

# Infrastruktursystem Landwirtschaft und Ernährung

Ergebnisse aus dem Resilienz-Radar



Downloadversion  
[foresight.tab-beim-bundestag.de](https://foresight.tab-beim-bundestag.de)

**Juni 2024**  
**Foresight-Report**

## Foresight-Report zum Infrastruktursystem Landwirtschaft und Ernährung, Juni 2024, Downloadversion

Die TAB Foresight-Reports fassen die Ergebnisse des Resilienz-Radars zusammen und erscheinen seit 2024 jährlich auf der Microsite <https://foresight.tab-beim-bundestag.de>.

Das [Resilienz-Radar](#) dient der Identifikation und Bewertung von Entwicklungen, die mit systemischen Risiken für kritische Infrastrukturen verbunden sind. Neben der Analyse zentraler Trends liegt der Fokus auf der Einschätzung von systemischen Risiken mit potenziell weitreichenden Auswirkungen, um die Gefährdungslage einzelner Infrastruktursysteme fundiert zu bewerten. Zudem werden jeweils infrastrukturspezifische Fokusthemen vorgeschlagen, die von besonderer Relevanz für eine vertiefende Untersuchung sind. Die Ergebnisse werden jährlich in den Foresight-Reports zusammengefasst.



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

# Inhalt

Infrastruktursystem Landwirtschaft und Ernährung .....	2
Überblick über aktuelle Trends.....	7
Trendcluster Marktabhängigkeiten und unsichere Lieferketten.....	11
Trendcluster Ökologische Produktionsgrundlagen .....	16
Trendcluster Flächennutzungskonkurrenzen.....	21
Trendcluster Digitalisierung von Landwirtschaft, Logistik und Handel .....	26
Systemische Risiken und ihre Auswirkungen auf das Infrastruktursystem Landwirtschaft und Ernährung.....	31
Status quo der Gefährdungslagen.....	31
Entwicklungsdynamiken ausgewählter systemischer Risiken und Gefährdungslagen.....	40
Gefährdungslagen im Zuge der Transformation.....	47
Fokusthemen.....	51
Fokusthema 1: New-Food-Systeme – Pflanzenproduktion und zellkulturbasierte Herstellung tierischer Lebensmittel .....	51
Fokusthema 2: digitale Landwirtschaft.....	52
Fokusthema 3: Wassermanagement in der Landwirtschaft.....	52
Methodik und Vorgehen .....	54

# Infrastruktursystem Landwirtschaft und Ernährung

Zu den Kernaufgaben des Infrastruktursystems Landwirtschaft und Ernährung gehört eine ausreichende Versorgung der Bevölkerung mit gesunden und ausgewogenen Nahrungsmitteln. Mit den ökologischen Grundlagen besteht dabei eine besondere Wechselwirkung: Die Lebensmittelproduktion ist auf intakte natürliche Ressourcen angewiesen, hat aber gleichzeitig großen Einfluss auf den Zustand von Boden, Wasser, Klima und Biodiversität. Die Entwicklung eines nachhaltigen Landwirtschafts- und Ernährungssystems ist deshalb Gegenstand zahlreicher politischer Strategien. Die Agrarpolitik wird durch eine breite Palette an Akteuren bestimmt, wobei mit der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) zentrale Rahmensetzungen auf EU-Ebene vorgenommen werden.



Systembild des Infrastruktursystems Landwirtschaft und Ernährung

Um Klimaneutralität bis 2045 zu erreichen, sollen die Treibhausgasemissionen der Landwirtschaft in Deutschland bis zum Jahr 2030 um ca. 7 % reduziert werden [1]. Zudem hat sich die Bundesregierung das Ziel gesetzt, dass bis 2030 30% der Fläche ökologisch bewirtschaftet werden, während in der Ernährung eine pflanzenbetonte Ernährung mit einem hohen Anteil an ökologisch

erzeugten, saisonal-regionalen Lebensmitteln gestärkt werden soll [2]. Auf EU-Ebene benennt die Farm-to-Fork-Strategie verschiedene Leitziele bis 2030, zu denen u.a. eine Reduktion des Einsatzes von gefährlichen Pestiziden und des Umsatzes antimikrobieller Mittel für Nutztiere und Aquakultur um 50% sowie der Düngemittel um mindestens 20 % zählen [3].

Die Stärkung der Resilienz des Landwirtschafts- und Ernährungssystems ist eine zentrale Priorität der Bundesregierung. Ihre Resilienzstrategie beinhaltet u.a. die folgenden Maßnahmen: Sicherung der Existenz landwirtschaftlicher Betriebe, Diversifizierung der landwirtschaftlichen Einkommen und von Absatzmärkte sowie die regelmäßige Überprüfung der Fähigkeit, auf Versorgungsstörungen angemessen zu reagieren [4]. Zur Steigerung der Resilienz sollen außerdem regionale Wertschöpfungsketten beitragen [2].

Das Infrastruktursystem ist komplex und befindet sich nicht zuletzt aufgrund der Transformationsbestrebungen in einer kontinuierlichen Veränderungsdynamik. Dies betrifft sowohl die beteiligten Akteure als auch die Wertschöpfungsstrukturen.

## Vorleistungen

Zu den landwirtschaftlichen Vorleistungen gehören u.a. Betriebsmittel wie Saat-gut, Dünger, Pflanzenschutz- sowie Futtermittel, außerdem Landmaschinen und Gebäude. Die Produktion von Vorleistungen wird weitgehend von multinational agierenden Unternehmen dominiert.

## Landwirtschaftliche Produktion

Als grundlegende Stufe in der Lebensmittelkette produzieren landwirtschaftliche Betriebe (in Ostdeutschland häufig organisiert über Agrargenossenschaften) sowie Fischereibetriebe Nahrungsmittel (Pflanzen, Tiere und Meeresfrüchte), die angebaut, gezüchtet oder geerntet werden, um Lebensmittelprodukte herzustellen.

## Lagerung und Verteilung

Lebensmittel müssen gelagert werden, da zwischen Erzeugung/Verarbeitung und Verbrauch längere Zeiträume liegen können. Oft ist eine gekühlte oder gefrorene Lagerung erforderlich, um die Haltbarkeit zu verlängern. Wichtige Lebensmittel wie Getreide, Mehl, Zucker, Nudeln und Konserven können zwar bei Raumtemperatur gelagert werden, müssen aber vor Feuchtigkeit, Hitze und Licht geschützt werden. Transport- und Logistikunternehmen sorgen dafür, dass die landwirtschaftlichen Erzeugnisse nach der Ernte zu den Lagern

und später zu Verarbeitungsanlagen oder Märkten transportiert werden und auch Vorleistungen wie Saatgut, Dünger, Pestizide, Futtermittel und Geräte rechtzeitig zu den landwirtschaftlichen Betrieben gelangen. In vielen Fällen werden Vorleistungen und landwirtschaftliche Produkte über Ländergrenzen hinweg exportiert oder importiert.

## Verarbeitung

Die Verarbeitung von Lebensmitteln umfasst eine Vielzahl von Prozessen, die darauf abzielen, Rohstoffe in verbrauchsfertige Lebensmittel umzuwandeln. Zu den einzelnen Aufgaben gehören die Reinigung und Sortierung der Rohstoffe, das Schneiden und Zerkleinern in die gewünschten Formen und Größen, Kochen oder Erhitzen und ggf. Konservierung. Zuletzt werden die Lebensmittel verpackt, inkl. Kennzeichnung und Etikettierung.

## Handel und Konsum

Der Handel von Lebensmitteln erfolgt zwischen Produzenten, Großhandels- oder Einzelhandelsunternehmen sowie Verbraucher/innen. Dafür spielen unterschiedliche Vertriebskanäle eine Rolle, darunter Supermärkte, Onlineshops, Lieferdienste, Wochenmärkte und Direktverkauf vom Bauernhof. Die Lebensmittelprodukte werden schließlich von den Verbraucher/innen konsumiert. Dabei entstehen Abfallprodukte unterschiedlicher Art, insbesondere Bioabfälle sowie Verpackungsabfälle, aber auch nicht verkaufte Lebensmittel enden größtenteils als Abfall.

## Referenzen

1. Umweltbundesamt (2023): Bodenbearbeitung, [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)
2. Bundesregierung (2024): Gutes Essen für Deutschland – Ernährungsstrategie der Bundesregierung, [www.bmel.de/](http://www.bmel.de/)
3. Europäische Kommission (2020): Communication: Farm to Fork Strategy for a fair, healthy and environmentally friendly food system, [ec.europa.eu](http://ec.europa.eu)
4. Bundesregierung (2022): Deutsche Strategie zur Stärkung der Resilienz gegenüber Katastrophen. Umsetzung des Sendai Rahmenwerks für Katastrophenvorsorge (2015–2030) – Der Beitrag Deutschlands 2022–2030

## Kernergebnisse

### Vier Trendcluster

prägen gemäß der Trendanalyse derzeit das Infrastruktursystem: Marktabhängigkeiten und unsichere Lieferketten, die Verschlechterung der ökologischen Produktionsgrundlagen, wachsende Flächennutzungskonkurrenzen sowie die Digitalisierung von Landwirtschaft, Logistik und Handel.

### Aufkommende Technologien

sind u.a. Alternativen zu tierischen Proteinquellen, die genomische Überwachung antimikrobieller Resistenzen in der Tierhaltung sowie alternative Ansätze in der Stickstoffdüngerproduktion.

### Der Status quo der Gefährdungslagen

durch systemische Risiken ist für das Infrastruktursystems Landwirtschaft und Ernährung insgesamt als mittel einzustufen. Die Funktionsfähigkeit und die Stabilität des Infrastruktursystems sind derzeit vor allem durch die Wetterextreme gefährdet.

### Entwicklungsdynamiken

infolge des Klimawandels sind besonders ausgeprägt und führen zu einer zunehmenden Gefährdungslage durch die globale Erwärmung und Wetterextreme.

### Die Transformation des Landwirtschafts- und Ernährungssystems

ist aufgrund bestehender ökonomischer und rechtlicher Pfadabhängigkeiten herausfordernd. Zusätzlich spielen die eingefahrenen Verhaltensroutinen und nutzungsbezogenen Pfadabhängigkeiten eine entscheidende Rolle. Auch die gesellschaftliche Polarisierung bezüglich konventioneller und nachhaltiger Landwirtschaft könnte das Erreichen der Transformationsziele gefährden.

### Fokusthemen

Für eine Vertiefung im Rahmen des Resilienz-Check werden folgende Fokusthemen vorgeschlagen: New-Food-Systeme – Pflanzenproduktion und zellkulturbasierte Herstellung tierischer Lebensmittel, Digitale Landwirtschaft – Feldroboter und Roboterschwärme sowie Wassermanagement in der Landwirtschaft.

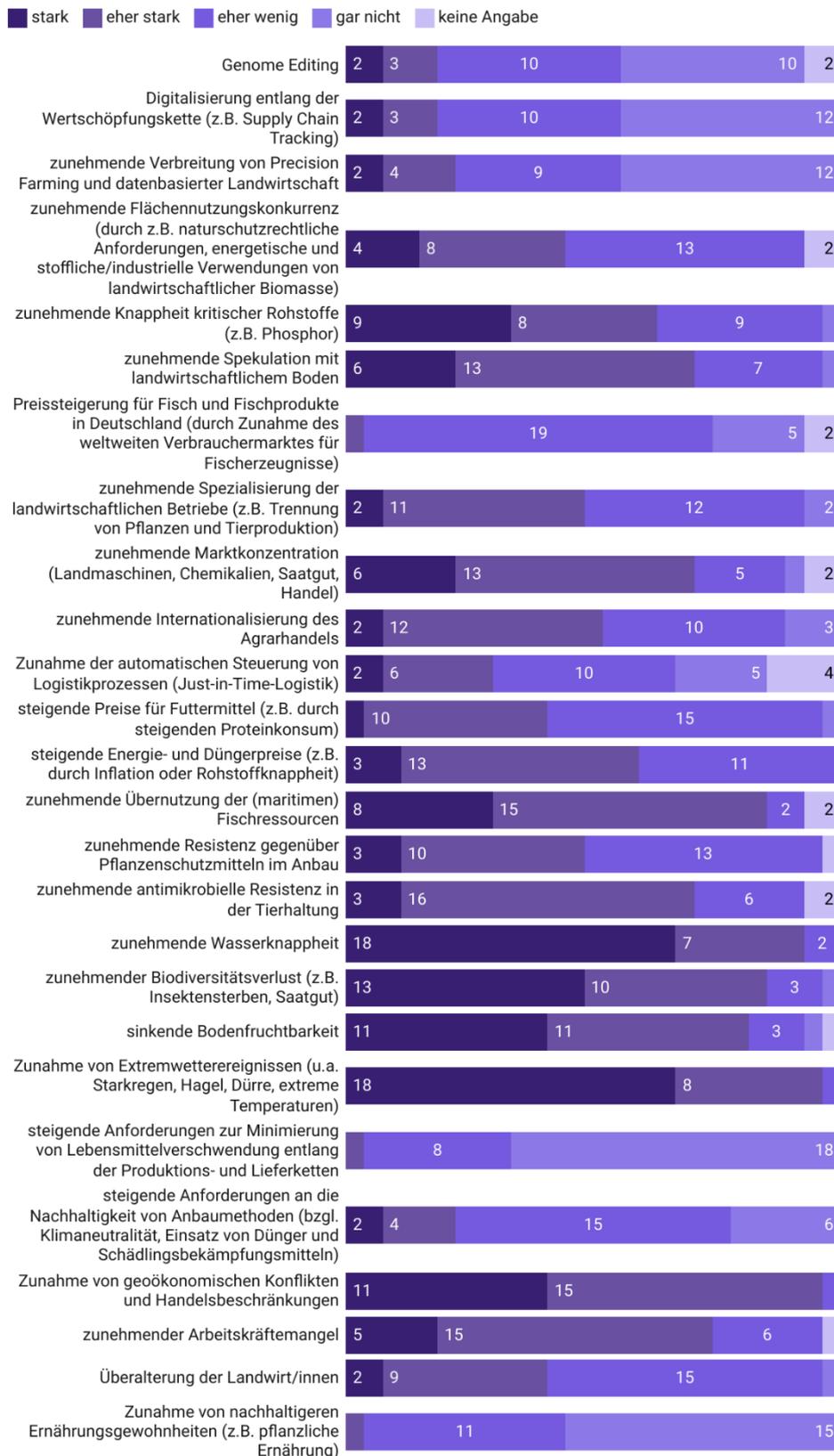
# Überblick über aktuelle Trends

Strukturwandel, Arbeitskräftemangel und die Zunahme von nachhaltigen Produktions- und Konsumpraktiken prägen das Infrastruktursystem Landwirtschaft und Ernährung. Darüber hinaus lassen sich weitere Trends in vier Clustern zusammenfassen. Märkten und Lieferketten verändern sich radikal. Die ökologischen Produktionsgrundlagen verschlechtern sich, was wachsende Flächennutzungskonkurrenz verstärkt. Die Digitalisierung von Landwirtschaft, Logistik und Handel schreitet rasch voran.

Die Landwirtschaft in Deutschland unterliegt seit den 1950er Jahren einem **kontinuierlichen Strukturwandel**. Dieser ist gekennzeichnet durch eine stetige Abnahme der Betriebe insgesamt (von rund 1,5 Mio. im Jahr 1960 auf rund 260.000 im Jahr 2022), während gleichzeitig die Zahl der großen Betriebe mit 100 ha und mehr zunimmt [1]. Festzustellen ist außerdem eine zunehmende Spezialisierung der Betriebe sowie ein rasanter technischer Wandel, der zu einer erhöhten Arbeits- und Flächenproduktivität geführt hat. Der Anteil an Saisonarbeitskräften wie auch das Alter der Erwerbstätigen ist in der Landwirtschaft höher als in anderen Branchen [2]. Generell scheint sich ein **zunehmender Arbeitskräftemangel** [3] in der Landwirtschaft bemerkbar zu machen – laut Ansicht der meisten befragten Expert/innen trägt dieser Trend stark zur Vulnerabilität des Ernährungssystems bei ([Datengrafik](#)).

Ein weiterer prägender Trend für das Infrastruktursystem ist die Zunahme nachhaltiger Ernährungsgewohnheiten sowie nachhaltiger Anbaumethoden. Beide Entwicklungen tragen laut den befragten Expert/innen zur Resilienz des Infrastruktursystems bei ([Datengrafik](#)). Die **Zunahme nachhaltigerer Ernährungsgewohnheiten** lässt sich in Deutschland wie auch in anderen Industrieländern beobachten [4]. So steigt die Zahl der Personen in Deutschland, die sich überwiegend pflanzlich ernähren [5], während der Fleischkonsum seit einigen Jahren tendenziell abnimmt [6]. Auch die Nachfrage nach regionalen und saisonalen Produkten nimmt in Deutschland zu [7][8] und der Pro-Kopf-Absatz von Fleischersatzprodukten wächst kontinuierlich an [9].

