung. Es gibt eine Vielzahl von Faktoren, die die schnelle Wiedervernässung hemmen oder verhindern. So macht bspw. die geringe Verfügbarkeit von Wasser die Wiedervernässung in einigen Regionen unmöglich. Der Planungsaufwand für die Durchführung einer Wiedervernässung ist relativ hoch und bedarf meist mehrerer Jahre Vorlauf; zuständig für die Genehmigungen sind die Bundesländer. Zudem liegen etwa 90.000 ha Moorböden unter Siedlungsflächen oder Straßen, die abgetragen werden müssten. Schließlich stehen auch konkurrierende landwirtschaftliche und andere Nutzungsinteressen im Raum, die erhebliche Zielkonflikte erzeugen, zumal Eigentümer/innen derzeit nicht verpflichtet sind, Moorböden wiederzuvernässen.

Potenziale und Entwicklungsdynamiken

Derzeit sind diese neuen Bewirtschaftungsformen Nischenanwendungen in der Landwirtschaft. Die Realisierung ihrer Resilienzpotenziale ist daher noch mit Unsicherheiten und Hemmnissen verbunden. Diese betreffen die wirtschaftlichen sowie die damit korrespondierenden ordnungs-, planungs- und förderrechtlichen Rahmenbedingungen. Die Umstellung oder Erweiterung von Betriebszweigen ist für landwirtschaftliche Betriebe mit teilweise hohen ökonomischen Risiken und Planungsunsicherheiten verbunden. Neue Geschäftsmodelle befinden sich noch in der Entwicklungs- und Erprobungsphase.

Wie sich die neuen Bewirtschaftungsformen entwickeln und verbreiten, ist von verschiedenen Rahmenbedingungen abhängig, v.a. von den regionalen Gegebenheiten sowie von agrarpolitischen und rechtlichen Rahmensetzungen. Hierzu gehören Förderprogramme, eine Anpassung der GAP Öko-Regelungen sowie ein geeigneter Wissenstransfer in die Praxis durch Bildung und Beratung. Einen wichtigen Schub für die Wettbewerbsfähigkeit könnten neue klima- und umweltfreundliche Bewirtschaftungsformen durch eine Internalisierung externer Kosten erhalten. Wenn Mechanismen geschaffen werden, die

umweltschädliche Auswirkungen in den Produktpreis mit einbeziehen, könnte das die Attraktivität und Konkurrenzfähigkeit der hier beschriebenen Ansätze deutlich steigern [\[18\]](#).

Ein wachsender Anteil von landwirtschaftlichen Flächen, auf denen Agroforstwirtschaft oder Agri-PV betrieben wird, könnte die künstliche Bewässerung und damit die landwirtschaftliche Wasserentnahme und den Wasserbedarf auf lange Sicht reduzieren [\[4\]\[19\]](#). Profitieren könnten besonders Regionen, die von einem geringem Wasserdargebot betroffen sind. Darüber hinaus kann der Schutz vor starken Niederschlägen und Hagel erhöht werden. Die breite Anwendung der Paludikultur würde dazu beitragen, die natürliche Wasserregulationsfunktion der Moore zu erhalten: In den Sommermonaten, wenn Pflanzen mehr Wasser benötigen und die Verdunstung steigt, geben nasse Moorböden überschüssiges Wasser an die Umgebung ab. Dadurch kann der erhöhte Wasserbedarf in Dürre- und Trockenphasen teilweise gedeckt und zugleich ein übermäßiges Absinken des Grundwasserspiegels verhindert werden.

Agroforstsysteme

Die Potenziale der Agroforstsysteme in Bezug auf die Kohlenstoffbindung durch den Anbau von Energieholz wurde unter anderem durch die BTU Cottbus ermittelt [\[20\]](#). Energieholz, also schnellwachsendes Holz, das zur energetischen Verwertung genutzt wird, spielt dabei eine zentrale Rolle, da es CO₂ aus der Atmosphäre bindet und gleichzeitig als klimaneutraler Brennstoff dienen kann. Die Studie kam zu folgendem Ergebnis: Wenn auf 50 % der Ackerfläche in Deutschland Agroforstwirtschaft betrieben würde (davon 10 % für den Anbau von Agroforstgehölzen), könnten jährlich ca. 10 Mio. t CO₂-Äqu. in der Holzbiomasse gebunden werden [\[20\]](#). Das entspricht fast 20 % der THG-Emissionen in der Landwirtschaft aus dem Jahr 2024 [\[21\]](#).

Die durchschnittlichen Effekte von Agroforstsystemen auf das Wassermanagement in der Landwirtschaft sind anhand wissenschaftlicher Untersuchungen und praktischer Anwendung gut belegt. Agroforstsysteme wirken sich positiv auf die Resilienz der Agrarlandschaften gegenüber Wetterextremen aus. Aufgrund der Verschattung und der Reduzierung von Windgeschwindigkeiten wird die Resilienz gegenüber Dürren, Hitze, Erosion und Starkregen gefördert. In Untersuchungen in Brandenburg wurde ermittelt, dass durchschnittlich

28 % weniger potenzielle Bodenverdunstung im Bereich von Ackerkulturen möglich ist [3]. Ein höherer Wasser- und Sedimentrückhalt kann bei dauerhaft begrünten Gehölzreihen erreicht werden. Zudem tragen Agroforstsysteme aufgrund des Wasserrückhalts zu geringeren Boden- und Schadstoffeinträgen in angrenzende Gewässer bei [2].

Agri-PV

Die Verbreitungspotenziale von Agri-PV sind in Studien wissenschaftlich untersucht worden. Das Fraunhofer ISE geht davon aus, dass in Deutschland ein Potenzial von 1.700 GWp (Gigawatt Peak, beschreibt die maximale elektrische Leistung einer Solaranlage unter optimalen Bedingungen) besteht. Demnach würden theoretisch 4 % der deutschen Agrarflächen ausreichen, um mit hoch aufgeständerten Agri-PV-Anlagen den gesamten aktuellen Strombedarf Deutschlands zu decken [4]. Dies entspricht einer Fläche von etwa 29.100 km². Ein besonders hohes Potenzial von Agri-PV wird in Regionen mit Flächenknappheit und trockenen Böden (aride Klimazonen) gesehen.

Die Kombination von Energieerzeugung und effizientem Wasserverbrauch macht landwirtschaftliche Betriebe widerstandsfähiger gegenüber Wassermangel und extremen Wetterbedingungen. In Bezug auf das Wassermanagement ist die Anordnung der PV-Module entscheidend, damit nicht zu viel Wasser abgeleitet wird, sondern das Auffangen und Speichern von Regenwasser erreicht werden kann. Letzteres führt zur Schonung von Grundwasservorräten bzw. ermöglicht überhaupt erst die landwirtschaftliche Nutzung [4].

Wiedervernässung von Mooren und Paludikultur

Bei der Wiedervernässung von Mooren ist problematisch, dass sie nicht auf einzelnen Flächen, sondern nur für den gesamten Moor- bzw. Grundwasserkörper erfolgen kann. Einzelne Flächen müssten mittels Bodensperren vom Rest abgetrennt werden, was teuer und aufwändig ist. Die Wiedervernässung setzt Wasserverfügbarkeit und ein Wassermanagement vor Ort voraus. Es ist deshalb sinnvoll, in Einzugsgebieten zu denken und zu planen. Mit Blick auf die Etablierung verschiedener Paludikulturen bestehen derzeit noch Hemmnisse aufgrund fehlender Langzeiterfahrungen und der zu langsamen

Transformation hin zur Nutzung alternativer Materialien aus Moorpflanzen für Bau- und Dämmstoffe und der entsprechend geringeren Nachfrage nach Paludi-Biomasse. Pflanzen, die sich für Paludikultur eignen, sind bspw. Schilfröhricht und Rohrkolbenröhricht (für Bau- und Dämmstoffprodukte), Großseggenried oder Rohrglanzgraswiese (z. B. für die Herstellung von Faserplatten im Möbelbau). Auch der notwendige Finanzbedarf für die Umstellung der landwirtschaftlichen Nutzung auf die Paludikultur stellt eine Hürde dar [\[22\]](#)[\[16\]](#). Vorbehalte betroffener Akteure, wie etwa Sorgen über Einbußen materieller Werte, beispielsweise durch sinkende Grundstückswerte oder den Verlust des Ackerstatus (d. h. die rechtliche Einstufung einer Fläche als Ackerland mit entsprechender Nutzungsmöglichkeit), führen bereits heute zu einer ablehnenden Haltung gegenüber Maßnahmen zur Moorzurückgewinnung. Laut UBA werden nicht alle wiedervernässten Flächen landwirtschaftlich weiter genutzt werden können. Es ist davon auszugehen, dass auf 80 % der derzeit landwirtschaftlich genutzten Moorflächen eine Umstellung auf Paludikultur möglich wäre [\[16\]](#).

Für Moor-Photovoltaik (Moor-PV) als weitere Integrationsstufe wird in Deutschland ein geschätztes technisches Potenzial von 440 bis 880 GWp angenommen. Dies entspricht ungefähr dem Vier- bis Achtfachen der derzeit in Deutschland installierten Photovoltaik-Leistung und verdeutlicht das enorme Energiepotenzial dieser Nutzung. Die Herausforderungen dieser Nutzungsart liegen unter anderem in der erforderlichen Zusammenarbeit vieler Akteure bei der Entwicklung notwendiger Spezialmaschinen für Installation, Wartung und Rückbau der Moor-PV-Anlagen sowie in der Sicherstellung von ausreichend Licht für standortangepasste und torfschützende Vegetation. Noch gibt es international wie auch in Deutschland nur wenige Pilotprojekte.

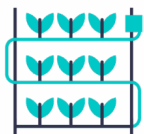
Referenzen

1. LfL (2024): Agroforstsysteme in Bayern. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, www.lfl.bayern.de (21.01.2025)
2. Möckel, S. et al. (2024): Zukunftsfähige Agrarlandschaften in Deutschland – praktische Maßnahmen und ihre Wirksamkeit im Vergleich. In: NuR 46(1), S. 13–24, DOI: 10.1007/s10357-023-4282-y
3. Kanzler, M.; Böhm, C. (2020): Agroforstliche Landnutzung als Anpassungsstrategie an den Klimawandel am Beispiel von Untersuchungen zum Verdunstungsschutz in Süd-Brandenburg. Loseblattsammlung Innovationsgruppe AUFWERTEN, Loseblatt # 7

4. Fraunhofer ISE (2024): Agri-Photovoltaik: Chance für Landwirtschaft und Energiewende. Ein Leitfaden für Deutschland. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, www.ise.fraunhofer.de (04.07.2025)
5. Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina (2024): Klima – Wasserhaushalt – Biodiversität: für eine integrierende Nutzung von Mooren und Auen, Halle (Saale)
6. Günzel, J.; Pällicke, E. (2022): Agroforst: Das wiederentdeckte Anbausystem. In: Ökologie & Landbau (203), S. 12-14
7. Herder, M. et al. (2017): Current extent and stratification of agroforestry in the European Union. In: Agriculture, Ecosystems & Environment 241, S. 121–132, DOI: 10.1016/j.agee.2017.03.005
8. DeFAF (2023): Uebersicht zu Agroforstflaechen in Deutschland 2023. Deutscher Fachverband für Agroforstwirtschaft, Cottbus, www.agroforst-info.de (31.12.2023)
9. Morhart C. et al. (Hg.) (2023): 9. Forum Agroforstsysteme – Landwirtschaft zukunftsfähig gestalten. Freiburg
10. TAB (2021): Digitalisierung der Landwirtschaft: technologischer Stand und Perspektiven. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, (Autor/innen: Kehl, C.; Meyer, R.; Steiger, S.) Teil I des Endberichts zum TA-Projekt, Arbeitsbericht Nr. 193, Berlin
11. Fortune Business Insights (2025): Analyse der Marktgröße, des Marktanteils und der Branchentrends für landwirtschaftliche Roboter. www.fortunebusinessinsights.com (21.01.2025)
12. BMEL (2024): GAP-Strategieplan. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, www.bmel.de (12.08.2025)
13. DeFAF (2024): Agroforstsysteme in der GAP ab 2023 – ein Überblick. Deutscher Fachverband für Agroforstwirtschaft, Cottbus, www.agroforst-info.de (Feb 2024)
14. Böhm, C.; Hübner, R. (Hg.) (2020): Bäume als Bereicherung für landwirtschaftliche Flächen. Ein Innovationskonzept für die verstärkte Umsetzung der Agroforstwirtschaft in Deutschland. Bayreuth
15. Feuerbacher et al. (2022): Estimating the economics and adoption potential of agrivoltaics in Germany using a farm-level bottom-up approach. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 168, DOI: 10.1016/j.rser.2022.112784
16. Schäfer, A. et al. (2022): Anreize für Paludikultur zur Umsetzung der Klimaschutzziele 2030 und 2050. Umweltbundesamt, Climate Change 44/2022, Dessau-Roßlau, www.umweltbundesamt.de
17. Närmann, F. et al. (Hg.) (2021): Klimaschonende, biodiversitätsfördernde Bewirtschaftung von Niedermoorböden. BfN-Skripten 616, Bonn-Bad Godesberg

18. Behrendt, S. et. al. (2023): Treiber, Diskurse und Transformationsszenarien. Experimentierfeld Agro-Nordwest, www.agro-nordwest.de (21.11.2023)
19. Meinardi, D.; Rötcher, K. (2024): Wassermanagement unter einer Agri-Photovoltaik-Anlage. www.wissenhoch.n.de (29.04.2024)
20. Tsonkova, P.; Böhm, C. (2020): CO₂-Bindung durch Agroforst-Gehölze als Beitrag zum Klimaschutz. Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, Loseblatt Nr. 6, Cottbus
21. UBA (2025b): Beitrag der Landwirtschaft zu den Treibhausgas-Emissionen. Umweltbundesamt, 26.05.2025, <https://www.umweltbundesamt.de> (30.05.2025)
22. Nordt et al. (2022): Leitfaden für die Umsetzung von Paludikultur. Greifswald Moor Centrum-Schriftenreihe 05/2022, Greifswald Greifswald, www.greifswaldmoor.de

Geschlossene Produktionssysteme



Geschlossene Produktionssysteme in der Landwirtschaft sind hoch kontrollierte, von äußeren Einflüssen abgeschirmte Systeme, die eine besonders wassereffiziente und nachhaltigere Produktion versprechen. Der Verzicht auf Boden verhindert Wasserverluste durch Versickern oder Verdunstung, während Recyclingverfahren den Gesamtwasserbedarf zusätzlich senken [1][2]. In vertikalen Farmen

zirkulieren Wasser und Nährstoffe in Kreisläufen, wodurch im Vergleich zur konventionellen Landwirtschaft bis zu 95 % weniger Wasser benötigt wird. Auch kultiviertes Fleisch und Präzisionsfermentation reduzieren den Wasserverbrauch durch gezielte Ressourcennutzung und vermeiden zugleich Einträge in natürliche Kreisläufe. Die automatisierte Steuerung von Temperatur, Licht und Luftfeuchtigkeit macht diese Systeme widerstandsfähiger gegenüber Dürreperioden, reduziert den Bedarf an großflächiger Bewässerung und bietet zugleich Schutz vor Wetterextremen wie Hagel oder Starkregen [3][4]. Die Isolierung senkt zudem das Risiko Schädlingsbefall und Krankheiten [5][1]. Ein deutlicher Vorteil ist der geringe Flächenbedarf: geschlossene Systeme ermöglichen saisonunabhängige, urbane bzw. auf begrenzten Flächen betriebene Produktion, entlasten landwirtschaftliche Böden und reduzieren Abhängigkeiten von globalen Lieferketten sowie Transportemissionen [3][4]. Obwohl geschlossene

Produktionssysteme derzeit noch Nischenanwendungen sind, besitzen sie großes Potenzial für mehr Resilienz und Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft. Dies gilt insbesondere für den Einsatz in wasserarmen Regionen.

Im Folgenden werden der Status quo sowie die [Potenziale und Entwicklungsdynamiken](#) in diesem strategischen Themenfeld beschrieben.