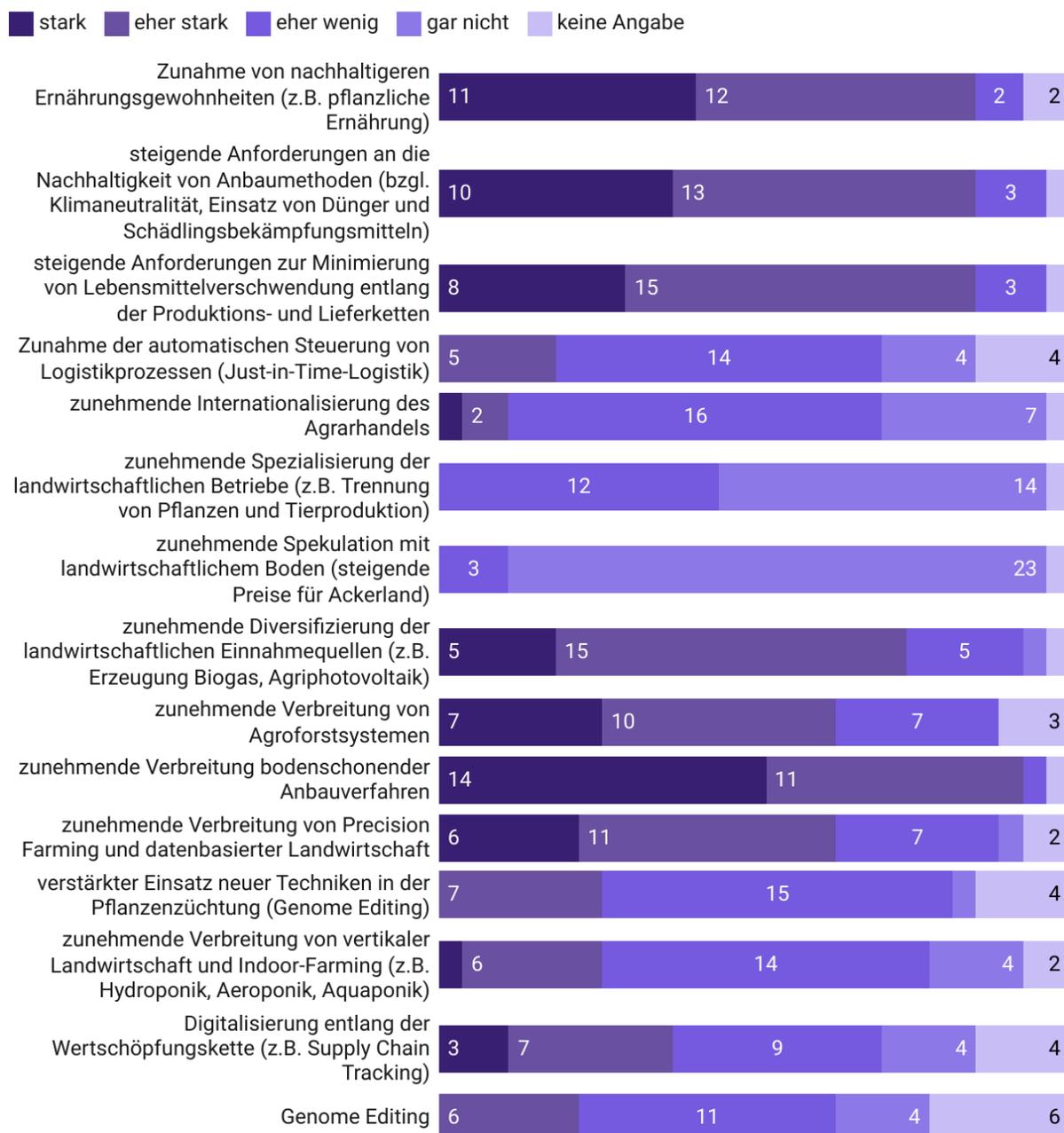
## Inwieweit tragen die folgenden Trends aus Ihrer Sicht zu einer erhöhten Verletzlichkeit des Infrastruktursystems Landwirtschaft und Ernährung innerhalb der nächsten zehn Jahre bei?



Ergebnisse aus der Expertenbefragung zum Infrastruktursystem Landwirtschaft und Ernährung (n=27)

Quelle: TAB, Resilienz-Radar 2023/24 · Erstellt mit Datawrapper

## Inwieweit tragen die folgenden Trends aus Ihrer Sicht zu einer erhöhten Resilienz des Infrastruktursystems Landwirtschaft und Ernährung innerhalb der nächsten zehn Jahre bei?



Expertenbefragung zum Infrastruktursystem Landwirtschaft und Ernährung (n=27)

Quelle: TAB, Resilienz-Radar 2023/24 • Erstellt mit Datawrapper

Zugleich sind aber auch – als gegenläufige Trends – Zunahmen des Konsums von Convenience- und Verzehrfertigprodukten sowie des Außer-Haus-Marktes (mit einem Rückgang 2020 und 2021 während der COVID-19-Pandemie) festzustellen [10]. Die Zunahme nachhaltiger Anbaumethoden zeigt sich an der steigenden Bedeutung der

ökologischen Landwirtschaft in Deutschland. So hat der Anteil von Biolebensmitteln am Lebensmittelumsatz seit 2011 kontinuierlich zugenommen, wobei 2022 erstmals ein Rückgang zu beobachten war [8]. Auch der Anteil von Biobetrieben an den landwirtschaftlichen Betrieben ist in den vergangenen Jahren kontinuierlich gestiegen, von 1,1 % im Jahr 1995 auf 16,4 % im Jahr 2021 [11].

## Referenzen

1. DVB (2023): Durchschnittliche Pachtpreise für landwirtschaftlich genutzte Flächen nach Nutzungsart in Deutschland in den Jahren 1991 bis 2020 (in Euro pro Hektar). 7.12.2023, [de.statista.com/](https://de.statista.com/) (26.2.2024)
2. BMEL (2020): Studie zum Arbeitsmarkt Landwirtschaft in Deutschland, [www.bmel.de/](https://www.bmel.de/)
3. Debonne, N., Bürgi, M., Diogo, V., Helfenstein, J., Herzog, F., Levers, C., ... & Verburg, P. (2022). The geography of megatrends affecting European agriculture. *Global Environmental Change*, 75, 102551. DOI: [10.1016/j.gloenvcha.2022.102551](https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2022.102551)
4. JRC (2021): Trend: Sustainable Consumption. 8.12.2021, [knowledge4policy.ec.europa.eu/](https://knowledge4policy.ec.europa.eu/) (13.12.2023)
5. BMEL (2023): Deutschland, wie es isst. der BMEL-Ernährungsreport 2023, <https://www.bmel.de/>
6. BLE (2023): Fleischverbrauch in Deutschland pro Kopf in den Jahren 1991 bis 2022. [de.statista.com/](https://de.statista.com/) (9.1.2024)
7. BMEL (2021): Deutschland, wie es isst. Der Ernährungsreport 2021. [www.bmel.de/](https://www.bmel.de/)
8. BÖLW (2023): Umsatz mit Bio-Lebensmitteln in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2023 (in Milliarden Euro). 13.2.2024. [de.statista.com/](https://de.statista.com/) (26.2.2024)
9. Statista (2023): Pro-Kopf-Absatz von Fleischersatzprodukten in Deutschland in den Jahren 2018 bis 2022 und einer Prognose bis 2028 (in Kilogramm). [de.statista.com/](https://de.statista.com/) (15.2.2024)
10. Statista (2023): Convenience Food in Deutschland. Statistik-Report zu Convenience Food und Snackangeboten in Deutschland. [de.statista.com/](https://de.statista.com/)
11. BMEL (2023): Anteil der Betriebe im ökologischen Landbau an allen Agrarbetrieben in Deutschland in den Jahren 1995 bis 2021, [de.statista.com/](https://de.statista.com/)

# Trendcluster

## Marktabhängigkeiten und unsichere Lieferketten

Internationalisierung, Marktkonzentrationen sind Langzeittendenzen, die das Infrastruktursystem stark definieren. In den letzten Jahren haben vor allem geökonomische Konflikte und stark fluktuierende Preise für Energie und Futtermittel die Preise für Lebensmittel in die Höhe getrieben. Die zunehmende Knappheit kritischer Rohstoffe spitzt diese Trends zu.

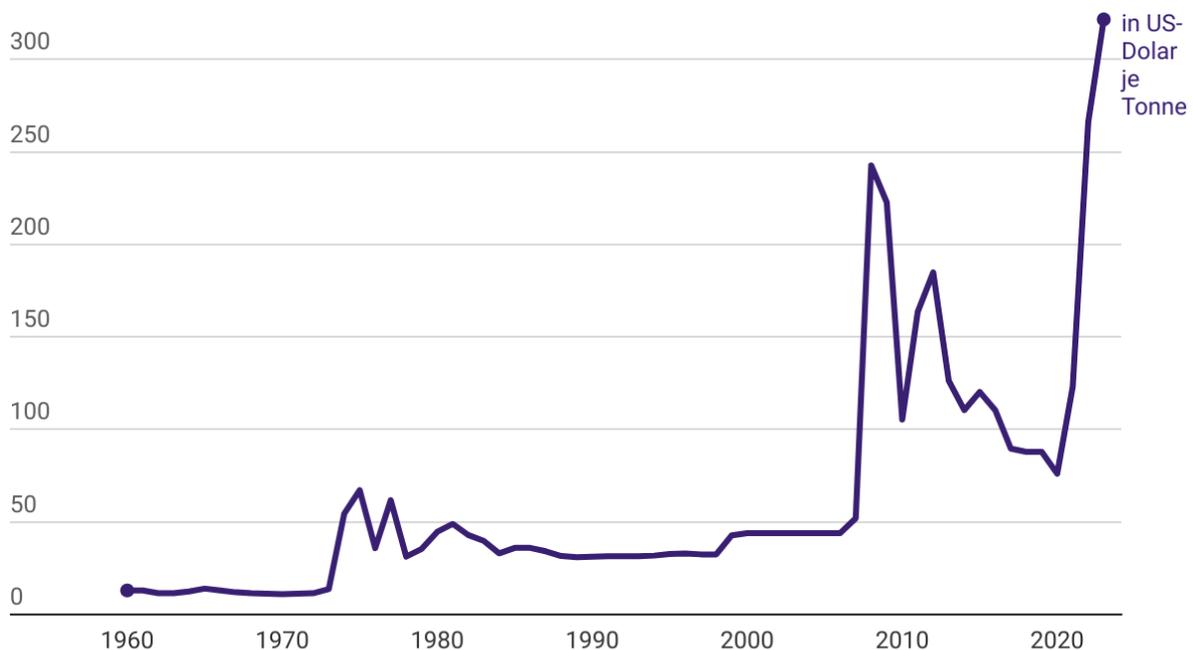
Der Handel mit Vorleistungen sowie Lebensmitteln ist seit vielen Jahren von einer starken **Internationalisierung** geprägt, was sich am Aufstieg multinationaler Lebensmittelkonzerne ablesen lässt [1]. So ist der internationale Handel mit Agrarprodukten in den letzten 60 Jahren um mehr als das 10-Fache gewachsen [2]. Mit der Internationalisierung geht eine **Zunahme von Marktkonzentrationen** einher, ein Trend, der von der Mehrheit der befragten Expert/innen als ein wichtiger Vulnerabilitätsfaktor gesehen wird (**Datengrafik**). Insbesondere die Herstellung von Vorleistungen, wie beispielsweise Agrartechnik, Saatgut [2] oder Pflanzenschutzmittel [3], wird von wenigen Akteuren dominiert. Bei Phosphor und Kali, die neben Stickstoff zu den wichtigsten Nährstoffen für das Pflanzenwachstum gehören und als Düngemittel essenziell sind, ist die EU zu knapp 70 und bei Kali gar zu 85 % von Importen abhängig [4]. Wenige Länder dominieren hier den weltweiten Markt. Der Trend zur Marktkonzentration zeigt sich auch in der Verarbeitung, im Handel und in der Verteilung/Logistik [5]. So wird der Lebensmittelhandel in Deutschland von vier großen Unternehmen (mit 74,2 % Umsatzanteil bei Lebensmitteln; [6]) dominiert und die Zahl der Lieferanten von Supermärkten hat sich in den letzten 20 Jahren deutlich verkleinert [7].

Im Ergebnis ist die Versorgung Deutschlands mit einzelnen Vorleistungen und Lebensmittelprodukten von wenigen Ländern oder einer geringen Anzahl von Unternehmen abhängig. Je höher die entsprechenden Abhängigkeiten Deutschlands sind, desto umfangreicher können die Auswirkungen geökonomischer Konflikte sein. Bricht ein Konflikt zwischen zwei Ländern aus, kann dies sich schnell auf internationale Lieferketten auswirken und zu plötzlichen Engpässen führen. Die **zunehmenden geökonomischen Konflikte und Handelsrestriktionen** wurden von den befragten Expert/innen als einer der Faktoren eingeschätzt, der die Verletzlichkeit des

Infrastruktursystems besonders stark erhöht ([Datengrafik](#)). Wie die jüngsten internationalen Spannungen bereits gezeigt haben, können **steigende Preise für Energie und Dünger sowie für Futtermittel** die Folge sein, was wiederum die Preise für landwirtschaftliche Erzeugnisse in die Höhe treibt [\[8\]](#). Weitere Trends wirken sich ebenfalls auf die Preise von Lebensmitteln aus, wie zum Beispiel der Anstieg des weltweiten Kalorienverbrauchs, der wachsende Proteinkonsum [\[9\]](#) sowie die **zunehmende Knappheit kritischer Rohstoffe**, wozu Phosphor gehört [\[10\]](#). Der Preis für Phosphatgestein, die wichtigste natürliche Phosphorquelle, ist von 2020 bis 2022 von unter 100 US-Dollar auf über 300 US-Dollar angestiegen ([Datengrafik](#)).

## Durchschnittlicher Preis für Phosphatgestein weltweit in den Jahren 1960 bis 2023

(in US-Dollar je Tonne)



Quelle: World Bank; CRU Group; Fertilizer International, Januar 2024 • Erstellt mit Datawrapper

Von Lieferengpässen und -verzögerungen war im deutschen Einzelhandel im Jahr 2023 der Lebensmitteleinzelhandel am stärksten betroffen. Das ist insbesondere auf den Angriffskrieg gegen die Ukraine, aber auch auf Fabrikschließungen infolge der COVID-19-Pandemie, reduzierte Frachtkapazitäten und Knappheiten von Rohstoffen sowie Vorleistungen zurückzuführen [\[11\]](#). Unter anderem, um den Risiken von Markkonzentrationen und der hohen Abhängigkeit von globalen

Lieferketten entgegenzuwirken, entstehen in Europa regionale Ernährungsräte und Einrichtungen wie [Food Hubs](#), die der Beschaffung und Vermarktung regional erzeugter Lebensmittel dienen. Auch Konzepte für eine [alternative Stickstoffdüngerproduktion](#) könnten zur Stärkung der Resilienz des Infrastruktursystems beitragen.

## Aufkommende technologische Entwicklungen

### *Food Hubs*

Food Hubs sind »Einrichtungen, die sich unter anderem um die Beschaffung und Vermarktung regional erzeugter Lebensmittel kümmern[n] und zugleich den Zugang zu gesunden Lebensmitteln in der Bevölkerung ermöglich[en]« sollen [\[12\]](#). Food Hubs werden auch im Rahmen von Ernährungsnetzwerken (Food Policy Networks [\[13\]](#)) oder Ernährungsräten (Food Policy Councils) entwickelt und haben die Schaffung regionaler Lebensmittelkreisläufe zum Ziel. Entsprechende Initiativen sind seit mehreren Jahrzehnten in Nordamerika vorzufinden und in jüngster Zeit auch in Deutschland (z.B. Ernährungsrat Brandenburg: [\[14\]](#)). Die konkreten Ziele können je nach Initiative variieren. In der Regel wird angestrebt, die Ernährungssysteme an lokale Gegebenheiten anzupassen, um regionale Wertschöpfungspotenziale unter Nutzung neuer (urban-ruraler) Kooperations- und Governancemodelle (z.B. Zusammenarbeit mit der lokalen Politik) auszubauen. Indem sich Landwirten neue regionale Märkte eröffnen (beispielsweise über die Möglichkeit der Direktvermarktung ihrer Produkte), soll Marktkonzentrationen durch multinationale Lebensmittelkonzerne entgegengewirkt werden und so die Resilienz des Infrastruktursystems gestärkt werden. Bisher sind solche Initiativen in Europa aber noch in einem noch frühen Entwicklungsstadium [\[15\]](#).