Status quo

Vor dem Hintergrund der Herausforderungen des bestehenden Agrarsystems rücken sogenannte „New Food Systems“ oder „Neue Agrarsysteme ohne Ackerbau und Viehhaltung“ zunehmend in den Fokus von Forschung und Innovationsdebatten. Alternative geschlossene Agrarsysteme umfassen den Anbau von Pflanzen in ackerlosen, geschlossenen Produktionssystemen, auch Indoor oder Vertical Farming genannt, sowie zelluläre Biosysteme (z.B. kultiviertes Fleisch). Die Systeme sind weitgehend unabhängig von Umweltfaktoren wie Saison und Klima. Auf das Wassermanagement wirken sie sich auf unterschiedliche Arten aus: Sie benötigen weniger Wasser und können so die Wassernachfrage der Landwirtschaft senken, außerdem können sie durch weniger Schadstoffeinträge zur Wasserqualität beitragen und die angebauten Pflanzen sind vor Wetterextremen wie Hagel oder Starkregen geschützt. Darüber hinaus können geschlossene Anbausysteme durch freiwerdende Flächen einen indirekten Beitrag zur Stabilisierung des Wasserhaushalts leisten.

Vertical Farming

Beim Vertical Farming werden Pflanzen nicht nur ohne Acker, also ohne Erde, sondern in der Regel auch ohne Sonneneinstrahlung und unter kontrollierten Bedingungen angebaut. Licht wird über (LED-)Beleuchtungssysteme eingebracht, Nährstoffe erhalten die Pflanzen über Nährstofflösungen. Je nach Ansatz wird die Nährstofflösung durch Bewässerung oder durch Nebel zugeführt (Hydroponik bzw. Aeroponik) [\[1\]](#). Charakteristisch ist zudem die Raumnutzung: Pflanzen werden in Regalsystemen übereinander gestapelt oder in vertikalen Textilsäulen angebaut [\[2\]](#).

Vertical Farming nutzt geschlossene Bewässerungssysteme: Das zugeführte Wasser verlässt das System nicht, sondern zirkuliert darin.

Nach einiger Zeit ist es nötig die Nährstofflösung aufzufrischen, wozu dem System neues Wasser zugeführt werden muss; allerdings sind die Zyklen lang und betragen beispielsweise bei der Kultivierung von Tomaten ca. neun bis elf Monate. Die Systeme benötigen viel weniger Wasser als konventionelle Anbaumethoden, da die Temperatur über Klimageräte reguliert wird, Feuchtigkeit durch Rekondensation im Bewässerungszyklus verbleibt und das zur Bewässerung genutzte Wasser nicht ins Grundwasser versickert [\[1\]\[2\]](#). Durch die Unabhängigkeit von der Saison und die Effizienz der Systeme können in schnellen Zyklen mehrere Ernten über das ganze Jahr erzielt werden [\[2\]\[3\]\[6\]](#).

Wie stark die Effekte auf das Wassermanagement sein können, hängt davon ab, bis zu welchem Grad Vertical Farming herkömmliche Anbaumethoden ersetzen kann. Damit Vertical Farming sich in Deutschland in einem Maßstab etablieren kann, der groß genug ist, um herkömmliche Anbaumethoden wesentlich zu ergänzen, sind Entwicklungen in vier Feldern notwendig: (1) technische Effizienz (v.a. Senkung der Energiebedarfe), (2) eine Erweiterung der Palette von Kulturen, deren Anbau in vertikalen Farmen effizient möglich ist (beispielsweise auch Feldfrüchte), (3) wirtschaftliche Rentabilität (z.B. Energiepreis, Baukosten, aber auch regulatorische Faktoren) und (4) gesellschaftliche Akzeptanz.

Das vollständig geschlossene System mit Nutzung künstlicher Beleuchtungssysteme sowie dem Einsatz von Heizung, Lüftung und Klimatisierung macht einerseits den sehr niedrigen Wasserverbrauch und die sehr hohe Raumeffizienz von Vertical Farming möglich. Andererseits führen diese Elemente auch zu Herausforderungen, vor allem einem hohen Energiebedarf [\[1\]](#). Ein Ziel der technischen Forschung und Entwicklung ist daher, die Energieeffizienz zu erhöhen.

Ein wesentlicher Teil des Energieverbrauchs ist auf die Beleuchtung zurückzuführen [\[1\]\[7\]](#). Daher wird an Methoden noch gezielterer Beleuchtung geforscht [\[2\]](#). Durch Variation des Materials von Regalsystemen kann Beleuchtungsenergie eingespart werden, unter anderem durch reduzierte Abstrahlung oder Teiltransparenz [\[3\]](#). Alternative Materialien kombiniert mit anderen, dichtener Aufbaustrukturen, können weitere Effizienzgewinne ermöglichen, beispielsweise die Nutzung von vertikalen Textilsäulen [\[3\]](#). Zudem beschäftigt sich die Forschung mit innovativen, etwa thermochromen Materialien, die sich an Temperaturen anpassen und beispielsweise eine variable Lichtdurchlässigkeit ermöglichen können, wodurch

Energiebedarfe für Beleuchtung sowie Heizung und Klimatisierung reduziert werden könnten [3].

Der Frischwasserverbrauch lässt sich durch die Nutzung alternativer Wasserarten weiter senken, etwa durch den Einsatz von Regewassersammelsystemen [3][8]. Es bestehen zudem Synergiepotenziale mit der Abwasserentsorgung: aufbereitetes Abwasser kann für hydroponische Systeme genutzt werden, so können einerseits die Nährstoffe aus dem Abwasser genutzt und andererseits durch Wasserwiederverwendung die Wasserressourceneffizienz erhöht werden [8]. Eine Variante geschlossener Systeme setzt Organismen ein, die in überwiegend salinen Umgebungen gedeihen, wodurch der Bedarf an Süßwasser reduziert werden kann [9]. Darüber hinaus werden innovative Materialien entwickelt, die in der Lage sind, atmosphärische Feuchtigkeit aufzunehmen und diese gezielt für Zwecke der Bewässerung oder Klimatisierung bereitzustellen [3].

Für die weitere Verbreitung von Vertical Farming ist es von großer Bedeutung, welche Kulturen angebaut werden können und wie es gelingt, möglichst effizient möglichst viele Kulturen anzubauen und die Erträge pro Quadratmeter zu erhöhen. Dies ist Gegenstand der Forschung. Anfangs wurden vor allem besonders geeignete, niedrig wachsende Pflanzen mit schnellen Reifezyklen angebaut, z. B. Salate, Microgreens (junge, essbare Keimpflanzen) und Kräuter [1]. Mittlerweile werden in vertikalen Farmen auch Gemüse wie Tomaten, Paprika, Brokkoli produziert sowie „high value crops“ wie medizinische Pflanzen und Beeren [3][10]. In Forschungsprojekten wird auch erfolgreich Weizen angepflanzt – allerdings derzeit mit sehr hohen Energie- und Platzbedarfen [7]. Durch speziell auf Vertical Farming ausgerichtete Züchtung kann es in Zukunft möglich werden, weitere Kulturen anzubauen sowie die Erträge zu erhöhen. Darüber hinaus gibt es Potenziale, den Anbau in vertikalen Farmen durch eine geeignete Gestaltung des wurzelassoziierten Mikrobioms effizienter zu machen [1].

Neben der Vergrößerung der Palette von Kulturen, die sich für Vertical Farming eignen, gibt es auch Synergiepotenziale mit der Zucht anderer Organismen. Aquaponik-Ansätze nutzen die Abfallprodukte aus der Fischzucht zur Nährstoffversorgung von Pflanzen, die ihrerseits das Wasser reinigen, sodass es der Fischzucht wieder zugeführt werden kann [3][11]. Auch die Zucht von Insekten, die im Vergleich mit anderem tierischen Protein weniger Wasser benötigt, kann zusammen mit Aquaponik in einen Vertical-Farming-Kreislauf integriert werden [3].

Die Pflanzenabfälle dienen als Nahrung für die Insekten, die Insektenrückstände können als Fischfutter genutzt werden und die Abfallprodukte aus der Fischzucht können, wie erwähnt, als Nährstoffquelle für die Pflanzen dienen.

Sowohl hohe Betriebs- als auch hohe Investitionskosten hemmen derzeit die Verbreitung von Vertical-Farming-Ansätzen. Die hohen Betriebskosten werden maßgeblich von den Energiepreisen beeinflusst, da der Energieverbrauch, wie beschrieben, hoch ist [\[3\]\[2\]\[7\]](#). Energieeffizientere Prozesse, eine Integration von erneuerbarer Energieproduktion in das System sowie niedrigere Energiepreise können die Betriebskosten senken. Auch Lohnkosten können erheblich zu den Betriebskosten beitragen. Die Automatisierung bzw. Digitalisierung der Prozesse kann dem entgegenwirken sowie die Effizienz insgesamt steigern, kreiert aber gleichzeitig Bedarfe an Arbeitskräften mit technischem Fachwissen [\[3\]](#). Die Rentabilität von Vertical Farming hängt auch von den Lebensmittelpreisen ab und wird erschwert, wenn Konkurrenzprodukte, beispielsweise durch Subventionen, günstig sind.

Die Investitionskosten von Vertical-Farming-Systemen sind ebenfalls hoch. Neben den Grundstückspreisen, die vor allem in urbanen Räumen sehr teuer sind, fallen sehr hohe Baukosten an, die deutlich höher sein können als die Kosten für Gewächshausanlagen [\[1\]\[2\]](#). Die Umnutzung bestehender (Industrie-)Gebäude kann diese Kosten reduzieren, allerdings kann es regulatorische Einschränkungen geben [\[3\]](#). Je nach angebauter Kultur sind die Platzbedarfe und damit die Baukosten unterschiedlich, vor allem für Weizen wären sehr große und sehr hohe Gebäude nötig, was die Investitionskosten besonders in die Höhe treibt [\[7\]](#).

Nachfrageseitig ist die gesellschaftliche Akzeptanz von Produkten aus Vertical Farming zentral. Es gibt in Deutschland erhebliche gesellschaftliche Skepsis gegenüber ackerlosen Systemen, die teilweise als unnatürlich und ungesund wahrgenommen werden. Der Grad der Informiertheit bei Konsument/innen ist eher gering [\[1\]](#). Gleichzeitig ist die Nachfrage nach lokalen Produkten ohne Pestizide gestiegen, für die es teilweise hochpreisige Marktsegmente gibt. Um solche Attribute bei Produkten aus Vertical-Farming-Systemen hervorzuheben, sind Label hilfreich. In manchen Ländern, beispielsweise den Vereinigten Staaten, können Produkte aus Vertical Farming mit Bio-Labeln ausgezeichnet werden. In der EU ist das für den ackerlosen Anbau bislang nicht möglich [\[1\]\[8\]](#). Auch bei Systemen, die Nährstoffe aus dem Abwasser

nutzen, besteht bei Konsument/innen Informationsbedarf; entsprechendes Wissen vorausgesetzt, kann jedoch voraussichtlich ein hohes Produktvertrauen erreicht werden [8].

Die Akzeptanz von Vertical Farming bzw. der dafür nötigen, teilweise sehr großen Gebäude ist unterschiedlich hoch – in (ehemaligen) Industriegebieten ist sie tendenziell höher [8]. Landwirt/innen begegnen dem Konzept des Vertical Farming mit teils skeptischer, teils offener Haltung, letzteres vor allem im Hinblick auf längerfristige Perspektiven. Diese Haltung scheint wesentlich davon abzuhängen, inwieweit Vertical-Farming-Ansätze auch konkrete Chancen für Landwirt/innen eröffnen und wie diese Potenziale kommuniziert werden.

Zelluläre Lebensmittelproduktion

In der Zellulären Lebensmittelproduktion werden durch biotechnologische Verfahren Produkte hergestellt, die in molekularer Hinsicht tierischen Lebensmitteln gleichen. Dabei kommen unterschiedliche Technologien zum Einsatz:

Die Produktion von **zellkulturbasierten Fleischprodukten** erfolgt durch Tissue-Engineering-Techniken (Gewebezüchtung) in einer kontrollierten, geschlossenen Umgebung. Muskelzellen werden in einem Nährmedium kultiviert und in einem Bioreaktor zum Wachstum angeregt. Anschließend werden sie auf ein Trägergerüst transferiert, wo eine Muskelfaserstruktur entsteht [4][12].

Präzisionsfermentation wird unter anderem genutzt, um tierfreie Milchprodukte herzustellen, und spielt z.T. auch in der Herstellung von Fleischersatzprodukten eine Rolle. Bei der Präzisionsfermentation werden Mikroorganismen genetisch so programmiert, dass sie spezifische Proteine synthetisieren. Unter Zugabe von Nährstoffen und Zucker können dann die entsprechenden Proteine, wie z.B. Milchproteine, im Bioreaktor hergestellt werden. Diese werden beispielsweise mit Wasser oder Pflanzenfetten kombiniert, um tierfreie Milchprodukte zu erzeugen [12][13][14].

Im Vergleich zu Vertical Farming befindet sich die Produktion von **zellkulturbasierten Fleischprodukten** in einem frühen Entwicklungsstadium. Damit sie kommerziell erfolgreich sein und dadurch herkömmliche Nutztierhaltung in relevantem Maße ersetzen kann, bedarf es weiterer Fortschritte in der technischen Entwicklung, der Wirtschaftlichkeit sowie der gesellschaftlichen Akzeptanz.

Bei der Produktion von kultiviertem Fleisch werden derzeit noch in mehreren Bereichen tierische Bestandteile genutzt, sowohl bei der Gewinnung von Muskelstammzellen als auch bei der Erzeugung von Nährmedien und Trägerstrukturen [5]. Für diese Komponenten, die zugleich auch mit die größten Kosten verursachen, wird intensiv an Alternativen geforscht. Es ist zu erwarten, dass solche Alternativen zukünftig zumindest teilweise verfügbar sein werden [5].

Wie beim Vertical Farming ist auch bei kultiviertem Fleisch der aktuell sehr hohe Energiebedarf ein wichtiger Faktor für die weitere Entwicklung und Verbreitung. Vor allem für die Produktion des Nährmediums sowie den Betrieb des Bioreaktors wird derzeit viel Energie benötigt [4]. Weitere Forschung, vor allem hinsichtlich Kühlung und Wärmezufuhr, kann helfen, die Energieeffizienz zu steigern und damit den Energieverbrauch und die damit verbundenen Kosten deutlich zu senken [5].

Die Herstellungskosten für kultiviertes Fleisch sind zwar gesunken, liegen aber nach wie vor deutlich über denen vergleichbarer konventioneller Fleischprodukte [15]. Dies ist u.a. auf die hohen Produktionskosten für die benötigten Nähr- und Wachstumsmedien zurückzuführen. Weitere deutliche Kostensenkungen könnten u.a. dadurch erschwert werden, dass die starken Interessen der herkömmlichen Fleischindustrie, die sich teilweise deutlich von denen einer zukünftigen Fleischindustrie zellkulturbasierter Fleischproduktion unterscheiden, Forschung und Entwicklung in diesem Bereich hemmen [4].

Die Investitionskosten für Anlagen für die Produktion von kultiviertem Fleisch sind hoch, etwas günstiger wäre die Umrüstung von existierenden Fermentationsanlagen [12].

Da kultiviertes Fleisch bisher nur in Einzelfällen kommerziell verfügbar ist, lässt sich die Entwicklung von Akzeptanz und Nachfrage derzeit nur schwer einschätzen. Die Akzeptanz wird unter anderem durch eine „Natürlichkeits-Heuristik“ geschwächt, die davon ausgeht, dass die „Unnatürlichkeit“ eines Produkts negativ bewertet wird [5][4]. Weitere Faktoren, die sich negativ auf die Akzeptanz auswirken, sind Skepsis hinsichtlich der Konkurrenzfähigkeit von kultiviertem im Vergleich zu konventionellem Fleisch bezüglich Geschmack und Umweltverträglichkeit sowie Zweifel an der Produktsicherheit [5]. Positiv könnten sich hingegen ethische Aspekte, insbesondere hinsichtlich des Tierwohls, auf Akzeptanz und Nachfrage zellbasierter Fleischprodukte auswirken [16].

Präzisionsfermentation ist in anderen Anwendungsbereichen als der Nahrungsmittelproduktion etabliert, beispielsweise in der Medizin. Als Verfahren zur Herstellung tierfreier Milchprodukte wird sie bisher vor allem im Labor- und Pilotmaßstab erprobt [\[12\]](#)[\[13\]](#).

Bei der Präzisionsfermentation entfällt ein Großteil des Ressourcenverbrauchs auf die Produktion von Zucker als Nährmedium. Als alternative und ggf. kostengünstigere Nährmedien kommen unter anderem Abfallprodukte aus der Landwirtschaft oder der Lebensmittelproduktion infrage. Es gibt allerdings noch offene Fragen zum mikrobiellen Stoffwechsel bei der Nutzung dieser alternativen Nährmedien sowie zu Logistik und Kosten [\[12\]](#).

Investitionen in Präzisionsfermentation werden zusätzlich durch Unklarheiten im Regulierungsrahmen der EU erschwert [\[17\]](#). Falls sich im Endprodukt gentechnisch veränderte Organismen oder ihre Rückstände befinden, fallen Produkte aus Präzisionsfermentation unter den Regulierungsrahmen für gentechnisch veränderte Lebensmittel, ansonsten unter die Novel-Food-Verordnung (EU) 2015/2283. Beide Zulassungsverfahren sind mit hohen regulatorischen Anforderungen verbunden. Deshalb ist es für Unternehmen wichtig, frühzeitig den zutreffenden Rechtsrahmen zu kennen, was bei Unklarheiten beim Klassifizierungsprozess schwierig sein kann [\[17\]](#).

Hinsichtlich zunehmender Akzeptanz und wachsender Nachfrage bestehen bei Milchprodukten aus Präzisionsfermentation tendenziell größere Chancen als bei kultiviertem Fleisch. Eine Studie mit potenziellen Frühadoptierer/innen deutet auf verhaltene Offenheit hin, wobei Geschmack und genetische Veränderungen kritisch betrachtet werden [\[12\]](#)[\[13\]](#). Positiv auf die Akzeptanz könnten sich die Möglichkeit, laktose- und antibiotikafreie Produkte anzubieten sowie den Nährstoffgehalts präzise anpassen zu können, auswirken [\[14\]](#).

Potenziale und Entwicklungsdynamiken

Die konkreten Resilienzpotenziale von geschlossenen Systemen hinsichtlich der Auswirkungen auf das Wassermanagement in Deutschland sind schwer abzuschätzen. Einerseits hängt ihr Einfluss maßgeblich von ihrer zukünftigen Verbreitung ab, andererseits bestehen noch offene Fragen hinsichtlich der Nachhaltigkeitsbilanz. Eine plausible These lautet, dass geschlossene Produktionssysteme prinzipiell die Resilienz der Landwirtschaft deutlich steigern können,

indem sie Abhängigkeiten von externen Ressourcen (vor allem Wasser) und Umwelteinflüssen verringern.

Für das Wassermanagement bieten geschlossene Produktionssysteme zudem auch unabhängig von Klimabedingungen den Vorteil, dass aufgrund der zirkulären Verfahren insgesamt weniger Wasser benötigt wird und Verluste durch Versickern oder Verdunstung vermieden werden [\[1\]\[2\]](#). Vertical Farming erfordert einen um ein Vielfaches geringeren Wassereinsatz als die herkömmliche Landwirtschaft, teilweise um bis zu 95 % weniger [\[1\]](#). Dies gilt sowohl verglichen mit Freilandanbau als auch mit Anbau in Gewächshäusern [\[1\]](#).

Im Fall von kultiviertem Fleisch ist aufgrund des frühen Adoptionsstadiums eine Abschätzung der Umweltwirkungen noch relevanter, gleichzeitig mit größerer Unsicherheit behaftet. Im Vergleich zu Rindfleisch besteht das Potenzial für geringeren Wasserverbrauch, im Vergleich zu anderen Fleischarten ist der Verbrauch voraussichtlich ähnlich [\[5\]\[18\]\[4\]](#). Rund die Hälfte des Wassers wird für die Herstellung selbst benötigt, die andere Hälfte für die Lieferkette sowie für die Energieproduktion und die Errichtung und den Unterhalt der Infrastruktur [\[18\]\[19\]](#).

Der Wasserfußabdruck der Präzisionsfermentation von Milchproteinen bewegt sich insgesamt auf einem ähnlichen Niveau wie bei der herkömmlichen Milchproduktion. Es bestehen jedoch Potenziale zur Reduktion des Wasserverbrauchs beispielsweise durch die Nutzung alternativer Nährmedien [\[20\]](#). Die Berücksichtigung vorgelagerter Lieferkettenstufen – etwa der Chemikalienherstellung für Nährmedien – verschlechtert die Bilanz hinsichtlich der Auswirkungen auf die Wasserqualität [\[18\]\[19\]](#).

Durch Vertical Farming könnte die Eutrophierung von Gewässern durch Einträge aus der Landwirtschaft um 70-90 % reduziert werden [\[1\]](#). Auch die Produktion von kultiviertem Fleisch soll die Eutrophierung von Frischwasser verringern [\[18\]\[19\]\[4\]](#).

Durch die geschlossenen Produktionsbedingungen sinkt zudem das Risiko von Schädlingsbefall und Krankheiten [\[5\]\[1\]](#). Die Verbreitung von Krankheitserregern, die in der Tierhaltung vorkommen (z.B. Schweinegrippe) oder über Lebensmittel tierischer Herkunft übertragen werden (z.B. Salmonellen), können unter den sterilen Produktionsbedingungen von zellulären Lebensmitteln ausgeschlossen werden [\[5\]\[4\]](#). Zudem sind die Produkte, beispielsweise pflanzliche Alternativen zu Milch von Tieren, frei von Antibiotika [\[14\]](#).

Ein weiteres Potenzial geschlossener Produktionssysteme ist der reduzierte Flächenbedarf, durch den sich bisherige landwirtschaftliche Böden bei entsprechender Umnutzung regenerieren könnten [\[4\]](#). Im Vertical Farming kann auf weniger Fläche und mit kürzeren Erntezyklen angebaut werden. Freigewordene Flächen könnten für Renaturierung und Wasserretention genutzt werden. So können die Systeme auch indirekt auf den Wasserhaushalt einwirken. Beim Vergleich der Landnutzung von geschlossenen Systemen mit herkömmlicher Landwirtschaft muss allerdings die Fläche berücksichtigt werden, die für Energieerzeugung benötigt wird. Je nach Energiequelle kann dies einen erheblichen Flächenbedarf bedeuten. Das kann dazu führen, dass der Vergleich der Flächeneffizienz weniger vorteilhaft ausfällt [\[1\]](#).

Kurzfristig sind die Verbreitungspotenziale von Vertical Farming in Deutschland vor allem durch die hohen Investitions- und Betriebskosten eingeschränkt. Für gut geeignete Pflanzen wie Salate und Kräuter könnte Vertical Farming schon in naher Zukunft stärker genutzt werden. Auch Pflanzen, die besonders hohe Verkaufspreise erzielen und von den kontrollierten Bedingungen des Vertical Farmings besonders profitieren – beispielsweise solche, die für pharmazeutische Anwendungen benötigt werden [\[2\]](#) – könnten zeitnah in vertikalen Farmen kultiviert werden, da sich hier trotz der hohen Kosten eine gute Rentabilität erzielen lässt.

Mittelfristig besteht die Aussicht, dass technologische Innovationen die Energieeffizienz im Vertical Farming deutlich steigern und dadurch die Betriebskosten erheblich senken können. Mit der weiteren Verbreitung erneuerbarer Energien wird zudem die direkte Kopplung an Energiequellen, beispielsweise an Windparks, erleichtert. Damit ist die Möglichkeit gemeint, die Produktion effizient an erneuerbare Energiequellen anzuschließen, um Stromkosten zu reduzieren und den Eigenbedarf nachhaltig zu decken. Wenn auch die Investitionskosten verringert werden können, beispielsweise durch die Umnutzung von Industriegebäuden, könnte Vertical Farming auch für Kulturen wie Gemüse und Beeren attraktiv werden. Dies hängt jedoch auch von der Nachfrage ab, die unter anderem von dem Erfolg der Vermarktung als lokale und gesunde Produkte abhängt. Hier könnte ein Label wichtig sein [\[8\]](#). Auch die Preise von Konkurrenzprodukten sind maßgeblich für die Entwicklung der Rentabilität.

Die Verbreitungspotenziale von kultiviertem Fleisch sind kurzfristig eingeschränkt, mittel- bis langfristig aber erheblich. Wie bereits dargestellt, sind die Produktionskosten für kultiviertes Fleisch derzeit

hoch, und Abschätzungen der Potenziale zur Kostensenkung unterscheiden sich stark, abhängig von der Fleischart. Bevor optimierte Herstellungsverfahren mit höherer Ressourcen- und Energieeffizienz verfügbar sind, ist eine Skalierung unwahrscheinlich [5][4][15]. Im Fall von tierfreien Milchproteinen durch Präzisionsfermentation scheinen Produktionskosten, die einen konkurrenzfähigen Marktpreis möglich machen, absehbarer und werden teilweise schon für das laufende Jahr 2025 prognostiziert [12].

Referenzen

1. van Gerrewey, T. et al.(2022): Vertical Farming: The Only Way Is Up? In: *Agronomy* 12(1), S. 2, DOI: [10.3390/agronomy12010002](https://doi.org/10.3390/agronomy12010002)
2. Wittmann, S. et al. (2020): Indoor Vertical Farming: konsequente Weiterentwicklung des geschützten Anbaus. In: Frerichs, Ludger (Hrsg.): *Jahrbuch Agrartechnik 2020*. Braunschweig: Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, 2021. S. 1-15, DOI: [10.24355/dbbs.084-202012111306-0](https://doi.org/10.24355/dbbs.084-202012111306-0)
3. Erekath, S. et al.(2024): Food for future: Exploring cutting-edge technology and practices in vertical farm. In: *Sustainable Cities and Society* 106, S. 105357, DOI: [10.1016/j.scs.2024.105357](https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105357)
4. Treich, N. (2021): Cultured Meat: Promises and Challenges. In: *Environmental & Resource Economics* 79(1), S. 33–61
5. TAB (2023): Potenziale und Herausforderungen einer zellkultur-basierten Fleischproduktion. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (Autor/innen: Jetzke, T.; Dassel, K.), Themenkurzprofil Nr. 62, Berlin, DOI: [10.5445/IR/1000156303](https://doi.org/10.5445/IR/1000156303)
6. Boukid, F. et al. (2023): Fermentation for Designing Innovative Plant-Based Meat and Dairy Alternatives. In: *Foods* (Basel, Switzerland) 12(5), 1005, DOI: [10.3390/foods12051005](https://doi.org/10.3390/foods12051005)
7. Asseng, S. et al. (2020): Wheat yield potential in controlled-environment vertical farms. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 117(32), S. 19131–19135, DOI: [10.1073/pnas.2002655117](https://doi.org/10.1073/pnas.2002655117)
8. ISW (2020): *HypoWave: Einsatz hydroponischer Systeme zur ressourceneffizienten landwirtschaftlichen Wasserwiederverwendung*. Gemeinsamer Schlussbericht des Verbundvorhabens. Institut für Siedlungswasserwirtschaft, Braunschweig
9. BMBF (2024): *Agrarsysteme der Zukunft. Smart und nachhaltig Lebensmittel produzieren*. Bundesministerium für Bildung und Forschung, Berlin

10. idw (Hg.) (2024): Indoor Vertical Farming: KI-gesteuerte Produktion von Beerenfrüchten durch neue Sensorsysteme. Informationsdienst Wissenschaft, [idw-online.de](https://www.idw-online.de) (11.04.2025)
11. Preiss, M. et al. (2022): Trends Shaping Western European Agrifood Systems of the Future. In: Sustainability 14(21), S. 13976, DOI: [10.3390/su142113976](https://doi.org/10.3390/su142113976)
12. Augustin, M. et al. (2024): Innovation in precision fermentation for food ingredients. In: Critical reviews in food science and nutrition 64(18), S. 6218–6238, DOI: [10.1080/10408398.2023.2166014](https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2166014)
13. Broad, G. et al. (2022): Framing the futures of animal-free dairy: Using focus groups to explore early-adopter perceptions of the precision fermentation process. In: Frontiers in nutrition 9, S. 997632, DOI: [10.3389/fnut.2022.997632](https://doi.org/10.3389/fnut.2022.997632)
14. Szczepanski, L. et al. (2023): Pflanzliche Milchalternativen: Produktion, Nachhaltigkeit und Akzeptanz. In: Biologie in Unserer Zeit 53(4), S. 350–360, DOI: [10.11576/biuz-6750](https://doi.org/10.11576/biuz-6750)
15. Vergeer, R. et al. (2021): TEA of cultivated meat. Future projections of different scenarios – corrigendum. CE Delft, Delft (Nov 2021), <https://cedelft.eu>
16. Weinrich et al. (2020): Consumer acceptance of cultured meat in Germany. In: Meat science, 162, 107924, [10.1016/j.meatsci.2019.107924](https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.107924)
17. Ronchetti et al. (2024). The regulatory Landscape in the EU for Dairy products derived from precision fermentation. SpringerBriefs in Law, DOI: [10.1007/978-3-031-49692-9](https://doi.org/10.1007/978-3-031-49692-9)
18. Sinke, P. et al. (2023b): Ex-ante life cycle assessment of commercial-scale cultivated meat production in 2030. In: Int J Life Cycle Assess 28(3), S. 234–254, DOI: [10.1007/s11367-022-02128-8](https://doi.org/10.1007/s11367-022-02128-8)
19. Sinke, P. et al. (2023a): Correction: Ex-ante life cycle assessment of commercial-scale cultivated meat production in 2030. In: Int J Life Cycle Assess 28(9), S. 1225–1228, DOI: [10.1007/s11367-023-02183-9](https://doi.org/10.1007/s11367-023-02183-9)
20. Behm, K. et al. (2022): Comparison of carbon footprint and water scarcity footprint of milk protein produced by cellular agriculture and the dairy industry. In: Int J Life Cycle Assess 27(8), S. 1017–1034, DOI: [10.1007/s11367-012-0386-y](https://doi.org/10.1007/s11367-012-0386-y)

Szenarien: Wassermanagement in der Landwirtschaft

Zur Plausibilisierung eines resilienten Wassermanagements wurden im Rahmen des Resilienz-Checks verschiedene Zukunftsszenarien entwickelt. Die Szenariobildung folgte einem systematischen, mehrstufigen Vorgehen gemäß der klassischen Logik der Szenarioentwicklung. Im ersten Schritt erfolgte das Scoping, also die Definition und Abgrenzung des Untersuchungsrahmens. Darauf aufbauend wurde ein [Systembild](#) erstellt, das die relevanten Elemente und Strukturen des landwirtschaftlichen Wassermanagements abbildet. Im Zentrum standen hierbei die sogenannten Schlüsselfaktoren, also Einflussgrößen mit hoher Systemrelevanz und strategischer Steuerungswirkung. Die Projektion dieser Schlüsselfaktoren auf mögliche zukünftige Entwicklungen bzw. Entwicklungskorridore bildete die Grundlage für den übergeordneten [Szenarienrahmen](#) für das Jahr 2050. Dieser wurde unter Rückgriff auf wissenschaftlich fundierte Quellen, insbesondere Foresight-Studien, konzipiert. Darauf aufbauend wurden Fokusszenarien für die drei strategischen Themenfelder ausgearbeitet. Es handelt sich um idealtypische, technologisch ausgerichtete Szenarien, die jeweils einen Entwicklungskorridor pro Themenfeld aufzeigen. Sie sind zeitlich in drei Entwicklungsstufen gegliedert: kurzfristig (bis 2030), mittelfristig (bis 2035) und langfristig (bis 2050). In jedem Szenario wurden die jeweils spezifischen Vulnerabilitäten erläutert, die im Zusammenhang mit systemischen Risiken stehen. Dieser bewusst heuristische Ansatz ermöglicht es, sowohl Entwicklungs- und Resilienzpotenziale aufzuzeigen als auch neue Vulnerabilitäten zu identifizieren und zu analysieren, die unter den jeweiligen Rahmenbedingungen in diesen Konstellationen entstehen können.

Szenarienrahmen

Der folgende Szenarienrahmen bildet aus methodischer und inhaltlicher Perspektive das kontextuelle Narrativ und entwickelt auf Basis wissenschaftlicher Foresight-Studien eine Bandbreite möglicher zukünftiger Entwicklungen im Bereich des Wassermanagements in der Landwirtschaft. Exakte Annahmen und quantitative Prognosen werden im Szenarienrahmen unter Vorbehalt und entlang möglicher Entwicklungspfade als Spannbreiten dargestellt.