### *Alternative Stickstoffdüngerproduktion*

Um hohe Erträge in guter Qualität zu erhalten, werden in der traditionellen Landwirtschaft mineralische Stickstoffdünger eingesetzt. Der Verbrauch von Stickstoff in der deutschen Landwirtschaft war in den letzten Jahren zwar rückläufig, betrug im Wirtschaftsjahr 2022/23 aber immer noch rund eine Mio. t. Industriell hergestelltes Ammoniak ist der Grundstoff für die Produktion von mineralischen Stickstoffdüngemitteln. Die Ammoniakherstellung ist jedoch sehr energieintensiv, was sich negativ auf die Preise und das Klima auswirkt. Um Ammoniak nachhaltiger zu produzieren, könnte klimaneutral hergestellter Wasserstoff als Rohstoff genutzt werden und die Anlagen könnten mit erneuerbarem Strom beheizt werden. Dafür braucht es allerdings eine umfangreiche Anpassung aktueller Anlagen und Verfahren – wie die erste kommerzielle Anlage zur Produktion von

grünem Ammoniak in Puertollano (Spanien) zeigt – bzw. gänzlich neue Konzepte wie flexible Ammoniakreaktoren [16]. Perspektivisch könnte die aktuell energieintensive Herstellung von Ammoniak auch durch alternative Verfahren ersetzt werden. Daran wird intensiv geforscht. Ende 2022 wurden zwei Katalysesysteme entwickelt, die Licht als Energiequelle nutzen, um Ammoniak zu erzeugen [17][18]. Besonders vielversprechend erscheint auch die strombasierte Stickstoffreduktion mittels Elektrokatalyse. Dafür wird der Enzymkomplex Nitrogenasen mit Elektroden kombiniert. Allerdings stehen solche Technologien noch in einer sehr frühen Entwicklungsphase. Allererste Vermarktungskonzepte werden entwickelt, um kleine Apparate auf den Markt zu bringen, die eine dezentrale Düngerproduktion direkt auf dem Bauernhof ermöglichen könnten [19]. Gelänge es, die noch hohen technologischen und wirtschaftlichen Hürden zu überwinden, könnten solche dezentralen Systeme dazu beitragen, die Abhängigkeit der Betriebe von Lieferketten zu reduzieren.

#### Referenzen

1. Davis, K. F.; Downs, S.; Gephart, J. A. (2021): Towards food supply chain resilience to environmental shocks. In: Nature food 2(1), S. 54–65, DOI: [10.1038/s43016-020-00196-3](https://doi.org/10.1038/s43016-020-00196-3)
2. WBGU (2020): Landwende im Anthropozän: Von der Konkurrenz zur Integration. Hauptgutachten. Berlin, [www.wbgu.de/](http://www.wbgu.de/) (9.1.2024)
3. Mordorintelligence (2024): Analyse der Marktgröße und des Anteils von Pflanzenschutzmitteln in Europa – Wachstumstrends und Prognosen (2023 – 2028), [www.mordorintelligence.com/](http://www.mordorintelligence.com/)
4. EC (2022): Ensuring availability and affordability of fertilisers, [agriculture.ec.europa.eu/](http://agriculture.ec.europa.eu/) (28.2.2024)
5. Hamilton, H.; Henry, R.; Rounsevell, M.; Moran, D.; Cossar, F.; Allen, K.; Boden, L.; Alexander, P. (2020): Exploring global food system shocks, scenarios and outcomes. In: Futures 123, S. 102601. DOI: [10.1016/j.futures.2020.102601](https://doi.org/10.1016/j.futures.2020.102601)
6. BVE (2023): Marktanteile der führenden Unternehmen im Lebensmittelhandel in Deutschland in den Jahren 2009 bis 2022. 8.6.2023, [de.statista.com/](https://de.statista.com/) (28.2.2024)
7. Garnett, P.; Doherty, B.; Heron, T. (2020): Vulnerability of the United Kingdom's food supply chains exposed by COVID-19. In: Nature food 1(6), S. 315–318. DOI: [10.1038/s43016-020-0097-7](https://doi.org/10.1038/s43016-020-0097-7)
8. Statistisches Bundesamt (2024): Monatlicher Erzeugerpreisindex landwirtschaftlicher Produkte in Deutschland von August 2021 bis Dezember 2023 (Indexjahr 2020=100). 14.2.2024, [de.statista.com/](https://de.statista.com/) (26.2.2024)

9. OECD/FAO (2023): OECD-FAO Agricultural Outlook 2023-2032. OECD Publishing, Paris. [www.oecd.org/](http://www.oecd.org/)
10. EC (2023a): Aggravating resource scarcity. 26.1.2023, [knowledge4policy.ec.europa.eu/](http://knowledge4policy.ec.europa.eu/) (9.1.2024)
11. Ifo (2023): Umfrage zu Lieferproblemen im Einzelhandel nach Branchen in Deutschland. ifo Institut, 11.8.2023, [de.statista.com/](http://de.statista.com/) (26.2.2024)
12. Bionales (2024): Ein Food Hub für Frankfurt? Eine Studie aus Sicht der Außer-Haus-Verpflegung anhand von Best-Practice Beispielen aus den USA und Kanada, [bionales.de/](http://bionales.de/) (26.2.2024)
13. Boer, A. C. den; van der Valk, A. J.; Regeer, B. J.; Broerse, J. E. (2023): Food policy networks and their potential to stimulate systemic intermediation for food system transformation. In: Cities 135, S. 104239. DOI: [10.1016/j.cities.2023.104239](https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104239)
14. Stadt-land-move (2024): Ernährungsrat Brandenburg, [www.stadt-land-move.org/](http://www.stadt-land-move.org/) (28.2.2024)
15. Michel, S.; Wiek, A.; Bloemertz, L.; Bornemann, B.; Granchamp, L.; Villet, C.; Gascón, L.; Sipple, D.; Blanke, N.; Lindenmeier, J.; Gay-Para, M. (2022): Opportunities and challenges of food policy councils in pursuit of food system sustainability and food democracy—a comparative case study from the Upper-Rhine region. In: Front. Sustain. Food Syst. 6. DOI: [10.3389/fsufs.2022.916178](https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.916178)
16. Torrente-Murciano, L.; Smith, C. (2023): Process challenges of green ammonia production. In: Nat. Synth 2(7), S. 587–588. DOI: [10.1038/s44160-023-00339-x](https://doi.org/10.1038/s44160-023-00339-x)
17. Ashida, Y.; Onozuka, Y.; Arashiba, K.; Konomi, A.; Tanaka, H.; Kuriyama, S.; Yamazaki, Y.; Yoshizawa, K.; Nishibayashi, Y. (2022): Catalytic nitrogen fixation using visible light energy. In: Nature communications 13(1), S. 7263. DOI: [10.1038/s41467-022-34984-1](https://doi.org/10.1038/s41467-022-34984-1)
18. Johansen, C.; Boyd, E. A.; Peters, J. C. (2022): Catalytic transfer hydrogenation of N<sub>2</sub> to NH<sub>3</sub> via a photoredox catalysis strategy. In: Sciences advances (8(43)). DOI: [10.1126/sciadv.ade3510](https://doi.org/10.1126/sciadv.ade3510)
19. Durrani, J. (2024): Jenseits von »Haber-Bosch«. Ammoniakproduktion. In: Spektrum der Wissenschaft (2.24), S. 66–72, [www.spektrum.de/](http://www.spektrum.de/)

# Trendcluster Ökologische Produktionsgrundlagen

Die letzten fünf Jahren hat eine zunehmende Wasserknappheit das Infrastruktursystem geprägt. Extremwetterereignisse sind inzwischen zur Normalität geworden, was Herausforderungen für die Bodenfruchtbarkeit mit sich bringt. Der Verlust von Biodiversität prägt die Landwirtschaft und die Übernutzung von Fischressourcen die Zukunft von Fischereien und Aquakulturen. In der Tierhaltung werden vor allem wachsende antimikrobielle Resistenzen als relevanter Vulnerabilitätsfaktor angesehen.

Das Infrastruktursystem ist derzeit stark durch die Verschlechterung der ökologischen Produktionsgrundlagen geprägt. Dies zeigt sich an der **Zunahme von Extremwetterereignissen**, die sich auf die Ernteerträge auswirken und in Form von Wind und Regen stark zur Bodenerosion beitragen. In Europa steigen die Temperaturen verhältnismäßig schnell [1], und die durchschnittliche Anzahl der Hitzetage pro Jahr hat seit 1980 deutlich zugenommen [2], ebenso die Anzahl und Schwere von Dürreperioden (ablesbar u.a. an der Bodenfeuchtigkeit; [3]). Starkniederschlag tritt insgesamt häufiger auf [4][5]. Alle befragten Expert/innen schätzen **Extremwetterereignisse** als einen sehr relevanten Vulnerabilitätsfaktor für das Infrastruktursystem ein ([Datengrafik](#)).

Eine **zunehmende Wasserknappheit** erhöht für die meisten befragten Expert/innen die Verletzlichkeit des Infrastruktursystems stark ([Datengrafik](#)). Die Bodenwasservorräte haben in den letzten Jahrzehnten während der **Vegetationsperiode** signifikant ab- [6] und die Jahre mit niedriger Bodenfeuchte deutlich zugenommen [7]. Von 2007 bis zum Sommer 2023 wies der Wassernutzungsindex hierzulande auf Wasserstress hin [8]. Um mit der zunehmenden Trockenheit umzugehen, werden Kulturpflanzen gezüchtet, die gegenüber Trockenheit resistenter sind [9]. Darüber hinaus werden Strategien und **Technologien für den Umgang mit Trockenheit und Wasserknappheit** entwickelt. Durch die starken Niederschläge im Winter 2023/2024 haben sich die Grundwasserstände allerdings erholt. Die Böden sind in vielen Regionen nass und teilweise überstaut, was wiederum andere Herausforderungen für die Landwirtschaft mit sich bringt, wie Erosion und eine entsprechende Verringerung der biologischen Funktion von Böden [10].

Neben den zunehmenden Extremwetterereignissen und zunehmender Wasserknappheit zählen die sinkende Bodenfruchtbarkeit, der fortschreitende Biodiversitätsverlust sowie die **Übernutzung von Fischressourcen** zu den Trends, die aus Sicht der Expert/innen besonders stark zur Verletzlichkeit des Sektors beitragen ([Datengrafik](#)). Die **sinkende Bodenfruchtbarkeit** ist durch Landdegradation bedingt und führt zu einer langfristigen Verschlechterung des Zustands terrestrischer Ökosysteme und einer Beeinträchtigung der biologischen Produktivität [\[11\]\[12\]](#). Von den befragten Expert/innen wird die **Verbreitung bodenschonender Anbauverfahren**, etwa der pfluglosen Bodenbearbeitung oder der Agroforstwirtschaft [\[13\]](#), als relevanter Beitrag zur Stärkung der Resilienz des Infrastruktursystems eingeschätzt ([Datengrafik](#)). Der **Verlust von Biodiversität** lässt sich sowohl in der Pflanzen- als auch der Tierproduktion beobachten: 75 % der Nahrungsmittel weltweit setzen sich aus 12 Nutzpflanzenarten und fünf Tierarten zusammen [\[12\]](#). In den letzten 100 Jahren ist die Vielfalt der Kulturpflanzenarten um 75 % zurückgegangen [\[14\]](#). Betroffen ist aber auch die Insektenvielfalt bzw. die Vielfalt der natürlichen Bestäuber [\[15\]](#), von denen schätzungsweise etwa 35 % der weltweiten pflanzenbasierten Nahrungsmittelproduktion abhängen [\[16\]](#). Neben der Vielfalt der Insektenarten ist zudem selbst innerhalb von Schutzgebieten in Deutschland die Insektenbiomasse zwischen 1989 und 2016 um ca. 75 % zurückgegangen [\[17\]](#). Der Biodiversitätsverlust beeinträchtigt die natürliche Regulierung von Schädlingen und Krankheiten [\[14\]\[12\]](#). Als problematisch für die Resilienz des Infrastruktursystems werden vor allem die **wachsenden antimikrobiellen Resistenzen in der Tierhaltung** [\[18\]](#) eingeschätzt ([Datengrafik](#)). Zur Bekämpfung antibiotikaresistenter Bakterien in der Nutztierhaltung könnten Bakteriophagen eine Rolle spielen [\[19\]](#). Außerdem könnten sich Fortschritte im Bereich einer **KI-gestützten genomischen Überwachung antimikrobieller Resistenzen** perspektivisch als hilfreich erweisen.

## Aufkommende technologische Entwicklungen

### Technologien zum Umgang mit Wasserknappheit

Um mit Wasserknappheit in der Landwirtschaft umzugehen, werden neue Technologien entwickelt. Fortschritte sind im Bereich der Absorption von Feuchtigkeit aus der Luft zu verzeichnen. Es wurden Lösungen entwickelt, die wenig oder gar keine Energie verbrauchen [\[20\]](#). Zuletzt hat die Entwicklung eines Materials (SHCP-10) Aufmerksamkeit

auf sich gezogen, das Luftfeuchtigkeit absorbiert und sie mithilfe von Sonnenenergie wieder freigibt [21]. Mit 1 kg des neuen Materials können – unter wüstenähnlichen Bedingungen – 300 ml Trinkwasser pro Aufnahme/Abgabezyklus gewonnen werden. Der Vorgang kann mehrere Mal am Tag wiederholt werden [22]. Allerdings sind solche technologischen Lösungen noch in einer sehr frühen Entwicklungsphase [20] und Anwendungspotenziale bestehen vor allem in Wüstenregionen. In Deutschland und Europa dürften Hebel eher in der Wiederverwendung von Abwasser für die landwirtschaftliche Bewässerung sowie in naturbasierten Lösungen (z.B. Erhöhung der Infiltrations- und Speicherkapazität von Feuchtgebieten und Böden durch Humusaufbau oder Einsatz von Biokohle, Schutz von Grundwasser) zu finden sein [20].

## Genomische Überwachung antimikrobieller Resistenzen in der Tierhaltung

In den letzten Jahren wurden bei der Analyse langer Genomsequenzen sowie der kombinierten Analyse von mikrobiellen epidemiologischen und phylogenomischen Daten große Fortschritte erzielt. Davon profitiert auch die Überwachung antimikrobieller Resistenzen, die zunehmend auf genomischen Überwachungssystemen beruht. Im Vergleich zu herkömmlichen Überwachungsansätzen, bei denen Mikroorganismen kulturbasiert isoliert werden und die antibiotische Aktivität *in vitro* getestet wird, bietet die Sequenzierung des gesamten Genoms von Mikroorganismen eine höhere Auflösung, eine präzisere Charakterisierung von multiplen Resistenzen und eine Trendrückverfolgung sowie -vorhersage. Viele Datenbanken und Softwaretools zur Katalogisierung und Identifizierung von Antibiotikaresistenzgenen in bakteriellen Genomen stehen inzwischen zur Verfügung. KI könnte perspektivisch eine Unterstützung bei der Verarbeitung großer Datenmengen spielen, um neuartige Resistenzmechanismen zu identifizieren. In der Landwirtschaft ermöglichen Genomsequenzierung und Metagenomik die Rückverfolgung der Übertragung von Antibiotikaresistenzen zwischen Tieren, der Umwelt und dem Menschen und unterstützen so die Bemühungen zur Förderung eines verantwortungsvollen Einsatzes von Antibiotika und zur Verhinderung der Ausbreitung von Resistenzen [23].