Globale Erwärmung und Wetterextreme (Klimawandel):

Deutschland gehört zu den Regionen in Europa, die sich am schnellsten erwärmen, aber auch im globalen Maßstab liegt Deutschland über dem Durchschnitt. Seit Beginn der Aufzeichnungen liegt die Erwärmung bereits bei 1,8 °C, ein halbes Grad mehr als im weltweiten Mittel mit 1,3 °C. Eine Erwärmung um mindestens zwei Grad bis 2050 ist global plausibel. Die Temperaturen in Europa variieren entsprechend den zu Grunde liegenden Szenarien. Im Fall des Klimaschutzszenarios (RCP 2.6) steigen die Temperaturen um weitere 1,2 bis 3,4 °C, im „Weiter-so-wie bisher“-[Szenario](#) (RCP 8.5, sehr hohe Emissionen) um 4,1 bis 8,5 °C bis zum Ende dieses Jahrhunderts [\[1\]](#). Die damit einhergehenden Extremausprägungen (Dürren und Starkregen) treten ein, wenn keine wirksamen Maßnahmen zum Klimaschutz ergriffen werden, und würden sich zum Ende des Jahrhunderts noch verstärken. Die Zunahme der Extremereignisse löst keine katastrophalen Systemzusammenbrüche aus, stellt aber für die Wasserversorgung eine große Herausforderung dar.

In den kommenden 25 Jahren werden sich Wasserdargebot und Wassernachfrage in der Landwirtschaft maßgeblich abhängig davon entwickeln, welche Maßnahmen zum Schutz vor den Folgen des Klimawandels ergriffen und tatsächlich umgesetzt werden [\[2\]](#). Zwar sind bis zum Jahr 2030 für Deutschland grundsätzlich keine flächendeckenden Engpässe in der Verfügbarkeit von Wasser zu erwarten; der landwirtschaftliche Wasserhaushalt gilt derzeit als relativ ausgeglichen und stabil. Dennoch ist aufgrund des Klimawandels mit längeren, intensiveren und häufigeren Hitze- und Trockenperioden zu rechnen, die den Wasserbedarf in der Landwirtschaft deutlich erhöhen werden [\[3\]](#). Besonders betroffen von den klimabedingten Veränderungen sind voraussichtlich süddeutsche Städte, Nordost- und

Ostdeutschland, Mitteldeutschland sowie Ballungsräume, die künftig verstärkt unter Hitzestress und Dürreereignissen leiden dürften.

Neben den allmählichen klimatischen Veränderungen könnten auch schnelle Änderungen im [Klimasystem](#) erfolgen, die als abrupte Klimaänderungen bezeichnet werden. Ausgelöst werden sie durch sogenannte Kipppunkte (Veränderungen von Meeresströmungen, massive Schmelzwasserzufuhr, Vulkanausbrüche) im Klimasystem. Sie gehen mit gravierenden Auswirkungen einher. Im Südwesten Deutschlands beispielsweise kann die Zahl der Hitzetage auf 80 pro Jahr steigen, mit Temperaturen bis 45 Grad. Kritisch wird die Lage für die Wasserversorgung in der Landwirtschaft bis 2050 im Fall des Ausbleibens effektiver Klimaschutzmaßnahmen. In diesem Fall steht nicht ausreichend Wasser aus Niederschlägen und Grundwasser für die landwirtschaftliche Nutzung zur Verfügung.

Der Bedarf an Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen wird bis 2050 steigen. Modellrechnungen zufolge wird der Anteil potenziell zu bewässernder Flächen zwischen 6 und 30 % (gegenüber 3,3 % 2022) liegen [\[4\]](#). Im Median wird bis 2050 mit gleichbleibenden bis leicht zunehmenden Grundwasserneubildungsraten gerechnet, da insgesamt höhere Jahresniederschläge erwartet werden. Allerdings gibt es dabei deutliche regionale Unterschiede [\[5\]](#). So wird beispielsweise im Südwesten Deutschlands ab etwa 2040 ein signifikanter Rückgang der Grundwasserneubildung prognostiziert.

Technologien

Die Digitalisierung der Landwirtschaft entwickelt sich bis 2050 kontinuierlich weiter. Vernetzte Agrarplattformen sind die zentrale Steuerungsinfrastruktur zur Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Betriebe. Getrieben durch wissenschaftlich-technologische Fortschritte und tragfähige Geschäftsmodelle ist die Landwirtschaft im Jahr 2050 – unter der Voraussetzung stabiler gesellschaftspolitischer Rahmenbedingungen – durch einen hohen Grad an autonomer datenbasierter Entscheidungsunterstützung geprägt. Die nahtlose Vernetzung, Abstimmung und das Zusammenspiel verschiedenster digitaler, technischer und organisatorischer Komponenten innerhalb eines landwirtschaftlichen Betriebs und zwischen Betrieben kennzeichnen landwirtschaftliche Prozesse.

Die Vernetzung von Maschinen, Menschen und Prozessen in der Landwirtschaft auf der Basis digitaler Daten und künstlicher Intelligenz

erreicht einen sehr hohen Effizienzgrad. Prozesse laufen mit hoher Geschwindigkeit ab, da Daten automatisiert erfasst, in Echtzeit übertragen und entlang der gesamten Wertschöpfungskette geteilt werden [6]. KI ist ein integraler Bestandteil der digitalen Landwirtschaft; sie unterstützt nicht nur bei der Analyse großer Datenmengen, sondern auch bei autonomen Entscheidungen und komplexen Arbeitsabläufen, etwa bei der Steuerung von Traktoren, dem Einsatz von Feldrobotern und Drohnen, der präzisen Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln oder der Überwachung von Tierbeständen.

Methoden der Präzisionslandwirtschaft, moderne Sensorik und Agrarrobotik sind vollständig in digitale Plattformen und betriebliche Managementsysteme integriert. Diese Systeme basieren auf Cloud-Technologien und modularen Plattformarchitekturen. Eine tragfähige Datengovernance für Agrardatenräume sichert den verantwortungsvollen Umgang mit Agrardaten durch standardisierte Schnittstellen, rechtlich abgesicherte Datenströme und wirksamen Datenschutz [7].

Der Szenarienrahmen basiert auf der Annahme, dass die Digitalisierung wesentlich dazu beigetragen hat, zentrale Herausforderungen der Landwirtschaft, wie internationalen Wettbewerbsdruck, Arbeitskräftemangel, natürliche Effizienzgrenzen oder Umweltprobleme wie Nitratbelastungen, effektiv zu adressieren. Leitkonzepte wie „Precision Farming“, „Smart Farming“ und „Digital Farming“ [8] haben sich als integrativer Rahmen für Forschung und Entwicklung etabliert und prägen auch die Innovationsstrategien führender Hersteller von Agrartechnik. Besonders deutlich zeigen sich Fortschritte im Bereich datengestützter Vorhersagesysteme: Lokale Klimamodellierungen ermöglichen inzwischen präzisere Prognosen von Extremwetterereignissen und Unwettern. Potenzielle Ertragseinbrüche können frühzeitig erkannt und alternative Versorgungswege rechtzeitig aktiviert werden. Datenaustausch und Prozesssteuerung erfolgen zunehmend dezentral und Produktionsketten sowie Agrarsysteme werden weitgehend selbstorganisiert optimiert – gestützt auf Verfahren der künstlichen Intelligenz.

Flächen und Nutzungsarten

Bis 2050 hat sich in Deutschland die verfügbare landwirtschaftliche Nutzfläche (Ackerland und Grünland) verringert. Im Jahr 2023 lag die landwirtschaftliche Nutzfläche in Deutschland bei 16,5 Mio. Hektar [9].

Der erwartete Agrarflächenverlust beläuft sich auf ungefähr eine Million Hektar, die Nutzfläche umfasst dann ca. 15 Millionen Hektar Acker- und Grünland [\[10\]](#). Bereits bis Mitte der 2030er Jahre kann der Anbau von Getreide zurückgehen [\[11\]](#). Gründe dafür sind Flächenkonkurrenzen, Konkurrenz durch andere Kulturen, Klimaschutzmaßnahmen und Flächenverluste (bspw. durch Wiedervernässung). Eine Ursache dafür ist die Ausweitung des Siedlungsbaus im Zuge des Wachstums urbaner Zentren und Metropolregionen. Dieser Trend ist seit Jahrzehnten ungebrochen. Die Abnahme der verfügbaren landwirtschaftlichen Nutzfläche erfolgte dementsprechend überwiegend im Umland städtischer Verdichtungsräume.

Unter den Bedingungen weiterhin wachsender urbaner Zentren und Metropolen intensivieren und vervielfältigen sich Wassernutzungskonflikte. Wasserrechtliche Konflikte zwischen Landwirtschaft und öffentlicher Trinkwasserversorgung gibt es seit längerem in verschiedenen Regionen Deutschlands wie im Umland von Berlin, Frankfurt und Hamburg und haben sich auf weitere Metropolregionen ausgeweitet. Immer längere und häufigere Hitze- und Dürreperioden erhöhen die Wasserbedarfe der Trinkwasserversorgung wie auch der anderen Wassernutzer, insbesondere der Landwirtschaft.

Anbaukulturen und Sorten

Bis 2050 haben molekularbiologische Verfahren zu Züchtungsergebnissen und neuen Sorten geführt, die tiefer wurzeln, resistenter gegenüber Trockenheit sind und wesentlich zur Ertragssicherung beitragen. Hitze- und Trockentoleranz sowie die Wassernutzungseffizienz sind deutlich verbessert. Die Geschwindigkeit der Neuzüchtungen hat infolge der technologischen Entwicklung enorm zugenommen. Zudem wurden Maßnahmen zur Unterstützung der regionalen Erzeugung von Nischenkulturen ergriffen [\[12\]](#).

Insgesamt haben sich das Anbau- und das Sortenspektrum in der deutschen Landwirtschaft verändert. Neben dem Rückgang des Getreideanbaus haben Leguminosen (Hülsenfrüchte), Ölsaaten und alternative Kulturen an Bedeutung im Anbau gewonnen. Agrarchemische Innovationen, Fortschritte in der Pflanzenzüchtung sowie die Optimierung von Saatgut waren und sind zentrale Treiber in der Agrarindustrie. In der modernen Pflanzenzüchtung liegt der Fokus auf der Entwicklung optimierter und neuartiger Sorten mit verbesserten Ertragsleistungen, erhöhter Resilienz gegenüber abiotischen und

biotischen Stressoren sowie gesteigerter Toleranz gegenüber klimatischen Extremen. Die Optimierung des Saatguts zielt darauf ab, Pflanzen besser gegen Dürrestress zu wappnen, ihre Nährstoffeffizienz – insbesondere bei reduzierter Düngung – zu steigern und damit die Flächenproduktivität zu erhöhen.

Akteurslandschaft

Mit der zunehmenden Verbreitung von Datenplattformen und digitale Ökosysteme, die bis 2050 zum Dreh- und Angelpunkt der digitalen Wertschöpfung in der Landwirtschaft geworden sind, gehen auch Veränderungen der Akteurskonstellationen einher. Neben Akteuren aus dem Bereich der Informationstechnologien (Bereitstellung und Betrieb der digitalen Infrastrukturen und Plattformsysteme) haben sich Unternehmen der Finanztechnologie (Fintech) im Feld etabliert und treten als Investoren, Finanziers und Technologieanbieter auf. In digital basierten landwirtschaftlichen Ökosystemen finden sich Anbieter von Managementsystemen rund um den landwirtschaftlichen Betrieb, Betriebsmittelhersteller, Händler mit Online-Marktplätzen, Steuersysteme für den eigenen Maschinenpark sowie Lohnunternehmer.

Die größte Herausforderung für die Etablierung digitaler Wertschöpfungsmodelle bestand in der rechtlichen Klärung der Datenhoheit. Sowohl auf europäischer als auch auf nationaler Ebene waren regulatorische Rahmenbedingungen erforderlich, um potenzielle Monopolbildungen einzuschränken und gleichzeitig die Bedingungen für eine kollaborative Datennutzung und ein koordiniertes Zusammenwirken verschiedener Akteure zu schaffen. Digital gestützte regionale Produktkreisläufe und Absatzwege kennzeichnen zunehmend die landwirtschaftlichen Wertschöpfungsketten – sowohl im lokalen Kontext als auch in überregionalen, nationalen und globalen Plattformökonomien.

Der Trend zur Vergrößerung und Industrialisierung der landwirtschaftlichen Betriebe dominierte lange Zeit. Nur die großen Betriebe konnten die kostenintensiven Bewässerungssysteme vorhalten. Für kleinere Betriebe waren sie zunächst unwirtschaftlich. Sie reagierten mit der Gründung von regionalen Wasserverbänden auf diese Herausforderung. Infolge der technologischen Entwicklung und der gesunkenen Kosten sind Bewässerungssysteme im Jahr 2050 auch für kleinere Betriebe rentabel. Die Betriebsstrukturen und die

Wertschöpfung landwirtschaftlicher Betriebe sind 2050 vielfältiger im Sinne der Betriebsgrößen, Produktionsweisen und Produkte.

Referenzen

1. UBA (2025): Zu erwartende Klimaänderungen bis 2100. Umweltbundesamt, 09.01.2025, www.umweltbundesamt.de (25.04.2025)
2. Zaun, F. et al. (2024): WatDEMAND: Multi-sektorale Wasserbedarfsszenarien für Deutschland und Abschätzung zukünftiger Regionen mit steigender Wasserknappheit. Abschlussbericht DVGW-Forschungsprojekt W 202124 und W 202307. Bonn
3. DVGW (2020): Zukunftsbilder 2030 bis 2100 – Wandel erfordert bereits heute die Entwicklung langfristiger regionaler und lokaler Konzepte. Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V., Bonn
4. UBA (2024a): Auswirkung des Klimawandels auf die Wasserverfügbarkeit – Anpassung an Trockenheit und Dürre in Deutschland (WADKlim). Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
5. DVGW (2022): Auswirkungen des Klimawandels auf das Wasserdargebot Deutschlands. Überblick zu aktuellen Ergebnissen der deutschen Klimaforschung. Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V., Bonn
6. TAB (2021): Digitalisierung der Landwirtschaft: technologischer Stand und Perspektiven. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (Autor/innen: Kehl, C.; Meyer, R.; Steiger, S.), Teil I des Endberichts zum TA-Projekt, Arbeitsbericht Nr. 193, Berlin
7. Fraunhofer IESE (2019): Agricultural Data Space (ADS). Whitepaper. Fraunhofer-Institut für Experimentelle Software Engineering, Kaiserslautern
8. Fraunhofer IESE (2025): Digital Farming / Smart Farming. Nachhaltig, effizient und smart – das Fraunhofer IESE gestaltet die digitale Landwirtschaft. Fraunhofer-Institut für Experimentelle Software Engineering, www.iese.fraunhofer.de (05.07.2025)
9. BMEL (2022): Betriebsstruktur und Entwicklung. Bundesministerium Landwirtschaft und Ernährung, <https://www.bmel-statistik.de> (05.07.2025)
10. FiBL (2017): Ökologisierte Landwirtschaft in Deutschland – 2050. Forschungsinstitut für biologischen Landbau, Frankfurt am Main
11. Haß, M. et al. (2024): Thünen-Baseline 2024 – 2034: Agrarökonomische Projektionen für Deutschland. ThünenInstitut, Braunschweig

12. Behrendt, S. et. al. (2023): Treiber, Diskurse und Transformationsszenarien. Experimentierfeld Agro-Nordwest, www.agro-nordwest.de (21.11.2023)

Fokusszenario: Innovative Bewässerungssysteme

Der Einsatz innovativer Bewässerungssysteme in Deutschland befindet sich derzeit noch in der Pilotphase und steht vor teils erheblichen ökonomischen, technischen und regulatorischen Herausforderungen. Besonders die strengen Schutzvorgaben für die Nutzung von aufbereitetem Abwasser stellen eine große Hürde dar. Zusätzlich ist die Datenlage durch große Defizite geprägt und es bestehen substantielle Forschungsbedarfe, insbesondere hinsichtlich der Wechselwirkungen zwischen Wasserqualität und Böden, Pflanzen und menschlicher Gesundheit.