### Referenzen

1. Eurostat (2019): Erderwärmung in Europa und weltweit | Statista. Statista, [de.statista.com/](https://de.statista.com/) (11.3.2024)

2. Europäische Kommission (2024): Durchschnittliche Anzahl der Hitzewellen-Tage pro Jahr<sup>1</sup> in ausgewählten Ländern Europas im Zeitraum 1980 bis 2024 (Stand: Februar 2024). [de.statista.com/](https://de.statista.com/) (26.2.2024)
3. Europäische Kommission (2023): Anomalien der durchschnittlichen Bodenfeuchte in Deutschland von 1980 bis 2022. Statista, 11.3.2024, [de.statista.com/](https://de.statista.com/)
4. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (2021): Anzahl der Tage mit einer Höchsttemperatur von mindestens 30 Grad Celsius oder Starkniederschlag in Deutschland zwischen 1901 und 2010. 1.11.2021, [de.statista.com/](https://de.statista.com/) (26.2.2024)
5. Statista (2023): Wetterextreme in Deutschland. Statista Overview-Report zum Auftreten und der Gefahr von wetterbedingten Extremereignissen in Deutschland, [de.statista.com/](https://de.statista.com/)
6. Umweltbundesamt (2019): BO-I-1: Bodenwasservorrat in landwirtschaftlich genutzten Böden, [www.umweltbundesamt.de/](https://www.umweltbundesamt.de/) (9.1.2024)
7. Europäische Kommission (2023): Anomalien der durchschnittlichen Bodenfeuchte in Europa von 1980 bis 2022. 17.4.2023, [de.statista.com/](https://de.statista.com/) (26.2.2024)
8. Umweltbundesamt (2022): Wasserressourcen und ihre Nutzung. 14.11.2022, [www.umweltbundesamt.de/](https://www.umweltbundesamt.de/) (22.9.2023)
9. TAB (2023): Aufgaben und Herausforderungen einer vielfältigen und vielfaltsfördernden Pflanzenzüchtung. Arbeitsbericht Nr. 197. DOI: [10.5445/IR/1000155032](https://doi.org/10.5445/IR/1000155032)
10. Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (2024): Von einem Extrem ins andere – Fragen und Antworten zur aktuellen Hochwassersituation, [www.ufz.de/](https://www.ufz.de/)
11. Luig, L.; Dewitz, I.; Witte, T.; Wannemacher, D.; Stiem-Bhatia, L.; Weigelt, J. (2024): Bodenatlas 2024, [www.bund.net/](https://www.bund.net/)
12. WBGU (2020): Landwende im Anthropozän: Von der Konkurrenz zur Integration. Hauptgutachten. Berlin, [www.wbgu.de/](https://www.wbgu.de/) (9.1.2024)
13. Umweltbundesamt (2023): Bodenbearbeitung, [www.umweltbundesamt.de/](https://www.umweltbundesamt.de/)
14. JRC (2023): Food futures – Sustainable food systems. [publications.jrc.ec.europa.eu/](https://publications.jrc.ec.europa.eu/) (9.1.2024)
15. BfN (2024): Insektenrückgang, [www.bfn.de/](https://www.bfn.de/) (28.2.2024)
16. BMBF (2022): Der Traum von Nikola Tesla. Vorausschau: Themenblätter. Runde I bis III, [www.vorausschau.de/](https://www.vorausschau.de/)
17. Hallmann, C. A.; Sorg, M.; Jongejans, E.; Siepel, H.; Hofland, N.; Schwan, H.; Stenmans, W.; Müller, A.; Sumser, H.; Hörren, T.; Goulson, D.; Kroon, H. de (2017): More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. In: PloS one 12(10), S. e0185809. DOI: [10.1371/journal.pone.0185809](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185809)

18. JRC (2021a): Contingency plan for ensuring food supply and food security. [publications.jrc.ec.europa.eu/](https://publications.jrc.ec.europa.eu/)
19. TAB (2023): Bakteriophagen in Medizin, Land- und Lebensmittelwirtschaft – Anwendungsperspektiven, Innovations- und Regulierungsfragen. Arbeitsbericht Nr. 206, [publikationen.bibliothek.kit.edu/](https://publikationen.bibliothek.kit.edu/)
20. EPRS (2023): What if Europe ran out of water? [epthinktank.eu/](https://epthinktank.eu/) (9.1.2024)
21. Freund, S. (2023): Neues Polymer sammelt Wasser aus der Luft. In: VDI-Nachrichten 26, 2023, S. 20–21
22. Hochwarth, D. (2023): Innovatives neues Material erntet Luftfeuchtigkeit und bringt Wasser in die Wüste, [www.ingenieur.de/](https://www.ingenieur.de/) (14.5.2024)
23. Djordjevic, S. P.; Jarocki, V. M.; Seemann, T.; Cummins, M. L.; Watt, A. E.; Drigo, B.; Wyrsh, E. R.; Reid, C. J.; Donner, E.; Howden, B. P. (2023): Genomic surveillance for antimicrobial resistance – a One Health perspective. In: Nature reviews. Genetics. DOI: [10.1038/s41576-023-00649-y](https://doi.org/10.1038/s41576-023-00649-y)

## Trendcluster Flächennutzungskonkurrenzen

Flächenkonkurrenzen ergeben sich aus einer Vielfalt von Faktoren. Steigende Anforderungen an die Nachhaltigkeit von Anbaumethoden, Diversifizierung der landwirtschaftlichen Einnahmequellen und Bodenspekulation wirken sich auf die Flächennutzung aus. Deswegen zielen zahlreiche innovative Anbausysteme und technologische Entwicklungen darauf ab, den Flächenverbrauch bei der Produktion von Lebensmitteln zu reduzieren.

Die Konkurrenz um landwirtschaftliche Flächen nimmt in Teilen Deutschlands zu. Sie ergibt sich zum einen durch die Verschlechterung der ökologischen Lebensgrundlagen, was sich negativ auf die Eignung von Flächen für die Landwirtschaft auswirkt und zu Ertragsschwankungen sowie ggf. höheren Lebensmittelpreisen führt. Zum anderen tragen zur Flächenkonkurrenz aber auch die **steigenden Anforderungen an die Nachhaltigkeit von Anbaumethoden** bei, die tendenziell zu geringeren Erträgen führen [1]. Ein weiterer Faktor ist schließlich, dass landwirtschaftliche Flächen – aufgrund einer zunehmenden Nachfrage nach landwirtschaftlichen Erzeugnissen für verschiedene Verwendungszwecke, über die Lebensmittelproduktion hinaus – immer vielfältiger genutzt werden. Ablesen lässt sich das u.a. an einer **zunehmenden Diversifizierung der landwirtschaftlichen Einnahmequellen** (z.B. Erzeugung erneuerbarer Energien) [2]. In Deutschland wird inzwischen 16 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche für die Produktion von nachwachsenden Rohstoffen zur Energieerzeugung genutzt [3]. Dieser Wert könnte durch den Umstieg von fossilen Rohstoffen auf klimaschonende Alternativen [4] und perspektivisch den Einsatz von Bioenergie mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung (BEECS) [5] weiter steigen.

Die Kaufpreise für Ackerland sowie die Pachtpreise für landwirtschaftlich genutzte Flächen sind in den vergangenen 15 Jahren stark angestiegen [6], was nicht zuletzt eine Folge der zunehmenden Konkurrenz um landwirtschaftlich nutzbare Fläche ist [7]. Zugleich wächst die Anzahl der überregional aktiven Investoren, die wirtschaftliche Interessen haben, die über die landwirtschaftliche Nutzung des Bodens hinausgehen [8]. Die **zunehmende Spekulation mit landwirtschaftlichem Boden** sehen die meisten befragten Expert/innen als eine Entwicklung an, die eher stark zur Verletzlichkeit des Infrastruktursystems beiträgt ([Datengrafik](#)).

Unter anderem über die Doppelnutzung landwirtschaftlicher Nutzfläche wird angestrebt, die Flächenkonkurrenz zu minimieren. Ein Beispiel für

eine Doppelnutzung, die auch politisch gefördert wird, ist die Agriphotovoltaik [9]. Weitere Lösungsansätze, um Flächenkonkurrenzen zu entschärfen, könnten die Entwicklung von *Alternativen zu tierischen Proteinquellen* sowie *bodenlose Anbausysteme* bieten.

## Aufkommende technologische Entwicklungen

### Alternativen zu tierischen Proteinquellen

Die Fleischproduktion ist besonders flächenintensiv. Der Flächenverbrauch für 100 g verzehrfähiges Rinderfleisch liegt zwischen 2,7 und 4,9 m<sup>2</sup>, wobei ein Großteil davon für den Futteranbau benötigt wird und außerhalb Deutschlands für den Sojaanbau anfällt [10]. Die Entwicklung von Alternativen zu tierischen Proteinen bietet entsprechend große Potenziale [11], um Flächen zu sparen und Lieferketten zu diversifizieren. Der Markt für alternative Proteine und für pflanzliche Ernährung wächst schnell [12]. Nicht nur Investitionen in die Entwicklung der zellkulturbasierten Fleischproduktion sind zu verzeichnen, erforscht und entwickelt werden auch zahlreiche weitere Lösungen wie Präzisionsfermentierung zur Erzeugung von Proteinen oder funktionellen Lebensmitteln [13] oder auch Aquakultursysteme, die Holzabfälle in nahrhafte Meeresfrüchte (Nacktmuscheln) umwandeln [14]. Außerdem ergeben sich mit der KI-gestützten Vorhersage von Proteineigenschaften [15] neue Möglichkeiten für die Erforschung alternativer Proteinquellen (aus Pflanzen, Insekten, Pilzen und Algen [16] oder auch von Lebensmittelenzymen [17]). Weiter zu erforschen sind aber auch die Auswirkungen alternativer Proteinquellen auf Umwelt, menschliche Gesundheit, Ernährungssicherheit und Tierwohl, die oft noch unklar sind [18].

### Bodenlose Anbausysteme

Zu den bodenlosen Anbausystemen zählen u.a. die vertikale Landwirtschaft, bei der Nahrungsmittel in vertikal gestapelten Ebenen oder Regalen anstatt in traditionellen horizontalen Feldern oder Gewächshäusern angebaut werden, sowie Indoor Farming, bei dem komplett auf Sonnenlicht verzichtet wird. Steigende Umsätze sind derzeit zu verzeichnen und es wird mit einem weiteren Marktwachstum gerechnet [19][20]. Bodenlose Anbausysteme können verschiedene Ansätze umfassen (z.B. Hydroponik, Aquaponik, Aeroponik), wobei die exakte Kontrolle der Anbaubedingungen große Vorteile bietet. Da bodenlose Anbaumethoden in der Regel auf einem Kreislaufsystem für Wasser und Nährstoffe basieren, bieten sie auch ökologische

Potenziale. Zwar sind sie nicht für landwirtschaftliche Massenprodukte (z.B. Getreide, Zuckerrüben, Ölpflanzen) geeignet, dennoch sind für einzelne Anbaupflanzen (z.B. Salat) bereits gute Ergebnisse im bodenlosen Anbau erzielt worden. Im Durchschnitt liefern solche Systeme doppelt so hohe Erträge wie der Feldanbau, wobei die wichtigsten Einflussfaktoren die angebaute Sorte, die Jahreszeit, die Art der Nährstoffzufuhr und die Art der Beleuchtung sind [21]. Allerdings ist insbesondere der hohe energetische Aufwand eine große Herausforderung und wirkt sich negativ auf die Produktionskosten und Wirtschaftlichkeit aus [22][23], sodass sich bodenlose Anbausysteme noch nicht in der Breite durchsetzen konnten.

## Referenzen

1. Krause, H.-M.; Mayer, J.; Oberson A. ; Jarosch, K.; Fließbach, A.; Mäder, P. (Hg.) (2023): Umweltwirkung und Produktivität von biologischen und konventionellen Systemen – Ergebnisse aus 42 Jahre DOK Versuch. 16. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, [www.orgprints.org/](http://www.orgprints.org/)
2. Brandt, M. (2021): Zweites Standbein Energieerzeugung. 20.9.2021, [de.statista.com/](https://de.statista.com/) (26.2.2024)
3. BZL (2023): Was wächst auf Deutschlands Feldern?, [www.landwirtschaft.de/](http://www.landwirtschaft.de/) (9.1.2024)
4. WBGU (2020): Landwende im Anthropozän: Von der Konkurrenz zur Integration. Hauptgutachten. Berlin, [www.wbgu.de/](http://www.wbgu.de/) (9.1.2024)
5. Science media center (2020): Rolle und Potenzial von negativen Emissionen durch BECCS. 24.8.2020, [www.sciencemediacenter.de/](http://www.sciencemediacenter.de/)(9.1.2024)
6. DVB (2023): Durchschnittliche Pachtpreise für landwirtschaftlich genutzte Flächen nach Nutzungsart in Deutschland in den Jahren 1991 bis 2020 (in Euro pro Hektar). 7.12.2023, [de.statista.com/](https://de.statista.com/) (26.2.2024)
7. Bundesinformationszentrum Landwirtschaft (2024a): Bodenpreise: Warum sie seit Jahren steigen. 5.1.2024, [www.praxis-agrar.de/](http://www.praxis-agrar.de/) (28.2.2024)
8. Laschewski, L.; Tietz, A. (2020): Auswirkungen überregional aktiver Investoren in der Landwirtschaft auf ländliche Räume. Ergebnisse aus zwei Fallstudien. Johann Heinrich von Thünen-Institut, [www.bmel.de/](http://www.bmel.de/) (9.1.2024)
9. Bundesinformationszentrum Landwirtschaft (2024a): Bodenpreise: Warum sie seit Jahren steigen. 5.1.2024, [www.praxis-agrar.de/](http://www.praxis-agrar.de/) (28.2.2024)
10. Jetzke, T.; Richter, S. (2020): Die Zukunft im Blick: Fleisch der Zukunft. Trendbericht zur Abschätzung der Umweltwirkungen von pflanzlichen

- Fleischersatzprodukten, essbaren Insekten und In-vitro-Fleisch.  
Umweltbundesamt, [www.umweltbundesamt.de/](http://www.umweltbundesamt.de/)
11. Jetzke, T.; Bovenschulte, M.; Ehrenberg-Silies, S. (2016): Fleisch 2.0 – unkonventionelle Proteinquellen. TAB-Themenkurzprofil Nr. 5, [publikationen.bibliothek.kit.edu/](http://publikationen.bibliothek.kit.edu/)
  12. Umweltbundesamt (2023): Umweltbewusstseinsstudie 2022, [www.umweltbundesamt.de/](http://www.umweltbundesamt.de/)
  13. ITA (2023c): Proteinwende – Alternative Eiweißquellen breitenwirksam nutzen, [www.parlament.gv.at/](http://www.parlament.gv.at/) (9.1.2024)
  14. Willer, D. F.; Aldridge, D. C.; Mehrshahi, P.; Papadopoulos, K. P.; Archer, L.; Smith, A. G.; Lancaster, M.; Strachan, A.; Shipway, J. R. (2023): Naked Clams to open a new sector in sustainable nutritious food production. In: npj Sustain. Agric. 1(1). DOI: [10.1038/s44264-023-00004-y](https://doi.org/10.1038/s44264-023-00004-y)
  15. Callaway, E. (2022): What's next for AlphaFold and the AI protein-folding revolution. In: Nature 604(7905), S. 234–238. DOI: [10.1038/d41586-022-00997-5](https://doi.org/10.1038/d41586-022-00997-5)
  16. Bedoya, M. G.; Montoya, D. R.; Tabilo-Munizaga, G.; Pérez-Won, M.; Lemus-Mondaca, R. (2022): Promising perspectives on novel protein food sources combining artificial intelligence and 3D food printing for food industry. In: Trends in Food Science & Technology 128, S. 38–52. DOI: [10.1016/j.tifs.2022.05.013](https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.05.013)
  17. Wang, X.; Yang, P.; Zhao, B.; Liu, S. (2023): AI-assisted food enzymes design and engineering: a critical review. In: Syst Microbiol and Biomanuf 3(1), S. 75–87. DOI: [10.1007/s43393-022-00138-z](https://doi.org/10.1007/s43393-022-00138-z)
  18. Duluins, O.; Baret, P. V. (2024): A systematic review of the definitions, narratives and paths forwards for a protein transition in high-income countries. In: Nature food 5(1), S. 28–36. DOI: [10.1038/s43016-023-00906-7](https://doi.org/10.1038/s43016-023-00906-7)
  19. BIS (2023): Indoor Farming Technology Industry and Technology Overview, [bisresearch.com/](http://bisresearch.com/) (9.1.2024)
  20. Bundesanzeiger (2022): Umsatz von InFarm – Indoor Urban Farming GmbH weltweit in den Jahren 2018 bis 2020 (in 1.000 Euro). 20.6.2022, [de.statista.com/](http://de.statista.com/) (26.2.2024)
  21. Gargaro, M.; Murphy, R. J.; Harris, Z. M. (2023): Let-Us Investigate; A Meta-Analysis of Influencing Factors on Lettuce Crop Yields within Controlled-Environment Agriculture Systems. In: Plants (Basel, Switzerland) 12(14). DOI: [10.3390/plants12142623](https://doi.org/10.3390/plants12142623)
  22. Ahamed, M. S.; Sultan, M.; Monfet, D.; Rahman, M. S.; Zhang, Y.; Zahid, A.; Bilal, M.; Ahsan, T. A.; Achour, Y. (2023): A critical review on efficient thermal environment controls in indoor vertical farming. In: Journal of Cleaner Production 425, S. 138923. DOI: [10.1016/j.jclepro.2023.138923](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138923)

23. Hawes, J. K.; Goldstein, B. P.; Newell, J. P.; Dorr, E.; Caputo, S.; Fox-Kämper, R.; Grard, B.; Ilieva, R. T.; Fargue-Lelièvre, A.; Ponizy, L.; Schoen, V. et al. (2024): Comparing the carbon footprints of urban and conventional agriculture. In: *Nat Cities* 1(2), S. 164–173.  
DOI: [10.1038/s44284-023-00023-3](https://doi.org/10.1038/s44284-023-00023-3)

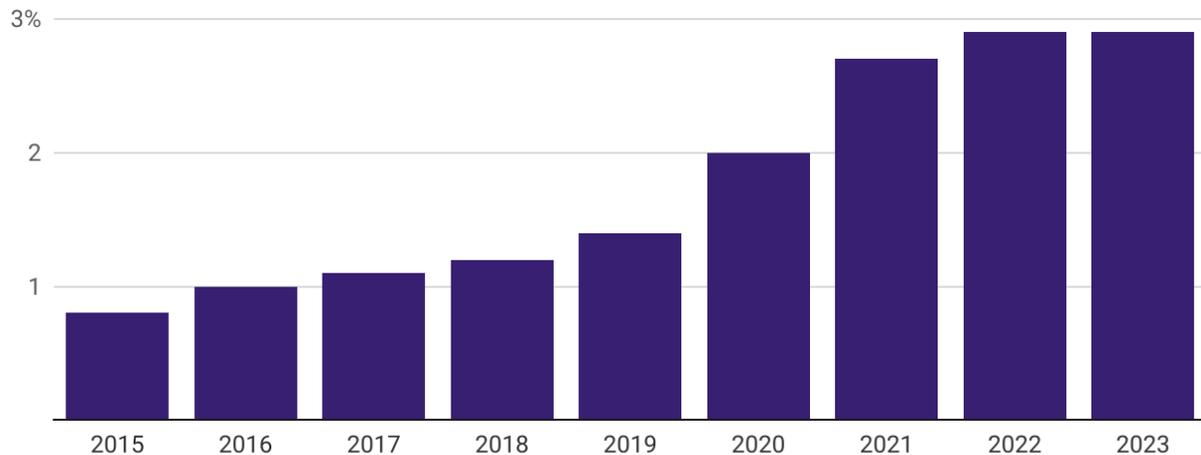
# Trendcluster Digitalisierung von Landwirtschaft, Logistik und Handel

Die Digitalisierung schreitet rasch voran, auch in Teilen des Infrastruktursystems, die lange unvernetzt funktioniert haben. Inzwischen sind digitale Lösungen von der Erzeugung von Lebensmitteln bis zum Verkauf in den Filialen des Einzelhandels allgegenwärtig. Feldrobotik und Technologien zur Nachverfolgbarkeit von Wertschöpfungs- und Lieferketten zählen zu den aufkommenden soziotechnischen Entwicklungen.

Digitaltechnologien verbreiten sich in der Landwirtschaft seit mehr als 20 Jahren und prägen zunehmend die Lebensmittelproduktion auf dem Acker und im Stall. Der Anteil der Landwirt/innen, die **Precision-Farming-Technologien** einsetzen, wozu beispielsweise satellitengesteuerte Landmaschinen und der Einsatz moderner Sensorik gehören, nimmt stetig zu [1]. Auch innovativere Technologien wie Drohnen, Melk- und Stallroboter kommen in landwirtschaftlichen Betrieben zunehmend zum Einsatz, während im Bereich der **Feldrobotik** erste praxistaugliche Prototypen zur Verfügung stehen. Die erhobenen Betriebsdaten werden verbreitet in Farmmanagementsystemen gespeichert und mit externen Daten zusammengeführt, was eine zunehmend datenbasierte Steuerung der landwirtschaftlichen Prozesse sowie der Lebensmittelproduktion ermöglicht. Diese Entwicklungen werden von den Expert/innen mehrheitlich als resilienzförderlich eingeschätzt (**Datengrafik**).

Auch im Handel halten **digitale Lösungen** wie tablet- oder smartphonegestützte Kassensysteme oder digitale Preisschilder Einzug. Die Möglichkeit, Produkte online zu bestellen und sich an die Haustür liefern zu lassen (Click & Collect) wird von Kund/innen zunehmend in Anspruch genommen [2]. Der Onlinehandel mit Lebensmitteln in Deutschland hat in den letzten Jahren zugenommen. Der Umsatz vervierfachte sich seit 2014 [3]; der Marktanteil nahm ebenfalls zu, liegt mit rund 3 % aber noch auf einem sehr niedrigen Niveau (**Datengrafik**). Auch in der Landwirtschaft steigt die Anzahl der Onlineplattformen für Betriebsmittel und Ernteprodukte [4]. Generell ist der Anteil der Einzelhandelsunternehmen, die KI-Maßnahmen bereits einsetzen, von 7,5 % im Jahr 2020 auf 23,5 % im Jahr 2023 gestiegen [5]. KI-basierte Innovationen und Automatisierungen kommen auch in der Logistikbranche zunehmend zum Einsatz [6]. Bei der Integration der Lieferketten spielen insbesondere **Supply Chain Tracking**, Blockchain und Internet of Things eine zentrale Rolle [7].

## Marktanteil des Onlinehandels am Umsatz mit Lebensmitteln in Deutschland in den Jahren 2015 bis 2023



Details: wertmäßiger Marktanteil

Quelle: HDE, Online-Monitor 2024, S. 10 • Erstellt mit Datawrapper

Die Digitalisierung ermöglicht es, Logistikprozesse umfassend zu optimieren. Digitale Lösungen können dabei helfen, logistische Verzögerungen und Kapazitätsengpässe zu reduzieren [8][9]. Außerdem können sie einen Beitrag zur **Minderung der Lebensmittelverschwendung** leisten [10], was laut Expertenbefragung ein wichtiger Beitrag zur Resilienzstärkung des Infrastruktursystems wäre (**Datengrafik**). Allerdings gehen mit einer umfassenden **Digitalisierung der Lebensmittelkette** auch erhöhte Cybersicherheitsrisiken einher.

## Aufkommende technologische Entwicklungen

### Feldrobotik

Während in der Tierproduktion robotische Anwendungen (z.B. automatische Melksysteme) bereits etabliert sind, steckt die vollständige Automatisierung pflanzenbaulicher Prozesse (Aussaat, Düngung, Ernte, Pflanzenschutz bzw. Unkrautbekämpfung etc.) mithilfe von Feldrobotern noch in den Kinderschuhen. Es gibt eine Vielzahl von Forschungsprototypen [11], aber erst wenige marktreife Konzepte in Bereichen wie der Unkrautbekämpfung oder der Aussaat [12]. Gründe für das noch relativ frühe Entwicklungsstadium sind zum einen die auf dem Acker vorherrschenden Umweltbedingungen, die besonders hohe

Anforderungen an die sensorische Umfelderkennung und die autonome Steuerung erforderlich machen. Zum anderen können kleine Feldroboter bei weitem nicht die gleiche Schlagkraft und damit Leistungsfähigkeit wie herkömmliche Landmaschinen erreichen, die in den letzten Jahrzehnten immer größer und schwerer geworden sind. Ihr Einsatz macht deshalb in der Regel eine Neuausrichtung der Ackerbauprozesse und Pflanzenbausysteme erforderlich. Erforscht werden beispielsweise im Schwarmverband operierende Einheiten [13] oder das Spot Farming [14], bei dem mehrere Kultursorten auf einem Feld von vielen kleineren, elektrisch betriebenen Robotern kleinräumig bewirtschaftet werden. Mithilfe von Feldrobotern bietet sich so grundsätzlich das Potenzial, die Landwirtschaft klima- und umweltfreundlicher zu machen, ohne dass größere Ertragsverluste zu erwarten sind. Zudem könnten autonome Feldroboter, die prinzipiell rund um die Uhr einsatzfähig sind, auch dabei helfen, das Agrarsystem resilienter gegen den zunehmenden Arbeitskräftemangel zu machen [15].

### Technologien zur Nachverfolgbarkeit von Wertschöpfungs- und Lieferketten (Supply Chain Tracking)

Mithilfe von standardisierten Schnittstellen und Technologien wie QR-Codes, RFID (Radio-Frequency Identification) oder Blockchain können Produktinformationen entlang der Wertschöpfungskette weitergereicht werden. Für die Landwirtschaft (und die vor- und nachgelagerten Bereiche) bietet sich so die Möglichkeit, landwirtschaftliche Produkte vom Teller bis zum Acker rückverfolgbar zu machen und erfolgte Arbeitsschritte und Ressourceneinsätze transparent und vertrauenswürdig für Verbraucher/innen zu dokumentieren. Die Anwendungsmöglichkeiten betreffen aber nicht nur Informationen, die an den Endkunden weitergereicht werden sollen, sondern auch solche, die für die Bereitstellung von Saatgut, Düngemitteln, Viehfutter und Wasserressourcen wichtig sind. Verschiedene Anbieter haben innovative Softwarelösungen entwickelt, die auf die spezifischen Bedarfe der Lebensmittelindustrie zugeschnitten sind (beispielsweise Sicherstellung einer lückenlosen Kühlkette) und mit denen sich Transport- und Lagerprozesse in Echtzeit überwachen lassen. Mögliche Auswirkungen von Personalmangel oder Transportausfällen (z.B. durch die Schließung eines Verschiffungshafens) lassen sich so schnell entlang der Wertschöpfungskette kommunizieren und es können Lösungen gefunden werden, um Lieferengpässe zu vermeiden. Außerdem können Datenplattformen in Zeiten von Polykrisen die Resilienz von globalen Lieferketten erhöhen [16]. Eine umfassende Kartierung der internationalen Lieferbeziehungen auf

Unternehmensebene würde die Erarbeitung politischer Maßnahmen sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene unterstützen, denn der Mangel an detaillierten wirtschaftlichen Mikrodaten behindert häufig gezielte politische Ansätze [17].

## Referenzen

1. Rohleder, B.; Meinel, T. (2022): Die Digitalisierung der Landwirtschaft. 12.5.2022, [www.bitkom.org/](http://www.bitkom.org/) (25.1.2024)
2. Statista (2023): Technikrends im Handel, [de.statista.com/](https://de.statista.com/)
3. Bevh (2023): Umsatz mit Lebensmitteln im Online-Handel in Deutschland von 2014 bis 2022 (in Millionen Euro). 26.1.2023, [de.statista.com/](https://de.statista.com/) (26.2.2024)
4. Agrar-Trends (2020): Agrarhandel per Mausklick: Zahl der Online-Plattformen boomt. 11.2.2020, [agrar-trends.de/](http://agrar-trends.de/)
5. Handel 4.0. (2023): Umfrage zur Anwendung von künstlicher Intelligenz im Handel bis 2023. 18.4.2023, [de.statista.com/](https://de.statista.com/) (26.2.2024)
6. SCI Verkehr (2021): Für wie bedeutend halten Sie folgende Megatrends in der Logistikbranche? 17.11.2021, [de.statista.com/](https://de.statista.com/) (26.2.2024)
7. Forbes (2023): Understanding Automation Technology to Optimize C-Store Operations, [www.forbes.com/](http://www.forbes.com/) (26.2.2024)
8. Artoonian, T. A.; Ross, R. B.; Shupp, R. S. (2023): Identification and assessment of supply chain risks: The case of food hubs. In: Agribusiness. DOI: [10.1002/agr.21877](https://doi.org/10.1002/agr.21877)
9. Europäische Kommission (2021): Contingency plan for ensuring food supply and food security in times of crisis. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Brüssel, [eur-lex.europa.eu/](http://eur-lex.europa.eu/)
10. PricewaterhouseCoopers (2024a): The Sustainable Food Revolution. Future-proofing the world's food supply. Viewpoint, [www.strategyand.pwc.com/](http://www.strategyand.pwc.com/) (12.1.2024)
11. Bioökonomie (2022): Digital-Gipfel: Feldroboter beeindruckt Kanzler. [biooekonomie.de/](http://biooekonomie.de/) (20.2.2024)
12. Naio (2024): Oz. The farming assistant for time-consuming and arduous tasks, [www.naio-technologies.com/](http://www.naio-technologies.com/) (20.2.2024)
13. Fendt (2024): Projekt Xaver: Forschung im Bereich Agrarrobotik. Precision Farming weiter gedacht. [www.fendt.com/](http://www.fendt.com/)
14. Wegener, J. K.; Urso, L.-M.; Hörsten, D. von; Hegewald, H.; Minßen, T.-F.; Schattenberg, J.; Gaus, C.-C.; Witte, T. de; Nieberg, H.; Isermeyer, F.; Frerichs, L.; Backhaus, G. F. (2019): Spot farming – an alternative for future plant production. 70-89 Seiten / Journal of Cultivated Plants, Bd.

- 71 Nr. 4 (2019): Themenheft Neue Pflanzenbausysteme.  
DOI: [10.5073/JfK.2019.04.02](https://doi.org/10.5073/JfK.2019.04.02)
15. WEF (2024): If agtech is to transform the world, farmers must feel the benefits. 16.4.2024, [www.weforum.org/](http://www.weforum.org/) (20.2.2024)
  16. WEF (2023): Shared Intelligence for Resilient Supply Systems, [www3.weforum.org/](http://www3.weforum.org/)
  17. Pichler, A.; Diem, C.; Brintrup, A.; Lafond, F.; Magerman, G.; Buiten, G.; Choi, T. Y.; Carvalho, V. M.; Farmer, J. D.; Thurner, S. (2023): Building an alliance to map global supply networks. In: Science 382(6668), S. 270–272. DOI: [10.1126/science.adi7521](https://doi.org/10.1126/science.adi7521)

# Systemische Risiken und ihre Auswirkungen auf das Infrastruktursystem Landwirtschaft und Ernährung

Die zuverlässige Bereitstellung ausreichender Nahrung bildet eine unabdingbare Grundlage für jede menschliche Gesellschaft. Systemische Risiken können die Funktionsfähigkeit und Stabilität des Infrastruktursystems Landwirtschaft und Ernährung grundlegend beeinträchtigen, vor allem im Hinblick auf das Schutzziel der sicheren Lebensmittelversorgung. Sie gefährden das Erreichen der Ziele eines nachhaltigen Agrar- und Ernährungssystems, welche bis 2045 eine vollständige Dekarbonisierung und darüber hinaus die Anpassung der Produktionsweisen an den Klimawandel, den Schutz natürlicher Ressourcen, den Erhalt und die Wiederherstellung der Biodiversität, mehr Tierwohl sowie nachhaltige und gesunde Ernährungsweisen vorsehen.

[Systemische Risiken](#) bezeichnen komplexe Gefahren oder Bedrohungen, die nicht nur auf bestimmte Einzelteile eines Infrastruktursystems wirken, sondern das gesamte System betreffen. Zudem gefährden sie unterschiedliche Infrastruktursysteme oftmals gleichzeitig, da multikausale Wechselwirkungen und Kaskadeneffekte auftreten.

Auf den folgenden Seiten behandeln wir aus der Perspektive der systemischen Risiken die folgenden Fragen: Wie ist der gegenwärtige Stand der Gefährdungslagen für das Infrastruktursystem Landwirtschaft und Ernährung in Bezug auf alle relevanten systemischen Risiken, welche Bereiche des Systembilds sind besonders betroffen und wie robust ist das Infrastruktursystem? Welche systemischen Risiken entwickeln sich besonders dynamisch und mit welchen Folgen für das Infrastruktursystem? Und welche Gefährdungslagen ergeben sich im Zuge der Transformation?

## Status quo der Gefährdungslagen

Die Gefährdung des Infrastruktursystems Landwirtschaft und Ernährung durch systemische Risiken betrifft verschiedene Teile des Systems und

ist unterschiedlich akut. Die aktuelle Gefährdung des Infrastruktursystems Landwirtschaft und Ernährung durch systemische Risiken ist – auf Grundlage der ausgewerteten Quellen sowie der Ergebnisse der durchgeführten Fachgespräche – insgesamt als mittel einzustufen. Die Funktionsfähigkeit und Stabilität des Infrastruktursystems werden derzeit vor allem durch die globale Erwärmung und zunehmenden Wetterextreme bedroht. Um diesen Risiken und ihren Folgen zu begegnen, ist die Robustheit des Infrastruktursystems entscheidend. Die Gesamtrobustheit des gegenwärtigen Infrastruktursystems Landwirtschaft und Ernährung wird im Rahmen unserer Befragung des Resilienz-Radars derzeit als eher niedrig eingeschätzt. Es ist daher wichtig, aufkommende Störereignisse und Krisen frühzeitig zu erkennen und die vorhandenen Erkenntnisse zur Entwicklung innovativer Maßnahmen und zur Steigerung der Resilienz zu nutzen.

Der Biodiversitätsverlust stellt ein bedeutendes systemisches Risiko für das Infrastruktursystem dar und betrifft insbesondere die Agrarproduktion. Die Schadwirkungen auf *Vorleistungen* und *Produktion* werden derzeit laut Quellenanalysen und Fachgesprächen noch als gering eingeschätzt. Es wird jedoch erwartet, dass ein fortschreitender Biodiversitätsverlust in Zukunft u.a. Ertragseinbußen zur Folge haben könnte. Die Vereinten Nationen gehen trotz erster politischer Maßnahmen von einem weiteren Biodiversitätsverlust in Gebieten aus, in denen Lebensmittel und Holz erzeugt werden, und zählt die Landwirtschaft einschließlich der Tiernutzung selbst zu den größten Treibern dieses systemischen Risikos [1].