Kurzfristig (bis 2030) unterscheidet sich das Ausmaß der in Deutschland eingesetzten Bewässerungssysteme nicht grundlegend von der Situation Mitte der 2020er Jahre. Die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt sind noch nicht so gravierend, dass dies eine starke Zunahme der Investitionen in neue Bewässerungssysteme zur Folge hätte. Insbesondere für kleinere Agrarbetriebe ist eine solche Investition wirtschaftlich noch nicht rentabel. Allerdings treten regionale Unterschiede bei Wasserknappheit und -verfügbarkeit zunehmend deutlicher zutage, sodass in näherer Zukunft in den wärmeren Monaten mit einem regional erhöhten Risiko von Wasserentnahmeeinschränkungen für die landwirtschaftliche Bewässerung zu rechnen ist. Ein Schwerpunkt der Entwicklung innovativer Bewässerungsanlagen liegt auf dem Einsatz wassersparender Technologien wie der Tröpfchenbewässerung. Daneben werden aber ebenfalls Möglichkeiten ausgelotet, um die großflächige Beregnung der Ackerflächen energie- und wassereffizienter zu gestalten. Während die Wasserwiederverwendung – insbesondere die Nutzung von behandeltem kommunalem Abwasser zur landwirtschaftlichen Bewässerung – in anderen europäischen Ländern bereits etabliert ist, gewinnt sie in Deutschland erst langsam durch neue Förderprogramme an Bedeutung. Diese rücken nicht nur die Erforschung und Entwicklung neuer Technologien, sondern auch die Implementierung und Finanzierung neuer Maßnahmen in den Fokus.

Der Einsatz von aufbereitetem Abwasser trägt dazu bei, das verfügbare Wasserdargebot angesichts des Klimawandels sowie potenzieller Nutzungskonflikte um Wasser zu erhöhen.

Mittelfristig (bis 2035) sind innovative Bewässerungssysteme zunehmend in die Betriebsführung vieler landwirtschaftlicher Betriebe integriert worden und tragen zur effizienten Nutzung von Wasser und Energie sowie zur Verbesserung der Nachhaltigkeitsbilanz bei. Während vermehrt Bewässerungstechniken wie Niederdruckdüsen sowie die oberirdische und unterirdische Tropfbewässerung für spezielle Pflanzenkulturen wie Obst- und Gemüsearten eingesetzt werden, spielen mobile und immer häufiger auch autonome Beregnungsmaschinen weiterhin eine zentrale Rolle in der landwirtschaftlichen Bewässerung großer Ackerflächen zum Anbau etwa von Kartoffeln oder Rüben – beide Formen der Bewässerung allerdings zunehmend eingebettet in digital vernetzte Systeme und Prozessketten. Angesichts der wachsenden Auswirkungen des Klimawandels haben neben dem breiten Einsatz effizienterer, digital unterstützter Bewässerungssysteme auch agronomische Maßnahmen zur Erhöhung der Bodenwasserverfügbarkeit an Bedeutung gewonnen, wie etwa die Speicherung von Regenwasser in Wasserspeicherbecken. Zisternen und Regentanks, Rückhaltebecken und Drainagesysteme sind zur Überwachung und Optimierung des Wasserverbrauchs mit digitalen Bewässerungssteuerungen gekoppelt. Die Speichersysteme sind zunehmend in landwirtschaftliche Wasserkreisläufe und Managementsysteme integriert und verbunden mit natürlichen Wasserspeichern wie Feuchtgebieten und Agroforstsystemen sowie mit Anlagen zur Wiederverwendung von Brauchwasser. Effiziente Bewässerungssysteme gehen einher mit einer wassersparenden Bewirtschaftung von landwirtschaftlichen Flächen.

In **langfristiger Perspektive (bis 2050)** hat die Landwirtschaft in Deutschland innovative Bewässerungssysteme weitgehend in ihre Anbauprozesse integriert, die hochgradig effizient, ressourcenschonend und an den Klimawandel angepasst sind. Diese Systeme kombinieren künstliche Intelligenz, Sensorik und satellitengestützte Datenanalysen, um den Wasserverbrauch auf ein Minimum zu reduzieren und gleichzeitig maximale Ernteerträge zu sichern. Vernetzte Bewässerungssysteme, gestützt auf eine gute Datenübertragung und flächendeckende Netzabdeckung im ländlichen Raum, sind integraler Bestandteil einer weitgehend digitalisierten Landwirtschaft, die sich vom „Precision Farming“ und „Smart Farming“ zu einem ganzheitlichen

„Digital Farming“ weiterentwickelt hat. Es existiert eine ganze Bandbreite digitaler Anwendungen in unterschiedlichen Prozessschritten der landwirtschaftlichen Bewässerung. Es werden kontaktlose Verfahren zur Abschätzung des individuellen Bewässerungsbedarfs eingesetzt, wie etwa die Messung der Blatttemperatur einzelner Pflanzen per Infrarotsensoren oder die Beobachtung der Bodenfeuchtigkeit mithilfe von Satelliten. Um die automatisierte Bewirtschaftung effizient umzusetzen, gehört zudem der Einsatz von Drohnen und Feldrobotern zum Standard von Landwirtschaftsbetrieben in Deutschland. Beim kontinuierlichen Monitoring helfen digitale Zwillinge der Felder unter Einbezug von Daten der Drohnen und Robotern, welche mit Klimamodellen und anderen Daten kombiniert und durch eine KI-Anwendung ausgewertet werden, um so die Bewässerung und Nährstoffanreicherung in Echtzeit dem Bedarf anzupassen. Die KI-gestützten Systeme sind ebenfalls in der Lage, Vorhersagemodelle zu erstellen, die auf langjährigen Wetter- und Anbaudaten basieren. Dadurch können Landwirt/innen frühzeitig auf drohende Dürren oder Starkregenereignisse reagieren und ihre Anbaupraktiken entsprechend anpassen. Auch regenerative Bewässerungstechniken, wie die Rückgewinnung und Wiederverwendung von Wasser in geschlossenen Kreisläufen, sind standardisiert und tragen zur Erhaltung der natürlichen Ressourcen bei. Zudem unterstützen KI-Anwendungen die Integration erneuerbarer Energien, indem sie Bewässerungsanlagen, Drohnen und Feldroboter intelligent mit Solar- oder Windenergie kombinieren, um energieeffizient zu arbeiten.

Neue Vulnerabilitäten

Der großflächige Einsatz innovativer Bewässerungssysteme schafft neue Vulnerabilitäten vor allem bezüglich Cyberkriminalität und Datensicherheit sowie im Bereich der Lebensmittelsicherheit. Das landwirtschaftliche Wassermanagement ist im Zuge des Einsatzes innovativer Bewässerungssysteme durch einen sehr hohen Grad der Digitalisierung und Vernetzung, aber auch den Einsatz von KI gekennzeichnet. Dadurch ist es verstärkt den Risiken und Gefahren der Cyberkriminalität ausgesetzt. Datenplattformen und Cloudsysteme unterstützen die Vernetzung und Interoperabilität und leisten einen wichtigen Beitrag zur Prozesseffizienz. Erfolgt eine unkontrollierte Weitergabe von Daten der landwirtschaftlichen Betriebe, besteht das Risiko der Ausbildung von Datenmonopolen. Starke

Technologieanbieter, proprietäre Systeme und Plattformen definieren Abhängigkeiten und reduzieren Redundanzen und die Diversität in landwirtschaftlichen Betriebssystemen. Die Klärung der Datenhoheit und die Definition von Standards zur Datensicherheit sind Schlüsselkomponenten zur Sicherung der Handlungs- und Produktionsfähigkeit landwirtschaftlicher Betriebe.

Ein aussichtsreicher Entwicklungspfad zur effizienten Bereitstellung von Wasser für landwirtschaftliche Flächen und zur Unterstützung der Ernährungs- und Ertragssicherheit ist zudem die Bewässerung mit aufbereitetem Wasser. Der Einsatz von aufbereitetem Abwasser in der Landwirtschaft ist aber nicht unproblematisch, vor allem im Hinblick auf die Lebensmittelsicherheit. Ob unterirdische und oberirdische Tropfbewässerung, wasserführende Gräben und Drainagesysteme, stationäre oder mobile Beregnungssysteme oder hydroponische Bewässerungssysteme – sie alle können Krankheitserreger in landwirtschaftliche Erzeugnisse transportieren. Die Einhaltung und Entwicklung strenger Richtlinien sowie ein kontinuierliches Monitoring der Wasserqualität sind somit eine Voraussetzung für die Nutzung von aufbereitetem Abwasser.

Fokusszenario: Neue Bewirtschaftungsformen

Agroforstsysteme, Agri-PV sowie die Etablierung und Entwicklung von Paludikultur auf (wieder-)vernässten Moorböden sind derzeit Gegenstand wissenschaftlicher Debatten, politischer Strategien und Programme. Auf europäischer Ebene wird der politische Rahmen dabei durch den Green Deal der EU bestimmt. Auf nationaler Ebene treiben Programme, Strategien und Fördermaßnahmen – insbesondere das Klimaschutzprogramm, die Moorschutzstrategie und die Biodiversitätsstrategie – die Entwicklung der neuen Bewirtschaftungsformen voran. Setzen sich die neuen Bewirtschaftungsformen durch, sind entsprechende Auswirkungen auch auf die Wasserversorgung der Agrarwirtschaft zu erwarten. Allerdings sind die genauen Effekte stark regions- und nutzungsabhängig.

Kurzfristig (bis 2030) bleiben neue Bewirtschaftungsformen wie Agroforstsysteme, Agri-PV sowie die Paludikultur eine Nische in der landwirtschaftlichen Nutzung. Die wissenschaftlichen Erkenntnisse zu

den erwarteten Vorteilen sowie neue Forschungsergebnisse, etwa aus der Biotechnologie und Pflanzenzüchtung zu klimaresilienten Arten für Agroforstgehölze, treiben die Weiterentwicklung voran. Der Abbau von Hemmnissen, neue Anreize und Fördermaßnahmen führen zu einer zunehmenden Erprobung neuer Bewirtschaftungsformen. Für die Bewertung, das Monitoring und die Erfolgskontrolle kommen zunehmend innovative Methoden der Fernerkundung und KI zum Einsatz. Insbesondere kombinierte Ansätze von Agri-PV und Agroforstsysteme verdeutlichen im Rahmen von Modellprojekten die Potenziale für eine deutliche Wassereinsparung in der Landwirtschaft. Diese Projekte werden von landwirtschaftlichen Betrieben und regionalen Initiativen unterstützt und gehen in die praktische Umsetzung. Zudem werden erste Moor-PV-Anlagen auf Flächen von Paludikultur errichtet.

In mittelfristiger Perspektive (bis 2035) beschleunigt eine Kombination aus politischen Anreizen, Forschungsinitiativen und technologischen Fortschritten die Verbreitung neuer Bewirtschaftungsformen in der Landwirtschaft. Agri-PV-Anlagen werden auf 2 bis 3 % der landwirtschaftlichen Fläche installiert, da sie zusätzlichen Nutzen sowohl durch Energieerzeugung als auch durch reduzierten Wasserverbrauch bieten. Auch Agroforstsysteme setzen sich durch, da sie die Bodenfruchtbarkeit und Biodiversität fördern und gleichzeitig klimatische Vorteile bieten. Mit Hilfe von KI-unterstützten Züchtungsverfahren können standortangepasste Pflanzen gezüchtet werden, die eine hohe Ertragssicherheit bieten. Flexible, automatisierte, elektrisch betriebene und (teil-)autonome Feldroboter, die sich auch in Mischkulturen bewegen können, wurden erfolgreich getestet und etablieren sich zunehmend am Markt. In vielen Betrieben bieten sie mittlerweile eine wertvolle Unterstützung bei der Pflege und Bewirtschaftung der Flächen. Durch gezielte (Weiter-)Bildungsangebote im Bereich neuer Technologien können immer mehr Landwirt/innen Roboter, Drohnen und Sensoren erfolgreich in ihren Betrieb integrieren. Paludikultur etabliert sich insbesondere für den Anbau von Nasskulturen und Torfersatzstoffen. Förderprogramme und Beratungsangebote unterstützen Betriebe bei der Umstellung, während gemeinschaftliche Plattformen den Wissensaustausch erleichtern. Die Verbraucherakzeptanz steigt, weil nachhaltige Bewirtschaftungssysteme zunehmend als glaubwürdige Antwort auf Umwelt- und Klimaprobleme wahrgenommen werden. Viele Konsument/innen achten verstärkt auf Transparenz, Regionalität, Ressourcenschonung und Tierwohl als Kriterien, die durch nachhaltige

Produktionsweisen erfüllt werden. Gleichzeitig steigt das Vertrauen in entsprechende Zertifizierungen und Herkunftsnachweise, was die Nachfrage nach Produkten aus solchen Systemen zusätzlich fördert. So entsteht ein Markt, der neue ökonomische Chancen für landwirtschaftliche Betriebe eröffnet und zusätzliche Anreize für neue Bewirtschaftungsformen setzt.

Langfristig (bis 2050) treiben politische Anreize und technische Innovationen sowie insbesondere die fortschreitende gesellschaftliche Debatte die Entstehung und Verbreitung neuer Bewirtschaftungsformen voran. Vor dem Hintergrund globaler Dynamiken und Herausforderungen wächst der gesellschaftliche Druck für eine nachhaltige Transformation der Landwirtschaft. Ökosystemleistungen sind fester Bestandteil landwirtschaftlicher Managemententscheidungen. Besonders die Umsetzung von Biodiversitäts- und Klimaschutzzielen, Maßnahmen zur Klimaanpassung und die Schaffung von CO₂-Senken beeinflussten die Ausbreitung von neuen Bewirtschaftungsformen. Die Wiedervernässung von Moorböden und die damit einhergehenden Veränderungen der Bewirtschaftung (Paludikultur) sowie der gezielte Humusaufbau zur Kohlenstoffbindung sind etabliert. In der Agroforstwirtschaft trägt die CO₂-Bindung in den Gehölzen aktiv zum Klimaschutz bei und ist damit ein zentraler Bestandteil der entsprechenden Maßnahmen. Auch der steigende Bedarf an klimaresilienten Bewirtschaftungsformen hat diese Entwicklungen entscheidend vorangetrieben.

Neue Vulnerabilitäten

Der breite Einsatz neuer Bewirtschaftungsformen schafft neue Vulnerabilitäten vor allem bezüglich Wirtschaftlichkeit, Technikabhängigkeit, Cyberkriminalität, Wetterextremen sowie Versorgungsengpässen und geopolitischer Risiken.

Landwirtschaftliche Betriebe gehen mit der Umstellung auf neue Bewirtschaftungsformen zunächst ökonomische Risiken ein. Mit Blick auf Agroforstsysteme ergeben sich erhöhte Investitions- und Bewirtschaftungskosten und kein unmittelbarer Return on Investment in den ersten Jahren. Zudem sinkt die Flexibilität der Betriebe durch die langfristige Kapital- und Flächenbindung, die durch die vergleichsweise langsam wachsenden Gehölze entstehen. Die Auswahl der Gehölzarten ist entscheidend für den langfristigen Erfolg und Ertrag eines Agroforstsystems. Zunehmende Wetterextreme wie Dürren können

besonders den neu gepflanzten Gehölzen schaden, denn diese sind auf eine ausreichende Bewässerung angewiesen. Schon heute müssen zukunftssichere und resiliente Gehölze ausgewählt werden, die gut mit den veränderten klimatischen Bedingungen zurechtkommen.

Insbesondere Agri-PV-Anlagen werden zukünftig stärker abhängig sein von technischen Infrastrukturen, zu denen etwa Sensoren, Automatisierungstechnik und Netzwerke zählen. Störungen in der Energie- oder auch der Internetversorgung können den Betrieb entsprechend empfindlich beeinträchtigen. Die zunehmende Digitalisierung und Automatisierung in Systemen wie Agri-PV erhöhen das Risiko von Cyberangriffen, die Betriebsabläufe stören oder Daten manipulieren könnten. Auch Wartung und Ersatzteilversorgung werden essenziell, etwaige Versorgungsengpässe hätten somit gravierende Folgen. Zunehmende Wetterextreme wie Orkane und große Hagelkörner können Agri-PV-Anlagen beschädigen und so finanzielle Schäden verursachen. Der Ausbau von Agri-PV-Anlagen hängt heute im großen Maße von der Verfügbarkeit von PV-Modulen aus China ab. Geopolitische Konflikte könnten sich auf den Handel mit China negativ auswirken und dadurch den Ausbau der Agri-PV gefährden.