Das systemische Risiko der *globalen Erwärmung* beeinträchtigt die sichere Lebensmittelversorgung in Deutschland derzeit noch nicht unmittelbar [2]. Es wirkt sich dennoch auf die Bereiche der *Vorleistungen* und *landwirtschaftlichen Produktion* aus, insbesondere auf den Pflanzenanbau. Die globale Erwärmung führt zu Veränderungen der Vegetationsperioden und zeitlichen Entwicklung von Pflanzen (Phänologie) von Pflanzen. Dies wiederum stört die Funktionalität von Ökosystemen [3]. Analysen zeigen, dass die Geschwindigkeit des Temperaturanstiegs in Deutschland (und weltweit) in den letzten 50 Jahren deutlich zugenommen hat [4], wodurch sich die Schadwirkungen für das Infrastruktursystem erhöhen. Die im Zuge der globalen Erwärmung verstärkt auftretenden *Wetterextreme* haben teilweise erhebliche Auswirkungen auf das Infrastruktursystem. Starkniederschläge wie Hagel und Starkregen

verursachen beträchtliche (lokale) Schäden im Pflanzenanbau. Ein Spezialversicherer im Pflanzenbau beziffert den Schaden, der in Deutschland alleine im Juli 2022 durch Hagel und Stürme entstand, auf 60 Mio. Euro [5]. Hitze birgt Gefahren vor allem für das Tierwohl, während Dürre, aber auch Hochwasser zu Ertragsausfällen und in der Folge zu einer mangelnden Verfügbarkeit z. B. von Futterpflanzen und anderen Feldfrüchten führen können. Der Klimawandel kann prinzipiell auch abrupte und gravierende Änderungen auslösen. In einem vom IPCC als wahrscheinlich eingestuften Szenario, das einen Temperaturanstieg von 2 bis 3 Grad Celsius vorsieht, könnten Kippunkte weitere Kippelemente aktivieren und zusätzliche Klimafolgen mit Auswirkungen auf die Landwirtschaft in Deutschland nach sich ziehen.

Die systemischen Risiken, die aus **geopolitischen Konflikten** und **Versorgungsengpässen** bei Produkten zur Herstellung von *Vorleistungen* entstehen, nehmen zu. Der russische Angriffskrieg auf die Ukraine hat die Vulnerabilität des Infrastruktursystems verdeutlicht und zentrale Schwächen des globalen Ernährungssystems offengelegt [6]. Engpässe beeinträchtigen vor allem die Versorgung des Infrastruktursystems mit Energie sowie Futter- und Düngemitteln, führen zu steigenden Preisen und beeinflussen die Bereiche *Vorleistungen*, *Produktion* und *Handel*. Eskalierende Konflikte, wie sie im Roten Meer zu beobachten sind, können wichtige Handelsrouten betreffen und zu Handelsstörungen führen. Als Folge könnten sich in deutschen Supermärkten Engpässe bei Tiefkühlware und Fruchtkonserven aus China und Vietnam, aber auch bei Tiernahrung manifestieren [7][8].

**Machtkonzentrationen** weisen derzeit ein mittleres Gefährdungspotenzial für das Agrar- und Ernährungssystem auf. Die Abhängigkeit der Industrie von ihren Abnehmern im Lebensmitteleinzelhandel zeigt sich beispielsweise an den Einkaufspreisen für Lebensmittel. Zudem bestehen auch Auswirkungen auf die *Produktion*. Aufgrund der hohen Konzentration im Lebensmittelmarkt befinden sich Produzent/innen in einer schwächeren Position innerhalb der Wertschöpfungskette und sind oft nicht in der Lage, ihre Kosten z. B. für eine tierfreundliche Nutztierhaltung direkt weiterzureichen [9]. Zudem verstärkt die digitale Ökonomie tendenziell die Marktmacht von Großkonzernen in dem bereits von monopolistischen Marktstrukturen geprägten Agrarsektor [10][11]. Im Zuge der Digitalisierung könnten Großkonzerne die Preise für

Agrarrohstoffe, landwirtschaftliche Flächen und Nahrungsmittel zukünftig noch stärker bestimmen.

Die Eintrittswahrscheinlichkeit eines flächendeckenden und langandauernden **Blackouts** in Deutschland ist derzeit gering [\[12\]](#)[\[13\]](#). Die Energiewende und eine fortschreitende Digitalisierung erhöhen allerdings die Komplexität des Energiesystems beträchtlich und können damit potenziell neue Vulnerabilitäten schaffen, die die Energieversorgungssicherheit beeinträchtigen könnten. Die Schadwirkung eines langandauernden Blackouts – sei es durch ein Extremwetterereignis oder einen Cyberangriff – wären in sämtlichen Bereichen des Landwirtschafts- und Ernährungssystem erheblich. Insbesondere in den Bereichen *Lagerung, Verarbeitung und Lebensmittelhandel* könnte der Ausfall der Kühlung zu Verderb von kühlbedürftigen Waren führen [\[14\]](#). Aber auch die Produktion wäre betroffen. Tiere würden unter der manuell nicht zu leistenden Versorgung mit Futter, Wasser und Frischluft leiden und oft schon die ersten Stunden nicht überleben [\[15\]](#).

Der Anteil an tierhaltender Landwirtschaft ist im deutschen Landwirtschafts- und Ernährungssystem hoch, wodurch das systemische Risiko **Tierseuchen** eine bedeutende Rolle spielt. Aktuell wird das Gefährdungspotenzial aufgrund des hohen Niveaus der Tiergesundheit bei deutschen Nutztieren als gering eingeschätzt [\[16\]](#). In den vergangenen zwei Dekaden breiteten sich jedoch in Deutschland und Europa Tierseuchen wie die Afrikanische Schweinepest oder die Vogelgrippe laut Friedrich-Löffler-Institut zunehmend aus. Die Infektionskrankheiten sind hochansteckend und können zu wirtschaftlichen Schäden in der *landwirtschaftlichen Produktion* führen. Der internationale Handel mit Tieren, der globale Waren- und Reiseverkehr sowie die globale Erwärmung begünstigen die Ausbreitung von Tierseuchen und die Verbreitung neuer Krankheiten bei Tier und Mensch einschließlich von Zoonosen (z. B. Blauzungenkrankheit, Affenpocken). **Epidemien und Pandemien** beim Menschen bergen für den Agrar- und Ernährungssektor ein nur geringes Risiko. Direkte Schadwirkungen durch Personalausfälle sind möglich. In der COVID-19-Pandemie fehlten im Bereich der *Produktion* vor allem Erntehelfer aus dem Ausland [\[17\]](#).

**Cyberkriminalität** sowie **Technikversagen und eingeschränkte Technikbeherrschbarkeit** scheinen derzeit tendenziell ein vergleichsweise geringeres Gefährdungspotenzial für das Infrastruktursystem Landwirtschaft und Ernährung in Deutschland darzustellen. Direkte Schadwirkungen können *in allen Bereichen* des

digitalisierten Infrastruktursystems auftreten. Bislang sind meist einzelne Betriebe oder Unternehmen zeitlich begrenzt betroffen und erleiden einen wirtschaftlichen Schaden [18]. Bei den Angriffen ist ein wachsender Fokus auf Supply-Chain-Angriffe festzustellen. Durch die Kompromittierung von Produkten bereits bei Herstellern oder Drittanbietern beschränkt sich der potenzielle Schaden nicht nur auf das direkt angegriffene Unternehmen, sondern betrifft alle nachgelagerten Unternehmen in der Wertschöpfungskette [19]. Gemäß den Analysen von Bitkom besteht die größte Gefahr in skalierten Angriffen auf einen Landtechnikhersteller und dessen auf den Betrieben im Einsatz befindliche Technik [20]. Aufgrund der fortschreitenden Digitalisierung sowie steigender geopolitischer Konflikte ist zu erwarten, dass Cyberangriffe zunehmen werden. Diese könnten auf ganze Liefer- und Wertschöpfungsketten abzielen, um größtmöglichen Schaden anzurichten [20].

**Gesellschaftliche Polarisierung** birgt mit Bezug zum Infrastruktursystem Landwirtschaft und Ernährung ein Gefährdungspotenzial, dass sich vor allem auf das Erreichen der Transformationsziele bezieht. Polarisierende Haltungen zu Veränderungen zeigen sich insbesondere in den Bereichen *Produktion* und *Konsum*. Die Ungleichverteilung von Einkommen und Vermögen der deutschen Haushalte spiegelt sich in unterschiedlichen Ernährungsmustern wider, die sich beispielsweise in unterschiedlichen Präferenzen für eine gesunde Ernährung äußern. Dies erschwert den Zugang zu ökologisch und sozial nachhaltig produzierten Lebensmitteln und beeinträchtigt damit die Umsetzung der Transformation im Landwirtschafts- und Ernährungssystem. In den letzten Jahren zeichnet sich auch in Bezug auf die zukünftige Ausrichtung der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) eine verstärkte Polarisierung der Debatte ab. Die Positionen tendieren entweder zu mehr Umwelt-, Klima- und Verbraucherschutz oder lehnen zusätzliche Umweltauflagen sowie die Reform der Düngeverordnung ab [21].

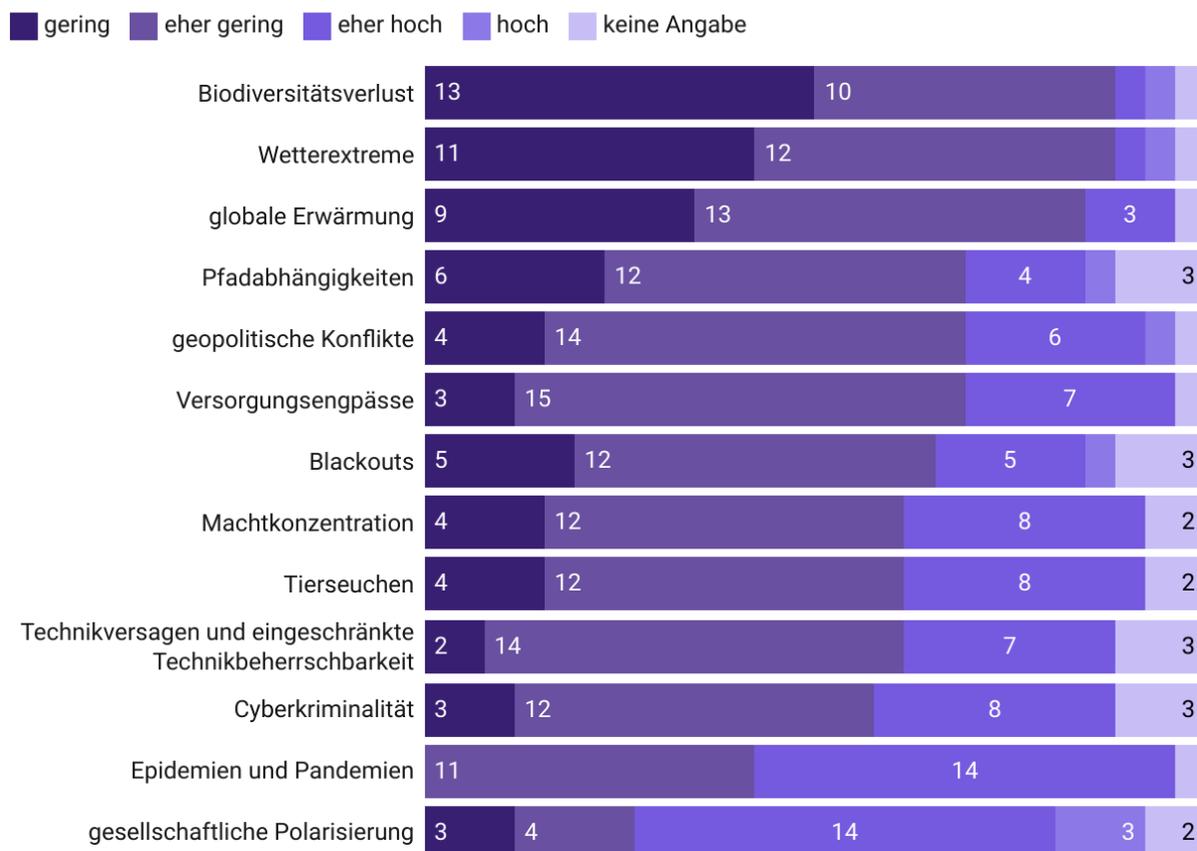
Nicht zuletzt gefährdet das systemische Risiko der **Pfadabhängigkeiten** das Erreichen der Transformationsziele im Landwirtschafts- und Ernährungssektor. Analysen zeigen, dass der hohe Fleischkonsum, die hohen Stickstoffeinträge sowie der Pestizideinsatz in der Landwirtschaft besonders schwer zu verändern sind [22]. Allerdings belegen die Trendanalysen in jüngerer Zeit eine tendenzielle Abnahme des Fleischkonsums in Deutschland bei gleichzeitiger Zunahme des Absatzes von Fleischersatzprodukten.

Das Infrastruktursystem Landwirtschaft und Ernährung ist stark mit anderen Infrastrukturen vernetzt, wodurch sich zum Teil wechselseitige Abhängigkeiten zu anderen Infrastruktursystemen ergeben. Besonders relevant für die Bereiche *Produktion, Lagerung, Auslieferung* und den *Handel* sind die Infrastruktursysteme Energie, Verkehr und Mobilität, Wasser sowie IKT. Probleme in der Agrarproduktion könnten negative Folgen für den Energiesektor haben, denn landwirtschaftliche Erzeugnisse werden zunehmend auch zur Energieerzeugung benötigt.

## Einschätzung der Robustheit: Ergebnisse der Panelbefragung

Die Robustheit des (gegenwärtigen) Infrastruktursystems Landwirtschaft und Ernährung hinsichtlich systemischer Risiken wurde im Rahmen der Panelbefragung bewertet. Die Gesamtbewertung des Infrastruktursystems über alle systemischen Risiken liegt nach Einschätzung der Befragten derzeit bei einer eher geringen Robustheit. Bei der Bewertung einzelner systemischer Risiken bestehen Unterschiede. Als gering wird die Robustheit des Infrastruktursystems insbesondere gegenüber den umweltbezogenen systemischen Risiken **Biodiversitätsverlust, Wetterextreme** und **globale Erwärmung** eingeschätzt. Auch gegenüber den politischen systemischen Risiken der **Pfadabhängigkeiten** und **geopolitischen Konflikten** wird die Robustheit derzeit als (eher) gering, in Bezug auf die wirtschaftlichen systemischen Risiken von **Versorgungsengpässen** und **Machtkonzentrationen** hingegen als mittel eingeschätzt. Eine (eher) hohe Robustheit wird dem System gegenüber **Epidemien und Pandemien** sowie gegenüber der **gesellschaftlichen Polarisierung** zugeschrieben.

## Wie schätzen Sie derzeit den Grad der Robustheit des Infrastruktursystems Landwirtschaft und Ernährung in Bezug auf die folgenden systemischen Risiken ein?