Durch die Verschattung unter den PV-Modulen verändert sich das Mikroklima: Die Luftfeuchtigkeit steigt und die Belüftung nimmt ab, wodurch die Bedingungen für Pilzkrankheiten begünstigt werden. Deshalb ist eine geeignete Sortenauswahl wichtig, um das Erkrankungsrisiko zu reduzieren und gleichzeitig zu lange Vegetationszeiten zu vermeiden. Auch die Wiedervernässung von Mooren kann die Artenvielfalt in einem Gebiet verändern. So kann es zu einer Ausbreitung von Stechmücken kommen, die eventuell als Vektoren für bestimmte zoonotische Erreger fungieren können.

Betriebswirtschaftlich erfordert die Umstellung auf angepasste Bewirtschaftungsformen (z. B. Paludikultur) Investitionen und es kann zu Produktionsrisiken und Ertragsrückgängen kommen. Die Folgen sind Liquiditäts- und Einkommensrisiken, die bis hin zu Betriebsschließungen führen können.

Besonders in Regionen, wo solche Flächen einen hohen Anteil an der verfügbaren Landwirtschaftsfläche ausmachen, wie in Niedersachsen, Brandenburg, Bayern, Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern, kann dies den Umfang der lokal produzierten Nahrungsmittel reduzieren. Dies könnte die regionale Versorgung mit Nahrungsmitteln beeinträchtigen und die Abhängigkeit von Importen erhöhen. Soziale Spannungen und die wirtschaftliche Schwächung von

Regionen können die Folge sein und die gesellschaftliche Polarisierung verstärken.

Fokusszenario: Geschlossene Produktionssysteme

Kurzfristig (bis 2030) entstehen mit der Mobilisierung von Investitionskapital günstige Ausgangsbedingungen für eine Marktentwicklung geschlossener Produktionssysteme in Deutschland. Start-ups, Forschungsnetzwerke und Unternehmen der Agrarbranche spielen eine zentrale Rolle in der Marktentwicklung. Auch die Politik unterstützt diese Entwicklung mit Programmen zur Förderung von Forschung, Entwicklung und Innovation im Rahmen der Transformation der Agrarsysteme und der „Protein-Transition“. Dabei geht es um den Übergang von einer Ernährung, die hauptsächlich auf tierischen Proteinen basiert, hin zu einer Ernährung mit einem größeren Anteil pflanzlicher oder anderweitiger Proteine. Im Bereich Vertical Farming wird die Forschung zur Optimierung der Produktionssysteme unterstützt, etwa durch den Einsatz geeigneter Materialien und Automatisierungstechnologien. Die sich abzeichnenden Innovationen werden in Modellprojekten von Pionierorganisationen erprobt. Dabei spielen insbesondere Faktoren wie die Senkung des Energieverbrauchs und der Einsatz erneuerbarer Energien, Synergieeffekte zwischen dezentralen erneuerbaren Energienetzwerken und geschlossenen Systemen sowie die Skalierung der Fertigung eine bedeutende Rolle. Die gesellschaftliche Akzeptanz von Produkten aus geschlossenen Produktionssystemen hat sich durch die Erprobung und die damit einhergehende Verbreitung etwas erhöht. Die Frage, inwieweit die Systeme in ihren diversen möglichen Konfigurationen zur Nachhaltigkeit beitragen, ist wissenschaftlich noch nicht eindeutig geklärt.

Auf **mittlere Sicht (bis 2035)** entwickeln sich geschlossene Systeme aus der Nische und finden zunehmend Verbreitung, vor allem in Regionen, die zunehmend Dürrperioden und anderen Wetterextremen ausgesetzt sind. Dennoch bleiben die Auswirkungen auf die Wasserversorgung der Landwirtschaft begrenzt, da die Produktion in geschlossenen Systemen nur einen geringen Umfang hat und die herkömmlich erzeugten Nahrungsmittel größtenteils ergänzt, aber kaum ersetzt werden. Treiber sind das mittelfristig prognostizierte Bevölkerungswachstum in Deutschland und die damit verbundene Mehrnachfrage nach

Nahrungsmitteln sowie Änderungen von Ernährungsgewohnheiten. Die zunehmende Sensibilität für die Auswirkungen des eigenen Konsums, breitere gesellschaftliche Kritik an der Massentierhaltung und der steigende Bedarf an pflanzlichen Alternativen tragen ebenfalls maßgeblich zur Dynamik bei. Der sich abzeichnende wissenschaftlich-technische Fortschritt bei der Pflanzenzüchtung, der Optimierung von Vertical-Farming-Anlagen und der Skalierbarkeit der zellulären Landwirtschaft (wie bei Präzisionsfermentation und kultiviertem Fleisch) beschleunigt die Etablierung geschlossener Systeme erheblich. Parallel dazu entwickeln sich innovative Geschäftsmodelle, die sich weiter differenzieren und für unterschiedliche Größenordnungen und Einsatzbereiche anpassen lassen. So sind im Vertical Farming etwa große Containerfarmen entstanden sowie Gebäude, die ausschließlich der Pflanzenproduktion dienen. Andererseits existieren auch kleinere Modelle: Landwirt/innen nutzen Vertical Farming in Kombination mit anderen Anbauarten und es gibt vermehrt kleinere In-Store-Farmen in Supermärkten und Restaurants. Auch private sogenannte „Appliance Farms“ – also kleine, automatisierte Lebensmittelproduktionssysteme für den Hausgebrauch oder die Nachbarschaft –, in denen die Konsumenten direkten Zugang zu frischen Lebensmitteln erhalten, haben mittelfristig bis 2035 an Bedeutung gewonnen. Diese dezentralen Mini-Farmen, die auf smarten Technologien wie Sensorik, automatisierter Bewässerung, LED-Lichtsteuerung und künstlicher Intelligenz basieren, ermöglichen es Konsument/innen, direkt vor Ort frische Lebensmittel wie Kräuter, Salate oder kleinere Gemüsesorten anzubauen, sei es im städtischen Wohnumfeld, in Gemeinschaftsräumen oder auch in Privathaushalten.

In **langfristiger Perspektive (bis 2050)** haben sich geschlossene Produktionssysteme zur Herstellung von Nahrungsmitteln so weit durchgesetzt, dass sie den konventionellen Ackerbau nicht nur ergänzen, sondern in Teilen sogar ersetzt haben. Die Biotechnologie hat hierbei eine Schlüsselrolle gespielt: Durch sprunghafte Fortschritte in der Bio- und Gentechnologie in Verbindung mit Bioinformatik und KI-Methoden konnten künstliche Agrarsysteme effizienter und nachhaltiger realisiert werden. Es ist gelungen, kultiviertes Fleisch in Bioreaktoren, Milchprodukte in zellulärer Produktion sowie Weizen und andere Feldfrüchte in vertikalen Farmen auf minimalem Raum und in hoher Qualität massenhaft zu produzieren. Zwar werden Feldfrüchte, anders als andere Kulturen, in Deutschland nur zu einem sehr kleinen Teil in geschlossenen Systemen produziert – als Resilienzmaßnahme, um Ernteaussfällen vorzubeugen –, für die Ernährungssicherheit weltweit

sind sie mittlerweile jedoch ein essenzieller Baustein. Zudem konnte durch den Einsatz geschlossener Systeme der Druck gesenkt werden, flächenintensiv Landwirtschaft zu betreiben, was dem Erhalt und der Wiederherstellung funktionierender Ökosysteme zugutekam. Infolge der steigenden Effizienz der Anlagen und der hohen gesellschaftlichen Akzeptanz konnten geschlossene Produktionssysteme zu einem wesentlichen Element der Stärkung der Resilienz in der Lebensmittelproduktion werden. Geschlossene Produktionssysteme haben langfristig auch zur Renaturierung und Umnutzung landwirtschaftlicher Flächen beigetragen und somit den natürlichen Wasserhaushalt gestärkt.

Neue Vulnerabilitäten

Der breite Einsatz geschlossener Produktionssysteme schafft neue Vulnerabilitäten vor allem bezüglich Energieabhängigkeit, Cyberkriminalität und Technikversagen bzw. eingeschränkter Technikbeherrschbarkeit.

Wenn geschlossene Produktionssysteme aus der Nische in die breite Anwendung gehen, entstehen für das Infrastruktursystem „Landwirtschaft und Ernährung“ neue Vulnerabilitäten, die durch die Eigenschaften der Systeme sowie deren Abhängigkeiten von anderen Systemen (Energie- und Technologiesysteme) bedingt sind. Vor allem die erhöhte Energieabhängigkeit geschlossener Produktionssysteme ist eine Schwachstelle, da diese Systeme eine durchgängige Energiezufuhr und zudem sehr viel Energie benötigen. Diese Abhängigkeit macht die Systeme anfällig für Schwankungen in der Energieversorgung und bei Preissteigerungen. Stromausfälle oder Blackouts könnten nicht nur die aktuelle Ernte, sondern grundsätzlich die Funktionsfähigkeit z.B. von Aquaponik-Anlagen gefährden [\[1\]](#). Mit zunehmender Verbreitung geschlossener Produktionssysteme, die hochgradig digitalisiert und technologieabhängig sind, wächst auch das Risiko der Cyberkriminalität bzw. das Interesse von Cyberkriminellen und potenziell sogar staatlichen Akteuren, diese Systeme als Angriffsziel zu nutzen. Kriminelle Hacker könnten etwa automatisierte Steuerungen manipulieren, Daten entwenden oder ganze Produktionsabläufe sabotieren, was in einem größeren System zu umfassenderen, wirtschaftlich relevanten Schäden führen würde. In skalierten Produktionssystemen werden, standardisierte Technologien und Software verwendet, was sie in ihrer Breite anfälliger für systemische

Risiken macht, da sich Schwachstellen in weit verbreiteten Komponenten oder Programmen potenziell auf eine große Anzahl von Betrieben gleichzeitig auswirken können. Eine Sicherheitslücke oder ein technischer Defekt in einer weit verbreiteten Software könnten zahlreiche Anlagen gleichzeitig betreffen. In einem solchen Fall könnten zunächst lokale Ausfälle auftreten, die sich jedoch schnell zu überregionalen Störungen ausweiten, da viele Systeme von derselben Software abhängig sind. Dies erhöht das Risiko, dass ein einzelnes Problem größere Teile der Produktionsinfrastruktur beeinträchtigt bzw. stilllegt. Darüber hinaus können technische Fehlfunktionen oder Fehlbedienungen, beispielsweise auf Grund von mangelndem Know-how, in den vernetzten, technologieabhängigen Anlagen ein ernstzunehmendes Problem darstellen. Versorgungsengpässe oder Ausfälle bei Ressourcen oder kritischen Bauteilen könnten eine Vielzahl von Produktionsstätten gleichzeitig betreffen und die gesamte Produktion gefährden, insbesondere wenn die Beschaffung solcher Komponenten von globalen Lieferketten abhängt.

Je nach Ausgestaltung der geschlossenen Produktionssysteme kann die Produktion geografisch stark konzentriert stattfinden und könnte dadurch im Falle geopolitischer Konflikte ein potenzielles Angriffsziel für terroristische Anschläge oder militärische Angriffe werden. Sollten Vertical Farming und zelluläre Lebensmittelproduktion herkömmliche Landwirtschaft und Nutztierhaltung in großen Teilen ersetzen, gäbe es in der Transitionsphase je nach Ausgestaltung des neuen Systems eine Verlagerung von Arbeitsplätzen und Profiten zu neuen Akteuren mit einhergehenden Arbeitsplatzverlusten [\[2\]](#).

Da geschlossene Systeme oft teure, komplexe Technologien voraussetzen, könnte ihre Verbreitung zur Konzentration des Marktes bei wenigen großen Anbietern führen [\[2\]](#). Eine solche Monopolisierung würde die Marktvielfalt reduzieren und kleinere, weniger kapitalstarke Unternehmen vom Markt verdrängen. In der Folge würde eine starke Abhängigkeit von wenigen Anbietern entstehen, die Preise diktieren und Verfügbarkeit sowie Innovationen einschränken könnten.

Wie im herkömmlichen Anbau bestehen auch im Vertical Farming mikrobiologische Risiken beispielsweise durch die Ausbreitung von Krankheitserregern. Einerseits können sich Erreger durch die hydroponischen Systeme, die eine Nährstofflösung nutzen, möglicherweise schneller verbreiten. Andererseits sind die Anlagen geschlossen und teilweise auch innerhalb einer Anlage voneinander unabhängig, so dass der Verbreitung klare Grenzen gesetzt werden

können. Zudem kann der Ausfall der Ernte weniger problematisch sein, da er sich nur auf den betroffenen Teil bezieht und generell mehrere Ernten pro Jahr möglich sind [3].

Referenzen

1. Erekath, S. et al.(2024): Food for future: Exploring cutting-edge technology and practices in vertical farm. In: Sustainable Cities and Society 106, S. 105357, DOI: [10.1016/j.scs.2024.105357](https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105357)
2. Treich, N. (2021): Cultured Meat: Promises and Challenges. In: Environmental & Resource Economics 79(1), S. 33–61, DOI: doi.org/10.3389/fsufs.2019.00011
3. van Gerrewey, T. et al.(2022): Vertical Farming: The Only Way Is Up? In: Agronomy 12(1), S. 2, DOI: [10.3390/agronomy12010002](https://doi.org/10.3390/agronomy12010002)

Handlungsfelder

Zur Steigerung der Resilienz des Wassermanagements in der Landwirtschaft ist kurz- und mittelfristig eine bedarfsgerechte Bewässerung mithilfe effizienter Technologien und Verfahren von zentraler Bedeutung. Langfristig eröffnen neue Bewirtschaftungsformen und geschlossene Produktionssysteme zusätzliche Potenziale, deren Erschließung jedoch umfassende Voraussetzungen erfordert.

Die Fokusszenarien zu den strategischen Themenfeldern innovative Bewässerungssysteme, neue Bewirtschaftungsformen und geschlossene Produktionssysteme verdeutlichen die jeweiligen Potenziale, aber auch spezifischen Vulnerabilitäten.

Innovative Bewässerungssysteme eröffnen Potenziale zur Effizienzsteigerung und Ressourcenschonung, schaffen jedoch gleichzeitig Abhängigkeiten von technischer Infrastruktur und digitaler Steuerung.

Neue Bewirtschaftungsformen wie Agri-PV, Agroforst oder Wiedervernässung von Mooren und Paludikultur erhöhen die Anpassungsfähigkeit an klimatische Extreme, erfordern aber veränderte Strukturen, Investitionen und Qualifikationen.

Geschlossene Produktionssysteme wie Vertical Farming ermöglichen eine weitgehende Unabhängigkeit von Wetter- und Klimaschwankungen, bergen jedoch Risiken durch hohen Energiebedarf, technologische Abhängigkeiten und begrenzte Skalierbarkeit.

Um die Resilienzpoteziale dieser Ansätze wirksam zu nutzen, müssen auch die mit ihrer Umsetzung verbundenen potenziellen Risiken und neuen Vulnerabilitäten frühzeitig adressiert werden. Deutlich wird, dass die Resilienz des landwirtschaftlichen Wassermanagements nicht durch einzelne Lösungen entsteht, sondern nur durch das integrierte Zusammenspiel ökologischer, technologischer und sozialer Ansätze nachhaltig gestärkt werden kann. Die folgenden themenspezifischen und bereichsübergreifenden Handlungsfelder können hierfür eine Grundlage bieten und dazu beitragen die Widerstandsfähigkeit des zukünftigen Wassermanagements zu verbessern.

Übergreifende Handlungsfelder

Die resilienzsteigernden Potenziale geschlossener Produktionssysteme, neuer Bewirtschaftungsformen und innovativer Bewässerungssysteme können nur dann wirksam erschlossen werden, wenn über diese spezifischen Optionen hinaus drei themenfeldübergreifende Policy-Bereiche systematisch adressiert werden: (1) die Entwicklung regional angepasster Wasserversorgungskonzepte, (2) der Aufbau einer transparenten Daten-Governance sowie (3) ein grundlegendes Umdenken in der Wasserwirtschaft.

Regional angepasste Wasserversorgungskonzepte als Grundlage resilienter Wassernutzung: Die zukünftige Dynamik von Wasserdargebot und Wassernachfrage in der Landwirtschaft ist maßgeblich von regionalen Faktoren und Besonderheiten abhängig. Daher sind differenzierte, regional adaptierte Versorgungskonzepte und belastbare Planungsgrundlagen für die Wasserversorgung in der Landwirtschaft zu entwickeln, die auf belastbaren hydrologischen, pedologischen, klimatischen und landnutzungsbezogenen Daten beruhen. Dazu zählen unter anderem Daten zur Wasserverfügbarkeit (Niederschlag, Verdunstung, Abfluss), zur Bodenbeschaffenheit (Wasserspeicherkapazität, Infiltration, Erosion), zum Klima (Temperaturverläufe, Trockenperioden) und zum spezifischen Wasserbedarf landwirtschaftlicher Kulturen.

Die Erarbeitung solcher Konzepte erfordert interdisziplinäre Ansätze sowie partizipative Prozesse (vgl. im Folgenden [\[1\]](#)), die lokale Akteure – insbesondere Landwirt/innen, Wasserbehörden und kommunale Entscheidungsträger – aktiv einbinden. Partizipation senkt Transaktionskosten, erhöht die Akzeptanz, stärkt die

Umsetzungskompetenz vor Ort und trägt zur frühzeitigen Identifikation sowie Bearbeitung von Nutzungskonflikten bei. Dabei kann auf bereits bewährte Kooperationen regionaler Bewässerungsverbände angeknüpft werden, die die gemeinschaftliche Organisation der Wassernutzung mit der behördlichen Genehmigungspraxis verbinden.

Daten-Governance als Voraussetzung für evidenzbasierte

Steuerung: Eine regionale, adaptive Wassernutzung erfordert eine belastbare Datenbasis. Derzeit bestehen erhebliche Defizite und Datenlücken, insbesondere im Hinblick auf Echtzeitdaten zur Bewässerungspraxis sowie zur räumlichen und saisonalen Dynamik von Wasserressourcen. Notwendig ist daher eine gezielte Forschungsförderung zum Schließen dieser Lücken sowie der Aufbau zentraler, interoperabler Dateninfrastrukturen mit offenem Zugang für Landwirt/innen, Planungsbehörden und Forschungseinrichtungen.

Zugleich ist eine klare und transparente Daten-Governance für ein nachhaltiges Management der Wasserressourcen in der Landwirtschaft erforderlich, die Rechte zur Datennutzung, Datenhoheit und zum Datenzugriff klar regelt – unter Wahrung des Datenschutzes und der betrieblichen Vertraulichkeit. Nur so kann das Vertrauen landwirtschaftlicher Betriebe in datengestützte Systeme gestärkt werden. Darüber hinaus sind robuste IT-Infrastrukturen mit redundanten Sicherungssystemen sowie einheitlichen Schnittstellenstandards nötig, um Systemintegration zu erleichtern und Sicherheitslücken zu minimieren.

Transformation der Landwirtschaft als übergeordneter

Handlungsrahmen: Um die zukünftige Wasserversorgung der Landwirtschaft resilient zu gestalten, darf sie nicht isoliert betrachtet werden, sondern muss in den umfassenderen Kontext der Transformation des Landwirtschaftssystems eingebettet sein. Dazu ist ein grundlegendes Umdenken im Wassermanagement erforderlich, mit einem klaren Fokus auf die Wiederherstellung und Reintegration natürlicher Wasserkreisläufe. Ein Umdenken in der Wasserwirtschaft umfasst unter anderem die Reaktivierung von Speichersystemen, Anpassungsmaßnahmen bei Anbaukulturen und die Erschließung zusätzlicher Wasserressourcen. Ziel ist es, vorhandene Infrastrukturen dabei zu nutzen bzw. auszubauen, um die Speicherfähigkeit von Landschaften wiederherzustellen und Bodenfunktionen zu erhalten sowie zu stärken. Dazu gehört eine flächendeckende Förderung der Infiltration sowie die Reduktion der Entwässerung in landwirtschaftlichen Flächen und Wäldern. Kontrollierbare

Drainagesysteme und die Speicherung von Drainagewasser, beispielsweise in Teichen, könnten das Entwässerungsmanagement landwirtschaftlicher Nutzflächen verbessern und dadurch mehr Wasser in der Landschaft zurückhalten. Darüber hinaus sind Anpassungsmaßnahmen in der Landwirtschaft erforderlich, wie die regional angepasste Auswahl von Feldfrüchten, ein optimiertes Ressourcen- und Bedarfsmanagement sowie effiziente und bedarfsgerechte Bewässerungssysteme. Zusätzliche Wasserressourcen könnten durch verstärkte Rückhaltung und Speicherung des Winterniederschlages bereitgestellt werden, um diese in den trockenen Sommermonaten zu nutzen. Auf dieser Basis können regionale und überregionale Maßnahmen zur Sicherung des Wasserbedarfs der Landwirtschaft entwickelt werden. Dabei wäre das Wassermengenmanagement künftig nicht auf administrative Grenzen, sondern auf Flusseinzugsgebiete oder Teileinzugsgebiete auszurichten. Die bisherige länderübergreifende und interkommunale Zusammenarbeit wäre entsprechend zu intensivieren.

Referenzen

1. Riedel, T. et al. (2023): Wie kann die gemeinsame Bewirtschaftung von Grundwasservorkommen durch Land- und Wasserwirtschaft gelingen? In: Energie | Wasser – Praxis, 9/2023, S. 60-65

Handlungsfelder: Innovative Bewässerungssysteme

Damit innovative Bewässerungssysteme und alternative Einspeisekonzepte ihr volles Potenzial zur Stärkung der Resilienz landwirtschaftlicher Wasserversorgung entfalten können, bedarf es gezielter politischer Unterstützung in mehreren ineinandergreifenden Handlungsfeldern.

Zentral ist die Etablierung datengestützter Monitoringsysteme, mit dem Ziel, durch kontinuierliche Erfassung, Auswertung und Verfügbarmachung relevanter Informationen eine präzisere Bewässerungssteuerung zu ermöglichen, den Ressourceneinsatz zu optimieren und Entscheidungsgrundlagen sowohl auf betrieblicher Ebene als auch für Politik und Verwaltung bereitzustellen. Konkret sollten Monitoringsysteme beispielsweise folgende Aspekte erfassen:

Bodenfeuchte in Echtzeit, Wasserverbrauch, Pflanzenentwicklung, lokale Wetterprognosen, Wasserverfügbarkeit in den Einzugsgebieten und Auswirkungen landwirtschaftlicher Maßnahmen auf Wasserhaushalt und Biodiversität. Auf Basis dieser Informationen könnten landwirtschaftliche Betriebe bedarfsgerechte Bewässerungspläne entwickeln und ggf. staatliche Stellen eine evidenzbasierte Steuerung wasserwirtschaftlicher Maßnahmen im Fall von Wasserstress und Dürren vornehmen.

Wichtig ist außerdem, dass das Wasserhaushaltsgesetz angepasst und konkretisiert wird, damit die EU-Vorgaben zur Nutzung von aufbereitetem Abwasser für die landwirtschaftliche Bewässerung umgesetzt werden können. Der aktuelle Referentenentwurf des Dritten Gesetzes zur Änderung des Wasserhaushaltsgesetzes [\[1\]](#) adressiert bereits Anforderungen an Aufbereitung, Speicherung, Verteilung und Wiederverwendung von Abwasser. Allerdings bestehen weiterhin Regelungslücken, insbesondere hinsichtlich der Definition und Ausweisung geeigneter Gebiete sowie von Schutzzonen (also wo aufbereitetes Wasser überhaupt eingesetzt werden darf) sowie der Standardisierung von Qualitätsparametern für die Nutzung in der Land- und Forstwirtschaft. Der noch nicht abgeschlossene Normungsprozess verhindert bislang die rechtssichere Umsetzung in der Praxis.

Die **Förderung von Kooperationen und Netzwerken** zwischen landwirtschaftlichen Betrieben, Kommunen, Wasserwirtschaft und weiteren Stakeholdern des landwirtschaftlichen Wassermanagements sollte ebenfalls ein strategisches Ziel politischer Maßnahmen sein. Solche Netzwerke ermöglichen eine effiziente Nutzung gemeinsamer Ressourcen, die Entwicklung regional angepasster Lösungen sowie die Verbreitung von Innovationen. Eine Förderung solcher Kooperationsnetzwerke kann finanziell durch gezielte Förderprogramme, Anschubfinanzierung gemeinsamer Infrastruktur und Unterstützung von Beratungs- und Moderationsleistungen erfolgen. Darüber hinaus sind organisatorische Maßnahmen wie der Aufbau regionaler Koordinierungsstellen, Schulungsangebote und die Entwicklung rechtlicher Rahmenbedingungen für eine sichere Zusammenarbeit zentral, um tragfähige Partnerschaften und innovative Lösungsansätze im landwirtschaftlichen Wassermanagement zu ermöglichen.

Eine gezielt auf den landwirtschaftlichen Kontext abgestimmte Wasserwiederverwendung (Re-Use) eröffnet die Chance, regionale Wasserhaushalte resilienter gegenüber Dürreperioden und

Nutzungskonflikten zu machen. Ein zentrales Hemmnis für den breiten Einsatz alternativer Wasserquellen, wie aufbereitetem Abwasser, ist der Mangel an belastbaren Daten zur Lebensmittelsicherheit, weshalb dem Handlungsfeld [Forschung und Risikobewertung](#) zur Lebensmittelsicherheit und zu den Risiken der Kontaminierung von Böden, Grundwasser oder Pflanzen in diesem Kontext eine besonders hohe Bedeutung zukommt. Der daraus resultierende Forschungsbedarf konzentriert sich insbesondere auf folgende Bereiche:

Mikrobielle Risikobewertung: Die potenziellen Gefahren durch Viren, Bakterien und Protozoen im aufbereiteten Wasser sind bislang nicht ausreichend untersucht.

Inaktivierungs- und Dekontaminationsverfahren: Es bedarf einer gezielten Weiterentwicklung von Technologien zur effektiven Entfernung pathogener Mikroorganismen, um Gesundheits- und Umweltrisiken zu minimieren [\[2\]](#).

Umwelt- und Bodenverträglichkeit: Auch die Auswirkungen der Wasserwiederverwendung auf Bodenökosysteme, Mikrobiome und Pflanzengesundheit müssen systematisch analysiert werden.

Gleichzeitig bedarf es gezielter Investitionen in technologische Lösungen, die den Einsatz alternativer Wasserquellen – insbesondere von aufbereitetem Abwasser – in der Landwirtschaft ermöglichen und erleichtern. Der Aufbau leistungsfähiger Speicher-, Aufbereitungs- und Verteilungssysteme stellt dabei eine zentrale Voraussetzung dar. Solche Infrastrukturen sind notwendig, um die Verfügbarkeit von Re-Use-Wasser zeitlich flexibel zu gestalten, Lastspitzen auszugleichen und bedarfsgerechte Bewässerungskonzepte umzusetzen, die sich an den spezifischen Anforderungen einzelner Kulturen und regionaler Klimabedingungen orientieren. Investitionen in solche Technologien und Infrastrukturen können somit einen zentralen Baustein einer nachhaltigen Entwicklung darstellen: Sie tragen langfristig zur Sicherung der Wasserverfügbarkeit bei und fördern durch die fachgerechte Wiederverwendung von Wasser ressourcenschonende Produktionsweisen. Perspektivisch können so geschlossene Wasserkreisläufe unterstützt werden, die nicht nur die Abhängigkeit von Grundwasser reduzieren, sondern auch einen wichtigen Beitrag zur Resilienz der Wasserversorgung in der Landwirtschaft leisten. Schließlich ist die Entwicklung einer politisch abgestimmten Wassernutzungshierarchie anzustoßen, wie sie bereits in Ansätzen in der Wasserstrategie der Bundesregierung skizziert wurde [\[3\]](#). Diese Hierarchie sollte prioritäre Nutzungsformen in Trockenzeiten klar

regeln, konkurrierende Ansprüche ausgleichen und ökologische Mindeststandards sichern.

Referenzen

1. BMUV (Hg.) (2024b): Referentenentwurf eines Dritten Gesetzes zur Änderung des Wasserhaushaltsgesetzes. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, www.bmuv.de (14.04.2025)
2. BfR (2022): Aufbereitete Abwässer: Protozoen auf pflanzlichen Lebensmitteln vermeiden Abschätzung des Risikos einer Übertragung von *Cryptosporidium* spp., *Giardia duodenalis* und *Toxoplasma gondii* auf den Menschen. Bundesinstitut für Risikobewertung, Berlin, DOI: [10.17590/20220727-111138](https://doi.org/10.17590/20220727-111138)
3. BMUV (2021): Nationale Wasserstrategie. Entwurf des Bundesumweltministeriums. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, Bonn

Handlungsfelder: Neue Bewirtschaftungsformen

Innovative landwirtschaftliche Bewirtschaftungsformen wie Agroforstsysteme, Paludikultur und Agri-PV bieten vielversprechende ökologische und ökonomische Chancen für eine resiliente und nachhaltige Landnutzung. Gleichzeitig gehen sie mit neuen systemischen Vulnerabilitäten einher, etwa im Hinblick auf Standortanforderungen, Betriebsintegration und Governance-Strukturen. Eine sorgfältige Planung und Umsetzung sowie eine gezielte politische Rahmensetzung sind entscheidend, um Innovationsbarrieren abzubauen, Risiken zu minimieren und die langfristige Tragfähigkeit dieser Systeme zu sichern. Damit die neuen Bewirtschaftungsformen wirksam zur Resilienzsteigerung des Wassermanagements in der Landwirtschaft beitragen können, sind politische Maßnahmen in mehreren Handlungsfeldern notwendig.

Die Förderung von System- und Handlungswissen ist für alle Akteure von zentraler Bedeutung. Der Aufbau interdisziplinärer Forschungsnetzwerke sowie die Entwicklung und der Zugang zu offenen Daten-, Informations- und Wissensplattformen sind essenziell, um Entscheidungsgrundlagen für Landwirt/innen, Planer/innen und

politische Akteure bereitzustellen. Für Agri-PV-Anlagen besteht Forschungsbedarf insbesondere im Hinblick auf wasserbezogene Aspekte (z.B. Bodenfeuchte, Mikroklima), die bislang gegenüber Aspekten wie Lichtverfügbarkeit nachrangig behandelt wurden. Pilot- und Demonstrationsanlagen zur Erprobung sollten gezielt gefördert werden, um praxisrelevante Daten und Erkenntnisse zu gewinnen.

Gezielte finanzielle **Fördermechanismen und Investitionssicherheit** spielen eine entscheidende Rolle bei der Einführung neuer landwirtschaftlicher Bewirtschaftungsformen. Die Umstellung auf neue Bewirtschaftungsformen erfordert teils hohe Anfangsinvestitionen. Deshalb sind langfristig angelegte Förderinstrumente notwendig – etwa Investitionszuschüsse, Kredite und Steuervergünstigungen –, um das finanzielle Risiko zu mindern und den Übergang zu Agroforstsystemen, Paludikultur und Agri-PV in der Breite zu ermöglichen. Die Schaffung von Planungssicherheit für landwirtschaftliche Betriebe ist dabei ein zentrales Erfolgskriterium.

Auch die **rechtlichen Rahmenbedingungen** sind zu überprüfen und anzupassen. Mit Blick auf die Wiedervernässung von Mooren betrifft dies insbesondere Regelungen im Bereich der Land-, Forst- und Wasserwirtschaft sowie des Planungs-, Bau und Wasserverbandsrechts. Hier besteht Anpassungsbedarf, um Hemmnisse zu vermeiden und abzubauen und gleichzeitig bei Zielkonflikten die Interessen der Flächeneigentümer und Flächenbewirtschafter angemessen zu berücksichtigen. Anpassungsbedarf besteht vor allem dort, wo bestehende Regelungen Genehmigungsverfahren erschweren oder zeitlich verzögern, beispielsweise durch unklare Zuständigkeiten, unzureichende Rechtsgrundlagen für die dauerhafte Umnutzung von Flächen oder unzureichende Regelungen zur gemeinschaftlichen Finanzierung und Unterhaltung von Wiedervernässungsmaßnahmen. Zudem ist sicherzustellen, dass bei der Abwägung von Zielkonflikten – etwa zwischen Klimaschutz, Biodiversitätszielen und land- bzw. forstwirtschaftlicher Nutzung – die berechtigten Interessen der Eigentümer/innen und Bewirtschafter/innen angemessen einbezogen und gegebenenfalls durch geeignete Ausgleichs- und Entschädigungsregelungen flankiert werden. Bei Agri-PV besteht der Anpassungsbedarf vor allem bezüglich der gesetzlichen Vorgaben und Genehmigungsprozesse. Dieser betrifft u. a.