Expertenbefragung zur Verletzlichkeit des Infrastruktursystems Landwirtschaft und Ernährung (n=26)

Quelle: TAB, Resilienz-Radar 2023/24 • Erstellt mit Datawrapper

### Referenzen

1. Secretariat of the Convention on Biological Diversity (2020): Global Biodiversity Outlook 5. Montreal, Quebec, Canada
2. Ismail, S. A.; Geschke, J.; Kohli, M.; Spehn, E.; Inderwildi, O.; Santos, M. J.; Guntern, J.; Seneviratne, S. I.; Pauli, D.; Altermatt, F.; Fischer, M. (2021): Klimawandel und Biodiversitätsverlust gemeinsam angehen
3. Renner, K.; Fritsch, U.; Zebisch, M.; Wolf, M.; Schmuck, A.; Imez, C.; Porst, L.; Vo., M.; Wolff, A.; Jay, M. (2021): Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland. Teilbericht 2: Risiken und Anpassung im Cluster Land. UBA (Umweltbundesamt), Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland
4. DWD (Deutscher Wetterdienst); ExtremWetterKongress (2023): Was wir 2023 über das Extremwetter in Deutschland wissen. Stand der Wissenschaft zu extremen Wetterphänomenen im Klimawandel in

- Deutschland. (Friedrich, K.; Posada, R.; Kaspar, F.; Lengfeld, K.) Offenbach am Main, Deutschland, [www.dwd.de/](http://www.dwd.de/) (4.3.2024)
5. Vereinigte Hagel (2023): Hagel Aktuell 2023/2024. Schadenrückblick 2023, [vereinigte-hagel.net/](http://vereinigte-hagel.net/)(4.3.2024)
  6. Reichert, T.; Windfuhr, T. (2023): Resiliente Agrar- und Ernährungssysteme. Was in Deutschland und Europa angestoßen werden sollte. Germanwatch e.V. Bonn, [www.germanwatch.org/](http://www.germanwatch.org/) (4.3.2024)
  7. Finanzen100 (2024): Kaum noch Verkehr im Suezkanal: Was das für unsere Supermarktregale heißt, 03.02.2024
  8. Schlautmann, C. (2024): Von Aldi bis Ikea – Attacken im Roten Meer sorgen für Lieferengpässe in Deutschland. In: Handelsblatt 12.01.2024
  9. Faletar, I.; Berkes, J.; Erler, M.; Ollier, C. (2021): Den BIG4 machtlos ausgeliefert? Kritik am deutschen Lebensmitteleinzelhandel
  10. Heinrich-Böll-Stiftung; Rosa-Luxemburg-Stiftung; Le Monde Diplomatique; Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland; Germanwatch; Oxfam Deutschland (2017): Konzernatlas. Daten und Fakten über die Agrar- und Lebensmittelindustrie
  11. Kliem, L.; Josephin Wagner; Christopher Olk; Luisa Keßler; Steffen Lange; Tsvetelina Krachunova; Sonoko Bellingrath-Kimura (2022): Digitalisierung der Landwirtschaft. Chancen und Risiken für den Natur- und Umweltschutz. [www.ioew.de](http://www.ioew.de) (4.3.2024)
  12. Bundesnetzagentur (2022): Bericht zu Stand und Entwicklung der Versorgungssicherheit im Bereich der Versorgung mit Elektrizität, [www.bmwk.de/](http://www.bmwk.de/) (4.3.2024)
  13. Bundesnetzagentur (2024): Droht der Blackout? Über die Stromversorgung in Deutschland, [www.bundesnetzagentur.de/](http://www.bundesnetzagentur.de/) (4.3.2024)
  14. Gerhold, L.; Schuchardt, A. (Hg.) (2021): Definition von Schutzziele für Kritische Infrastrukturen. Forschungsstand, rechtlicher Rahmen und politische Entscheidungsfindung: Forschung im Bevölkerungsschutz: wissenschaftlicher Abschlussbericht, BBK-Projekt-Nr.: FP 417, Abschlussdatum: 09/2019. Deutschland, Forschung im Bevölkerungsschutz Band 28, Bonn
  15. TAB (2010): Gefährdung und Verletzbarkeit moderner Gesellschaften – am Beispiel eines großräumigen Ausfalls der Stromversorgung. Endbericht zum TA-Projekt. (Petermann, T.; Bradke, H.; Lüllmann, A.; Poetzsch, M.; Riehm, U.) TAB-Arbeitsbericht 141, [publikationen.bibliothek.kit.edu/](http://publikationen.bibliothek.kit.edu/)
  16. Friedrich-Loeffler-Institut (2023): Tiergesundheitsjahresbericht 2022
  17. Hofmeier, M. (2020): Resilienz in Lebensmittelproduktion, -verarbeitung und -logistik während der Covid-19-Krise: Herausforderungen und Bewältigungsstrategien

18. Hofmeier, M.; Lechner, U. (2021): Digitalisierung und Resilienz in der Food Supply Chain. In: HMD 58(4), S. 910–921, DOI: [10.1365/s40702-020-00651-6](https://doi.org/10.1365/s40702-020-00651-6)
19. BSI (Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik) (2023b): Die Lage der IT-Sicherheit in Deutschland 2023. Bonn, [www.bsi.bund.de/](https://www.bsi.bund.de/) (4.3.2024)
20. Bitkom e.V. (2023a): Cyberresilienz in der Landwirtschaft. Whitepaper – Landwirtschaftliche Betriebe besser gegen Cyberattacken schützen. Berlin, [www.bitkom.org/](https://www.bitkom.org/) (4.3.2024)
21. UBA (2021): Eine zukunftsfähige Landwirtschaft für Alle. Regionale Dialogverfahren und der Agrarkongress 2020 als erster Schritt in der Erarbeitung von Elementen des Gesellschaftsvertrages. Dessau-Roßlau
22. Clausen, J.; Fichter, K. (2018): Pfadabhängigkeiten. Querschnittsanalyse auf Basis von 15 Transformationsfeldern im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy. Berlin

# Entwicklungsdynamiken ausgewählter systemischer Risiken und Gefährdungslagen

Systemische Risiken unterliegen einer teils starken Entwicklungsdynamik. Sowohl die Eintrittswahrscheinlichkeit als auch die konkrete Form der durch sie ausgelösten Gefährdungslagen für das Landwirtschafts- und Ernährungssystem können sich verändern. Derzeit steigt die Gefährdung für das Infrastruktursystem vor allem durch die globale Erwärmung und die im Zuge des Klimawandels zunehmenden Wetterextreme. Zusätzlich vollzieht sich der weltweite Verlust der Bodenbiodiversität schneller als bislang angenommen mit Folgen für die landwirtschaftliche Naturnutzung und die Ernährung. Aber auch der Anstieg und die Verhärtung geopolitischer Konflikte sowie steigende Marktkonzentrationen und zunehmende Unternehmensfusionen führen zu einer Veränderung der Gefährdungslage für das Landwirtschafts- und Ernährungssystem.

Zu den sich dynamisch entwickelnden Risikofaktoren für die Ernährungssicherheit zählt die **globale Erwärmung**. Eine Modellierung der NASA und des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung zeigt, dass die globalen Maiserträge in den nächsten 10 bis 20 Jahren erheblich zurückgehen und die Ernte bis zum Ende des Jahrhunderts in einigen Regionen um fast ein Viertel schrumpfen könnten. Dies hätte vor dem Hintergrund der hohen Bedeutung dieses weltweit wichtigsten Getreides ernste Folgen für die Nahrungsversorgung in vielen Regionen [1]. Im Rahmen des Projekts [Impact2C](#) wurden die Veränderungen durch eine globale Erwärmung um zwei Grad modelliert und in Bezug auf Landwirtschaft, Wasserhaushalt und Wälder in Europa analysiert, wobei der Fokus auf der Anfälligkeit von Nutzpflanzen lag. Den Abschätzungen zufolge zeigt Weizen in Deutschland eine mittlere bis hohe Vulnerabilität, er würde unter den neuen Bedingungen schlechter wachsen. Ähnliches gilt für Gerste. Die im Zuge des globalen Klimawandels steigenden Temperaturen begünstigen zudem zahlreiche Schädlinge, darunter invasive, die aus anderen Regionen stammen [2]. Eine im Fachmagazin Science veröffentlichte Studie zeigt, dass mit jedem Grad Temperaturanstieg die globalen schädlingsbedingten Ernteverluste bei Weizen, Reis und Mais um 10 bis 25 % steigen könnten [3].

Temperaturanstieg und veränderte Niederschlagsmuster führen zu zunehmender Trockenheit und wirken daher auch auf den Bereich Wasser. In der »Roadmap 2030 zur Zukunft der Wasserwirtschaft« wird betont, dass die zukünftigen Auswirkungen des Klimawandels,

insbesondere die Zunahme von längeren Trockenperioden, welche mit temporär sinkenden Grundwasserständen und einem erhöhten Wasserbedarf einhergehen, zu einem schrittweisen Austrocknen von Gewässern führen können und sich auf die Verfügbarkeit natürlicher Wasserressourcen auswirken werden. Das Risiko einer übermäßigen Wassernutzung kann regional und saisonal deutlich zunehmen [4]. Wasserverschwendung verschärft die Problematik der Wasserknappheit, und gleichzeitig fördern niedrige Wasserpreise eine wenig nachhaltige Nutzung der Wasserressourcen, wie etwa die übermäßige Entnahme von Grundwasser und Aquiferen. [5] Fachleute gehen davon aus, dass die landwirtschaftliche Produktion und Verarbeitung aufgrund der zunehmenden Wasserknappheit auf behandelte Abwässer zurückgreifen müssen, was neue Risiken für die Lebensmittelsicherheit birgt [2]. Möglich ist, dass z. B. über die Bewässerung von Pflanzen verschiedene Arten von Krankheitserregern wie Bakterien und Parasiten in Nahrungsmittel gelangen und so ein steigendes Risiko für die Gesundheit der Bevölkerung in Deutschland darstellen. Neben der Wasserknappheit an Land verstärkt die globale Erwärmung auch die Erwärmung der Ozeane und damit verbunden Veränderungen in der biologischen Vielfalt der Meere. Fachleute gehen davon aus, dass z. B. das plötzliche und massenhafte Wachstum von toxinbildenden Algenarten negative Folgen für die menschliche Gesundheit haben kann, wenn diese über die Nahrungskette in Fisch- oder Meeresfrüchteprodukten gelangen [6]. Die Algen können durch ihr Gift zudem ganze Ernten von Meeresfrüchten ungenießbar machen und Kulturfischbestände bedrohen.

Die globale Erwärmung führt zu zunehmenden **Wetterextremen** und einer wachsenden Eintrittswahrscheinlichkeit gleichzeitig auftretender Extremwetterereignisse (z. B. Hitze und Dürre aufgrund der Korrelation zwischen Temperatur und Niederschlag). Diese Entwicklungen wirken sich auf mehrere Produktionsbereiche des Landwirtschafts- und Ernährungssystems aus und erhöhen dadurch dessen Gefährdungslage. Die EU-Kommission kommt zu der Einschätzung, dass die hieraus resultierenden Einbußen der Produktionskapazität zu Spannungen auf den Lebensmittelmärkten und in Bezug auf die Lebensmittelvorräte führen kann [7]. Die landwirtschaftliche Produktion in Deutschland wird im Sommer mit einer Zunahme trockener Tage und im Winter mit mehr Starkregen umgehen müssen. Hinzu kommt eine zunehmend auftretende Frühjahrstrockenheit, deren weitere Entwicklung allerdings nicht abgeschätzt werden kann [8].

Durch die Kombination aus Trockenheit und Hitze entstehen hohe Schäden an Pflanzen, die zu Ertragsminderungen bei Nahrungs- und Futtermitteln und dadurch zu steigenden Preisen führen. Für 2018 und 2019, die von Hitze- und Dürreextremen gekennzeichnet waren, wurde für Deutschland z. B. ein direkter Ertragsverlust bei Winterweizen im Wert von 992 Mio. Euro errechnet [9]. Gefährdet sind in Deutschland besonders Regionen mit geringer bodenbezogener Wasserspeicherkapazität, wie beispielsweise wichtige Getreideanbauregionen mit sandigen Böden. Die Kompensation fehlender Erntemengen kann nicht ohne Weiteres über neue Flächen in anderen Anbauregionen mit besserer Bodenqualität erfolgen, da die zur Verfügung stehende landwirtschaftliche Fläche aufgrund des [zunehmenden Flächenverbrauchs](#) für Verkehr, Wohnen und Industrie fast überall weiter abnimmt [10].

Die Ertragsverluste könnten sich durch die Zunahme von Starkregenereignissen weiter erhöhen. Starkregen in Kombination mit Windböen führt zu Umknicken von Pflanzen und damit zu Verlusten u.a. bei Getreide, Raps und Mais. Auch der Obstanbau ist betroffen, wenn Bäume beschädigt werden oder die Früchte herabfallen. In Folge der Niederschläge ist außerdem eine Verschlammung der Böden möglich.

Die zunehmende Anzahl von Hitzetagen in Deutschland wird zudem Auswirkungen auf Nutztiere und ihre Leistung haben. Hitzestress bei Nutztieren kann das Wohlbefinden der Tiere und damit ihren Gesundheitszustand beeinträchtigen und sie für Krankheiten anfälliger machen [11]. Auch die Leistungsfähigkeit von Milchkühen wird reduziert, was Menge und Qualität der produzierten Milch beeinträchtigen kann. Das Risiko betrifft vor allem Regionen mit großen Milchviehbeständen.

Der [weltweite Biodiversitätsverlust](#) schreitet schneller voran als bisher angenommen. Entsprechend ist hier mit einer steigenden Gefährdungslage für das Infrastruktursystem zu rechnen. Für Deutschland zeigt sich anhand der [Roten Listen](#), dass 5 % der Regenwurmarten, 35 % der Laufkäferarten und 25 % der Großpilze als gefährdet gelten. Zudem gelten Pflanzenarten, die auf landwirtschaftliche Flächen spezialisiert sind, als besonders gefährdet. Der Verlust der Bodenbiodiversität führt zu [Störungen von Nährstoffkreisläufen](#), was sich negativ auf die Bodenfruchtbarkeit auswirkt. Laut Bodenreport des Bundesamts für Naturschutz [12] könnten sich die Folgen des Rückgangs der Bodenfruchtbarkeit schon bald in stagnierenden Erträgen ausdrücken. Eine Studie zeigt, dass die Erträge in Böden mit einem stark

vereinfachten Bodenleben um 13 % fielen und auch die Stickstoffaufnahme um 20 % sank [13]. Das Gefährdungslevel des Bodenlebens wird in Deutschland aktuell als moderat bis hoch eingeschätzt [12]. Die intensive landwirtschaftliche Nutzung des Bodens ist selbst einer der Hauptgründe für den Rückgang der Bodenorganismen. Neben dem Einsatz von Pestiziden und Düngemitteln beeinträchtigt auch das Pflügen die Vielfalt des Bodenlebens, u. a. von Pilzen, die ausgedehnte Netze im Boden bilden. Darüber hinaus verändert das Pflügen das Bodengefüge und erhöht die Bodenverdichtung. Dies erhöht die Anfälligkeit für Erosion und Staunässe, die wiederum die ausreichende Sauerstoffversorgung des Bodenlebens stören.

Der Anstieg **geopolitischer Risiken** führt zu einem erhöhten Risiko für **Versorgungsengpässe**. Um die **heimischen Märkte in Krisensituationen** zu schützen, werden weltweit von verschiedenen Ländern Ausfuhrbeschränkungen für Getreide erlassen, was zur Folge hat, dass internationale Versorgungsketten unterbrochen werden [14]. Die Beschränkung von Exporten führt dazu, dass die Preise beispielsweise für Getreide weltweit noch schneller steigen und zunehmend Preisschwankungen unterworfen sind [15]. Russland nutzte das Mittel der Ausfuhrbeschränkungen bereits häufiger, exportiert jedoch weiter in stark importabhängige Länder des globalen Südens, die häufig als russlandfreundlich eingestuft werden. Die Beschränkung der Getreideexporte sowie das Beenden der Schwarzmeer-Getreide-Initiative (Black Sea Grain Initiative) im Juli 2023 durch Russland verdeutlicht die Verwundbarkeit globaler Versorgungsketten und die potenzielle Nutzung von Lebensmitteln als Waffe.

Die möglichen Auswirkungen von Lieferengpässen auf das Infrastruktursystem Landwirtschaft und Ernährung lassen sich am Beispiel der Herstellung von Stickstoffdünger beschreiben [10]. Zu dessen Herstellung wird Gas als Energielieferant benötigt. Die drastischen Preissteigerungen für Gas führten an deutschen Produktionsstandorten zu einer Reduktion der Produktion und teilweise sogar zu Produktionsstopps. Die Preise für Düngemittel stiegen daraufhin kurzzeitig stark an, was wiederum zur Erhöhung der Lebensmittelpreise führte. Stark schwankende Preise stellen Landwirte vor Produktionsprobleme und können besonders kleinere Betriebe in ihrer Existenz bedrohen. Zu den Rohstoffen, die zukünftig für das Infrastruktursystem kritisch werden dürften, zählen Phosphat und Kalium. Phosphat ist essenziell für die Landwirtschaft, zugleich ist es ein geologisch knapper Rohstoff, der nur aus wenigen Ländern bezogen

werden kann. Fünf Länder verfügen über 90 % der weltweiten Phosphatreserven [16]. Aufgrund der essenziellen Rolle von Phosphor in der landwirtschaftlichen Produktion werden diese Nationen langfristig erheblichen Einfluss auf die globale Nahrungsmittelproduktion ausüben.

Die Auswirkungen zunehmender Unternehmensfusionen sowie steigender **Marktkonzentrationen** in der Landwirtschaft bergen ebenfalls ein erhöhtes Risikopotenzial für das Infrastruktursystem. Neben den klassischen Akteuren und global agierenden Unternehmen der Landmaschinen-, Saatgut- und Chemieindustrie treten zunehmend globale Akteure mit Digitalkompetenz und Finanzkraft auf [17]. Durch die Bereitstellung von Maschinen, Beratungs- und Serviceleistungen generieren Unternehmen große und detaillierte Datenbanken, zu denen Landwirt/innen häufig keinen Zugang haben. Die systematische Nutzung solcher Daten schafft nicht nur Wettbewerbsvorteile, sondern eröffnet auch neue Wertschöpfungspotenziale und Kooperationsmöglichkeiten im gesamten Ernährungssystem [17]. Gegenwärtig wird noch kritisch diskutiert, ob und wie dies die Bildung von Oligopolen oder gar Monopolen beschleunigt und damit neue Abhängigkeitsverhältnisse schafft [18].