Gewährleistung der Planungssicherheit für die Kommunen und die landwirtschaftlichen Betriebe

Konfliktregelungen bei der Ausweisung von Anlagen im Flächennutzungsplan als „Sondergebiet Agri-Photovoltaik“,

Ausweitung der Flächenkulisse für Agri-PV (der abgegrenzte Bereich an Fläche, der politisch, rechtlich oder fördertechnisch für die Doppelnutzung ausgewiesen ist) durch Einbeziehung landwirtschaftlicher Nutzflächen im Rahmen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG),

Gesetzliche Einspeisevergütung nach EEG für kleine, nicht ausschreibungspflichtige hoch aufgeständerte Agri-PV-Anlagen

Ausschreibungen für Agri-PV-Anlagen und die (Teil)-Privilegierung im Baugesetzbuch. Verbesserte Fördersysteme, wie die Innovationsausschreibung im Rahmen der Einspeisevergütung nach dem EEG oder die Anpassung der Verordnung zu den GAP-Direktzahlungen unterstützen die Sicherung der Rahmenbedingungen.

Die [DIN SPEC 91434](#), die Anforderungen an die landwirtschaftliche Hauptnutzung von Agri-Photovoltaik-Anlagen definiert, stellt eine weitere entscheidende Voraussetzung für eine erfolgreiche Marktdiffusion dar. Sie schafft eine verbindliche Prüfgrundlage für Gesetzgeber, Fördermittelgeber und Genehmigungsbehörden und legt zugleich Qualitätskriterien für den Bau und den Betrieb von Agri-PV-Anlagen fest.

Integrierte Ansätze, die staatliche Finanzierungs- und Förderprogramme sowie Maßnahmen von Markt- und Innovationsförderinstitutionen aufeinander abstimmen und dabei die relevanten Akteure aus Forschung, Landwirtschaft, Industrie, Verbänden, Kammern und Energieversorgungsunternehmen einbeziehen, spielen eine zentrale Rolle bei der Mobilisierung der Ressourcen, die für die Weiterentwicklung neuer Bewirtschaftungsformen erforderlich sind. Strukturpolitisch geförderte Innovationscluster könnten die Entwicklung und Anwendung neuer Geschäftsmodelle beschleunigen.

Besonders bei der Wiedervernässung von Mooren bestehen erhebliche Herausforderungen. Die Akzeptanz in der Landwirtschaft könnte durch eine transparente Informationspolitik, Aufklärung über Klima- und Naturschutzwirkungen sowie durch partizipative Verfahren in betroffenen Regionen gestärkt werden. In Bezug auf Agri-PV-Anlagen sind Schulungs- und Beratungsangebote für Kommunen und Genehmigungsbehörden notwendig, um das notwendige Planungswissen aufzubauen. Für eine wirtschaftliche Etablierung von Paludikulturen ist es zudem empfehlenswert, geeignete Anreizsysteme

zu schaffen, die sowohl die Nutzung der erzeugten Paludi-Biomasse als auch der daraus hergestellten Paludi-Produkte einbeziehen. Für nachhaltig produzierte Paludikultur-Produkte könnten Zertifizierungen (z. B. Gütesiegel) die erfolgreiche Vermarktung unterstützen. Eine flankierende und gezielte Innovations- und Investitionsförderung kann darüber hinaus wesentlich dazu beitragen, neue Wertschöpfungsketten in der Paludikultur aufzubauen und zu etablieren. Diese Förderung könnte etwa Forschungszuschüsse für technische Weiterentwicklungen umfassen, Investitionshilfen für Betriebe beim Aufbau geeigneter Produktionsanlagen sowie Programme zur Markteinführung neuer Produkte. Dazu zählen insbesondere die Förderung von Forschungs- und Demonstrationsvorhaben zur Anbauoptimierung torferhaltender Kulturen wie Schilf, Rohrkolben oder Torfmoos, die Entwicklung geeigneter Ernte- und Aufbereitungstechnologien für Nassstandorte sowie Investitionen in regionale Verarbeitungs- und Logistikstrukturen. Mögliche Förderinstrumente umfassen Investitionszuschüsse für Maschinen und Anlagen, Risikoabsicherungen für Modellvorhaben, Prämienprogramme für den Aufbau von Absatzmärkten (z. B. für Baustoffe, Substrate oder biobasierte Dämmstoffe) sowie Beratungs- und Qualifizierungsangebote für Landnutzer/innen.

Ähnliches gilt für die Agroforstwirtschaft. Die weitere Förderung agroforstlicher Systeme erfordert gezielte Programme zur Entwicklung und Verstetigung innovativer Geschäftsmodelle. Diese sollten regional angepasst, ökologisch wirksam und ökonomisch tragfähig sein, um als Alternative zu konventionellen Anbausystemen breite Akzeptanz zu finden.

Handlungsfelder: Geschlossene Produktionssysteme

Um das Potenzial geschlossener Produktionssysteme für ein resilientes landwirtschaftliche Wassermanagement umfassend zu erschließen, sind sowohl technologische Weiterentwicklungen als auch systemische Anpassungen erforderlich.

Technologisch stehen insbesondere die Steigerung der Energieeffizienz, die Reduktion der Betriebskosten sowie die Skalierung der Anlagen im Fokus. Systemisch bedarf es einer Integration geschlossener Produktionssysteme in nachhaltige Agrarstrukturen, etwa durch die

konsequente Optimierung von Stoffkreisläufen und insbesondere die Einbettung in regionale Wertschöpfungsnetzwerke. Darüber hinaus ist es notwendig, diese Systeme aus der Nische heraus in die breite Anwendung zu überführen, um Skaleneffekte und Lernpotenziale zu realisieren. Dies bedarf wirtschafts- und gesellschaftspolitischer Unterstützung und flankierender Maßnahmen, die sowohl die Entwicklung und Anwendung zentraler Technologien fördern als auch die Akzeptanz und wirtschaftliche Tragfähigkeit geschlossener Produktionssysteme stärken. Durch gezielte Forschungsprogramme zu geschlossenen Produktionssystemen könnte deren Weiterentwicklung wirksam unterstützt werden. Zentrale Forschungsaufgaben bestehen unter anderem darin, Energie- und Stoffkreisläufe zu schließen sowie prozessbedingte Umweltwirkungen im Sinne einer positiven Ökobilanz zu gestalten. Im Bereich des Vertical Farming stehen dabei insbesondere die Entwicklung energieeffizienter Technologien, der Einsatz geeigneter Materialien und sowie die Automatisierung von Prozessen im Fokus. Diese Bereiche müssen weiter erforscht, optimiert und in der Praxis erprobt werden. Auch die Züchtung von Pflanzenarten, die speziell an die Bedingungen in Vertical-Farming-Systemen angepasst sind, stellt ein wichtiges Forschungsfeld dar. Ziel ist es, die Effizienz geschlossener Produktionssysteme zu steigern und den wirtschaftlich rentablen Anbau einer größeren Vielfalt von Kulturen zu ermöglichen. In der zellulären Landwirtschaft ergeben sich Forschungsfragen vor allem bezüglich geeigneter und nachhaltiger Nährmedien, der Skalierbarkeit der Produktionsprozesse sowie deren Energieeffizienz. Darüber hinaus könnte Forschungsförderung in Form von Experimentierfeldern oder Modellregionen mit Begleitforschung erfolgen, um die technische und wirtschaftliche Machbarkeit im größeren Maßstab zu demonstrieren. Regionale Förderprogramme für Projekte zu geschlossenen Produktionssystemen können einen wichtigen Beitrag zum Aufbau regionaler Wertschöpfungsketten leisten. Sie können die Sichtbarkeit und gesellschaftliche Akzeptanz erhöhen und schaffen praxisnahe Referenzmodelle, die als Anschauungsbeispiele und Lernräume für andere Regionen dienen können.

Auch die **Förderung der Entwicklung und Erprobung geeigneter Geschäftsmodelle** für Vertical Farming und zelluläre Landwirtschaft kann entscheidend zur Marktentwicklung beitragen. Für unterschiedliche Anwendungsbereiche müssen passende Modelle identifiziert und etabliert sowie mit Wertschöpfungsketten zusammengebracht werden, damit Innovationsökosysteme entstehen

können. Initiativen zur Förderung lokaler Zulieferstrukturen und zum Aufbau regionaler Wertschöpfungsketten können die Verfügbarkeit, Qualität und Kosteneffizienz von Komponenten, Betriebsmitteln und begleitenden Dienstleistungen (z.B. zur Vermarktung) maßgeblich verbessern.

Experimentierfelder und Reallabore bieten die Möglichkeit, Technologien und Geschäftsmodelle für geschlossene Systeme unter praxisnahen Bedingungen zu erproben. Sie schaffen die Grundlage, Risiken frühzeitig zu identifizieren, technische Lösungen anzupassen und Geschäftsmodelle auf ihre Wirtschaftlichkeit zu prüfen. Damit dieses Potenzial ausgeschöpft werden kann, müssen die regulatorischen Rahmenbedingungen allerdings ausreichend flexibel gestaltet sein. Insbesondere Experimentierklauseln sind notwendig, um Innovationen in Reallaboren rechtssicher zu testen und so den Transfer in die breite Anwendung zu beschleunigen [1]. Unklare oder uneinheitliche rechtliche Rahmenbedingungen, insbesondere im Hinblick auf die Zulassung, Kennzeichnung und Vermarktung von Lebensmitteln, die mittels Präzisionsfermentation hergestellt werden, stellen derzeit ein erhebliches Innovationshemmnis dar. Beispielsweise fehlt es an klaren Regelungen zur Einstufung solcher Produkte im Lebensmittelrecht (z. B. als neuartige Lebensmittel gemäß Novel-Food-Verordnung der EU), was zu Rechtsunsicherheit für Unternehmen führt. Reallabore können hier eine wichtige Rolle spielen, indem sie im geschützten Rahmen regulatorische Unsicherheiten identifizieren, praxisnah erproben und wissenschaftlich fundierte Empfehlungen für eine zukunftsfähige Regulierung ableiten. Beratungsleistungen zu Zulassungsfragen und deren Förderung können die Entwicklung innovativer Produkte sowie Gründungen unterstützen.

Soll die Wiederverwendung von Abwasser auch in Vertical-Farming-Systemen unterstützt werden, braucht es eine entsprechend ausgestaltete Anpassung der in Deutschland geltenden EU-Verordnung zur Wasserwiederverwendung im Wasserhaushaltsgesetz. Hier müsste einerseits ein ausreichender Konsument/innen-Schutz und andererseits die Zulassung in hydroponischen Systemen ermöglicht werden, damit eine Wasserwiederverwendung in Vertical-Farming-Systemen erfolgen kann (siehe auch oben, strategisches Themenfeld „innovative Bewässerungssysteme“). Für die Stärkung der Information von Verbraucher/innen sowie die Unterstützung der Marktentwicklung wäre auch die Option geeigneter Zertifizierungen und Labels für Produkte aus geschlossenen Produktionssystemen zu prüfen. Aktuelle Bio-Labels

decken den Anbau in Substraten und Nährstofflösungen ohne Erde nicht ab, sodass Produkte aus dem Vertical Farming in Deutschland bzw. der EU meist keine Bio-Zertifizierung erhalten können. Die Einführung neuer Zertifizierungen oder eine Anpassung von Labels wäre notwendig. Für den Bereich Vertical Farming wäre denkbar, die Aspekte der Nachhaltigkeit (Wassereinsparung, Pestizidfreiheit etc.) und innovative Produktionsmethoden zu zertifizieren.

Die **Akzeptanz geschlossener Produktionssysteme** lässt sich voraussichtlich fördern, indem Verbraucher/innen und Stakeholder gezielt über die Potenziale in Bezug auf Nachhaltigkeit und Ernährungssicherheit informiert werden. Eine realistische Wiedergabe des aktuellen Wissens, insbesondere hinsichtlich der unterschiedlichen Nachhaltigkeitsaspekte, ist hierbei wichtig. Informationskampagnen sowie ein breiter gesellschaftspolitischer Diskurs können helfen, den Kenntnisstand für diese neuen Produktionsformen bei Verbraucher/innen und Unternehmen zu stärken. Für Produkte aus der Präzisionsfermentation sind weitere Studien zur Verträglichkeit und potenziellen Risiken erforderlich [2]. Besonders im Hinblick auf den Einsatz gentechnisch veränderter Organismen in der Präzisionsfermentation sollten sowohl die tatsächlichen als auch die von der Öffentlichkeit wahrgenommenen Risiken genauer untersucht werden. Dies ist wichtig, um fundierte Informationen bereitzustellen und eine verständliche, transparente Kommunikation gegenüber Verbraucherinnen und Verbrauchern zu ermöglichen.

Die Einbindung landwirtschaftlicher Akteure in die Entwicklung und den Aufbau dieser Systeme sowie Investitionsanreize, beispielsweise für vertikale Farmen, können die Akzeptanz erhöhen und gleichzeitig die Möglichkeit eröffnen, neue Erlösquellen, Marktsegmente und Geschäftsmodelle zu erschließen. Ebenso wichtig ist die Einbeziehung neuer Akteure, die aus anderen Branchen als der Landwirtschaft stammen, um ein breiteres Innovationspotenzial auszuschöpfen. Akteure können vor allem aus den Bereichen Biotechnologie, Energie, Gebäudetechnik, Digitalisierung, Logistik, Wasser- und Umwelttechnik kommen – ihre Expertise und Ressourcen können helfen, solche Systeme großflächig, wirtschaftlich tragfähig und nachhaltig zu etablieren.

Referenzen

1. Wissenschaftsrat (2024): Perspektiven der Agrar-, Lebensmittel- und Ernährungswissenschaften. Köln, [10.57674/txjy-7n56](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:57674-txjy-7n56)
2. Boukid, F. et al. (2023): Fermentation for Designing Innovative Plant-Based Meat and Dairy Alternatives. In: Foods (Basel, Switzerland) 12(5), 1005, DOI: [10.3390/foods12051005](https://doi.org/10.3390/foods12051005)

Autorinnen und Autoren

Der Resilienz-Check wird vom IZT, dem Konsortialpartner des TAB-Betreibers ITAS durchgeführt. Verantwortlich für die Inhalte sind die [folgenden Wissenschaftler/innen](#). Bei inhaltlichen Fragen zu dem Resilienz-Dossier wenden Sie sich bitte an Michaela Evers-Wölk oder Ingo Kollosche.

Beteiligte Expert/innen

Bei der Erarbeitung des [Resilienz-Dossiers](#) wurde die Expertise interner und externer Expert/innen prozessbegleitend einbezogen. Die Beteiligung erfolgte durch leitfadengestützte Fachgespräche, moderierte digitale „Round Tables“, Online-Kollaboration sowie einer [Fach- und Diskussionsveranstaltung im Deutschen Bundestag](#).

Zitationsvorschlag

Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) (2025): Resilienz-Dossier Wassermanagement in der Landwirtschaft (Autor/innen: Behrendt, S.; Bledow, N.; Evers-Wölk, M.; Kahlisch, C.; Kollosche, I.; Uhl, A.). Berlin. <https://foresight.tab-beim-bundestag.de/wassermanagement-in-der-landwirtschaft>

Das TAB analysiert im Auftrag des Deutschen Bundestages umfassend und vorausschauend die Potenziale wissenschaftlich-technischer Entwicklungen und ihre Auswirkungen auf die Gesellschaft.

Organisation

Betreiber: [ITAS](#) im [KIT](#)
Partner: [IZT](#) und [iit](#) in der [VDI/VDE-IT](#)
Auftraggeber: [Deutscher Bundestag](#)
Steuerungsgremium: [Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung](#)

Kontakt

[Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag \(TAB\)](#)
[Mediananfragen](#)