## Referenzen

1. Jägermeyr, J.; Müller, C.; Ruane, A. C.; Elliott, J.; Balkovic, J.; Castillo, O.; Faye, B.; Foster, I.; Folberth, C.; Franke, J. A.; Fuchs, K. et al. (2021): Climate impacts on global agriculture emerge earlier in new generation of climate and crop models. In: Nature food 2(11), S. 873–885, DOI: [10.1038/s43016-021-00400-y](https://doi.org/10.1038/s43016-021-00400-y)
2. Dietrich, J.; Hammerl, J.-A.; Johne, A.; Kappenstein, O.; Loeffler, C.; Nckler, K.; Rosner, B.; Spielmeyer, A.; Szabo, I.; Richter, M. H. (2023): Auswirkungen des Klimawandels auf lebensmittelassoziierte Infektionen und Intoxikationen. In: Journal of Health Monitoring (8), S. 85–101, DOI: [10.25646/11393](https://doi.org/10.25646/11393)
3. Deutsch, C. A.; Tewksbury, J. J.; Tigchelaar, M.; Battisti, D. S.; Merrill, S. C.; Huey, R. B.; Naylor, R. L. (2018): Increase in crop losses to insect pests in a warming climate. In: Science (New York, N.Y.) 361(6405), S. 916–919, DOI: [10.1126/science.aat3466](https://doi.org/10.1126/science.aat3466)
4. DVGW; DWA (2023): Roadmap Wasserwirtschaft 2030. DVGW Deutscher Verein des Gas und Wasserfaches e. V.; DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, [www.dvgw.de/](http://www.dvgw.de/) (5.3.2024)
5. Als Aquifer oder Grundwasserleiter werden geologische Formationen bezeichnet, die in ihren Hohlräumen Wasser in nennenswerter Menge aufnehmen und weiterleiten können.
6. DFG-Senatskommission zur Beurteilung der gesundheitlichen Unbedenklichkeit von Lebensmitteln (o.J.): Stellungnahme zu Algentoxinen. [www.dfg.de](http://www.dfg.de) (5.3.2024)
7. Europäische Kommission (2021): Notfallplan zur Gewährleistung der Lebensmittelversorgung und Ernährungssicherheit in Krisenzeiten. [eur-lex.europa.eu](http://eur-lex.europa.eu) (5.3.2024)
8. Bundesinformationszentrum Landwirtschaft (2024b): Extremes Wetter: Wie das Klima die Landwirtschaft verändert. [www.praxis-agrar.de/](http://www.praxis-agrar.de/) (5.3.2024)
9. Trenczek, J.; Lühr, O.; Eiserbeck, L.; Sandhovel, M.; Ibens, D. (2022): Schäden der Dürre- und Hitzeextreme 2018 und 2019. Eine ex-post-Analyse. Düsseldorf
10. BLE (2023): Bericht zur Markt- und Versorgungslage. Getreide 2023
11. Renner, K.; Fritsch, U.; Zebisch, M.; Wolf, M.; Schmuck, A.; Imez, C.; Porst, L.; Vo., M.; Wolff, A.; Jay, M. (2021): Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland. Teilbericht 2: Risiken und Anpassung im Cluster Land. UBA (Umweltbundesamt), Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland. [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de) (5.3.2024)
12. BfN (2021): BfN Bodenreport: Vielfältiges Bodenleben – Grundlage für Naturschutz und nachhaltige Landwirtschaft. Bundesamt für Naturschutz. [www.bfn.de](http://www.bfn.de) (5.3.2024)

13. Bender, S. F.; Schulz, S.; Martinez-Cuesta, R.; Laughlin, R. J.; Kublik, S.; Pfeiffer-Zakharova, K.; Vestergaard, G.; Hartman, K.; Parlad., E.; R. mbke, J.; Watson, C. J. et al. (2023): Simplification of soil biota communities impairs nutrient recycling and enhances above- and belowground nitrogen losses. In: *The New phytologist* 240(5), S. 2020–203, DOI: [10.1111/nph.19252](https://doi.org/10.1111/nph.19252)
14. Götz, L.; Svanidze, M. (2023): Getreidehandel und Exportbeschränkungen während des Ukrainekrieges. In: *Wirtschaftsdienst* 103(13), S. 37–41
15. Cramon-Taubadel, S. von (2022): Die Folgen des russischen Angriffs für den ukrainischen Getreidesektor und den globalen Getreidehandel. In: *Ländlicher Raum* 73(04), S. 34–36, DOI: [10.2478/wd-2023-0064](https://doi.org/10.2478/wd-2023-0064)
16. Wollesen, G.; Oellermann, R.; van Leerzem, S.; Müller, J.; Kayatz, B.; Kowalewski, E. (2021): Nachhaltigkeitsrisiken für die deutsche Landwirtschaft. SMI (Soil & More Impacts), [www.gls.de/](http://www.gls.de/) (4.3.2024)
17. Zscheischler, J.; Brunsch, R.; Griepentrog, H. W.; T. lle-Nolting, C.; Rogga, S.; Berger, G.; Lehmann, B.; Strobel-Unbehaun, T.; Reichel, C.; Ober, S.; Scholz, R. W. (2021): Kapitel 4 Landwirtschaft, Digitalisierung und digitale Daten. In: Scholz, R.; Beckedahl, M.; Noller, S.; Renn, O. (Hg.): *DiDaT Weißbuch*. Baden-Baden, S. 145–168
18. Kehl, C.; Meyer, R.; Steiger, S. (2021): Digitalisierung der Landwirtschaft: technologischer Stand und Perspektiven. Teil I des Endberichts zum TA-Projekt. TAB-Arbeitsbericht 193. [publikationen.bibliothek.kit.edu/](http://publikationen.bibliothek.kit.edu/) (5.3.2024)

## Gefährdungslagen im Zuge der Transformation

Die Transformation des Infrastruktursystems Landwirtschaft und Ernährung hin zu einem nachhaltigen und gesellschaftlich anerkannten System ist mit vielfältigen Herausforderungen verbunden. Die Reduzierung der Treibhausgasemissionen ist eine zentrale Aufgabe, um das Ziel der Klimaneutralität bis 2045 in Deutschland zu erreichen. Zusätzlich muss das Infrastruktursystem den Folgen der globalen Erwärmung begegnen und seine Produktionsweisen anpassen. Dabei sind schädliche Effekte auf die natürlichen Ressourcen wie Böden und Wasser, Tierwohl und menschliche Gesundheit zu vermeiden. Diese Transformationsprozesse bieten große Chancen, zugleich bergen sie verschiedene Risiken. Nachfolgend werden systemische Risiken beleuchtet, die sich vor allem auf das Erreichen der Transformationsziele auswirken.

Die Transformation des Landwirtschafts- und Ernährungssystems ist aufgrund der bestehenden **Pfadabhängigkeiten** herausfordernd [1]. In der landwirtschaftlichen Produktion dominieren beispielsweise hochentwickelte und integrierte Technologiesysteme. Typischerweise kommen speziell gezüchtete, global gesehen auch gentechnisch hergestellte Pflanzensorten zum Einsatz, deren Anbau untrennbar mit der Verwendung von Düngemitteln und oft spezifischen Pestiziden verbunden ist. Diese Technologien ermöglichen eine kostengünstige Produktion, gehen jedoch häufig mit erheblichen Umweltauswirkungen einher [2]. Aber auch der hohe Fleischkonsum kann in vielen Ländern als recht stabiler Pfad beschrieben werden, da der Verzehr von Fleisch oder Fisch als integraler Bestandteil wichtiger soziokultureller Traditionen und tief verankerten Gewohnheiten etabliert ist. Die Fleischindustrie ist zudem in Ländern mit mittlerem und hohem Einkommen, einschließlich Deutschland, ein bedeutender Wirtschaftszweig, der aktiv einen hohen Fleischkonsum fördert und bewirbt [3]. Die Nutztierhaltung ist ein wichtiges Standbein der Landwirtschaft in Deutschland. Sie beeinflusst auch die Strukturen des Ackerbaus, denn die Hälfte der landwirtschaftlich genutzten Fläche wird für die Futtermittelproduktion benötigt. Zusätzlich müssen eiweißreiche Futtermittel importiert werden, um den Eiweißbedarf der Tiere decken zu können [4]. Der Fleischkonsum wirft im Zusammenhang mit der Transformation nicht nur Fragen zu seinen Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit auf, sondern auch darüber, wie mit den Nutztieren umgegangen werden soll. Die Zukunftskommission Landwirtschaft

betont die herausragende Rolle der Transformation der Tierhaltung für die umfassende Veränderung des Landwirtschafts- und Ernährungssystems sowohl in ökologischer als auch ökonomischer sowie gesellschaftlicher Hinsicht [5].

Neben ökonomischen sowie nutzungsbezogenen Faktoren sind Pfadabhängigkeiten auch durch rechtliche Regelungen bedingt. Dies begründet sich darin, dass die Landwirtschaft wegen ihres Beitrags zur Grundversorgung eine Sonderstellung im Umweltrecht einnimmt und zahlreiche umweltbezogene Vorschriften in der Landwirtschaft bisher eher wenig effektiv ausgestaltet sind. Das Monitoring ist lückenhaft, und auch der Vollzug weist Schwächen auf [2]. Zudem sind Landwirtschafts- und Umweltverwaltungen in Deutschland auf allen Ebenen getrennt, was eine Durchsetzung der Vorschriften erschwert. Als Folge sind insgesamt steigende Umweltbelastungen in Boden, Wasser und Luft durch Pflanzenschutzmittel, Schwermetalle und Arzneimittelrückstände zu beobachten [6]. Die beschriebenen Pfadabhängigkeiten wirken als erhebliche Bindungskräfte, die sowohl die Struktur als auch die Ausrichtung des Infrastruktursystems langfristig festlegen und damit starke Widerstände für das Erreichen der Transformationsziele wie Klimaneutralität darstellen.

Die Förderung der ökologischen Landwirtschaft ist ein zentraler Bestandteil der Nachhaltigkeitspolitik. Allerdings gibt es kontroverse Diskussionen und eine **gesellschaftliche Polarisierung** beispielsweise hinsichtlich konventioneller und nachhaltig-ökologischer Landwirtschaft. Auf der einen Seite erhält die wissenschaftlich belegte Forderung nach einer Neuausrichtung des Infrastruktursystems in Richtung verstärktem Umwelt-, Klima- und Verbraucherschutz zusätzlichen Rückhalt durch das Engagement verschiedener und breit aufgestellter zivilgesellschaftlicher Initiativen. Zudem sind politische Strategien, wie die Farm-to-Fork-Strategie, auf die Stärkung einer nachhaltigen Landwirtschaft und Ernährung ausgerichtet. Auf der anderen Seite bildete sich Gruppierungen und Netzwerke, die sich klar gegen weitere Umweltvorschriften und die Reform der Düngeverordnung aussprechen [7]. In der Vergangenheit zeigten sich zudem zahlreiche Proteste gegen politische Entscheidungen, die sich zum Teil auch populistisch äußerten [8][5]. Ein Beispiel sind die Proteste von Landwirt/innen in der jüngeren Vergangenheit, die sich unter anderem gegen den angekündigten Abbau der Agrardieselsubvention richteten. Heinze et al. [9] ermittelten in einer Studie folgende dominierenden Protestmotive: Sorgen über neue politische Vorgaben der Politik für die Landwirtschaft, dicht gefolgt von Sorgen über die

generelle Zukunft der Landwirtschaft sowie die persönliche wirtschaftliche Zukunft. Sorgen über die Klimawandelfolgen sind bei den Befragten am geringsten ausgeprägt.

Die polarisierte gesellschaftliche Debatte um konventionell versus nachhaltig-ökologisch kann eine Verengung des politischen Handlungsraums zur Folge haben und so notwendige Strategien zur Erhöhung der Resilienz des Landwirtschafts- und Ernährungssystems unmöglich machen. Dies könnte weitreichende Folgen für die Ernährungssicherheit und die Landwirtschaft haben [8]. Die gesellschaftliche Polarisierung wird durch inflationsbedingt steigende Lebenshaltungskosten verschärft. Die Verbesserung der Versorgung mit gesunden, vielfältigen und nachhaltig produzierten Lebensmitteln, eine Hauptaufgabe des Landwirtschafts- und Ernährungssystems, wird für Geringverdienende zunehmend schwieriger – auch in diesem Bereich manifestiert sich die gesellschaftliche Polarisierung. Dies ist der entscheidende Grund dafür, dass Expertenberichte auf die besondere Notwendigkeit verweisen, bei Transformationsentscheidungen sozioökonomisch schwächere Bevölkerungsgruppen gezielt zu berücksichtigen [5].

Die Transformation führt in einigen Bereichen auch zu neuen Risiken. Im Vergleich zur konventionellen Landwirtschaft erfordert der Ökolandbau generell mehr Fläche. Durch den Verzicht auf mineralischen Dünger und chemisch-synthetische Pestizide ist der Bioertrag pro ha im Vergleich zum konventionellen Landbau geringer [10]. Die Auswertung vorliegender Metaanalysen, die Untersuchungen aus verschiedenen Ländern und naturräumlichen Gegebenheiten, von verschiedenen Kulturpflanzen sowie unterschiedlicher Versuchsdauer und -anlage gemeinsam analysieren, zeigt, dass die Erträge im ökologischen Landbau durchschnittlich um 20 bis 25 % unter denen des konventionellen Landbaus liegen [11]. Dies könnte zu einer stärkeren Importabhängigkeit und ggf. zu Versorgungsengpässen führen. Zudem benötigen Nutztiere in der ökologischen Landwirtschaft mehr Freiraum zum Auslaufen und pro Tier eine größere Stallfläche. Die bereits vorhandenen Konkurrenzen um Flächennutzung nehmen weiter zu. Aus Verbraucherperspektive fällt zudem auf, dass ökologisch erzeugte Nahrungsmittel im Vergleich zu konventionell hergestellten Waren meist deutlich teurer sind [10]. Der Grund dafür ist, dass die ökologische Produktion aufwendiger ist. Sie erfordert mehr Platz und mehr manuellen Aufwand pro Tier oder Pflanze. Zudem sind die für die Tierhaltung benötigten Biofuttermittel in der Regel ebenfalls kostspieliger. Hierdurch kann sich eine Verstärkung

gesellschaftlicher Polarisierung bzw. Ernährungsungerechtigkeit ergeben.

## Referenzen

1. Behrendt, S.; Henseling, C.; Gegner, K.; Neipperg, C. (2023): Treiber, Diskurse und Transformationsszenarien. Experimentierfeld Agro-Nordwest, [www.agro-nordwest.de/](http://www.agro-nordwest.de/) (4.3.2024)
2. Kahlenborn, W.; Clausen, J.; Behrendt, S.; Göll, E. (Hg.) (2019): Auf dem Weg zu einer Green Economy. Wie die sozialökologische Transformation gelingen kann. Neue Ökologie Band 3, Bielefeld
3. Friedrichsen, J.; Gärtner, M. (2020): Warum essen wir so viel Fleisch? Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, [www.diw.de/](http://www.diw.de/) (4.3.2024)
4. Deutscher Bundestag (2023): Deutscher Bundestag Drucksache 20/9100 – Agrarpolitischer Bericht der Bundesregierung 2023
5. Zukunftskommission Landwirtschaft (2021): Zukunft Landwirtschaft. Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe. Zukunftskommission Landwirtschaft, Berlin
6. Umweltbundesamt (2023): Landwirtschaft umweltfreundlich gestalten, [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de) (4.3.2024)
7. Umweltbundesamt (2021): Eine zukunftsfähige Landwirtschaft für Alle. Regionale Dialogverfahren und der Agrarkongress 2020 als erster Schritt in der Erarbeitung von Elementen des Gesellschaftsvertrages. Dessau-Roßlau
8. Feindt, P. H. (2022): Warum Wandel in der Landwirtschaft so schwierig ist. In: Aus Politik und Zeitgeschichte 72(15-17/2022), S. 15–20, [www.bpb.de/](http://www.bpb.de/) (4.3.2024)
9. Heinze, R. G.; Bieckmann, R.; Küchler, A.; Kurtenbach, S. (2021): Sorgen und Proteste auf dem Land. Ergebnisse einer empirischen Untersuchung aktueller Bauernproteste, [hss-opus.ub.ruhr-uni-bochum.de](http://hss-opus.ub.ruhr-uni-bochum.de) (4.3.2024)
10. Muller, A.; Schader, C.; El-Hage Scialabba, N.; Brüggemann, J.; Isensee, A.; Erb, K.-H.; Smith, P.; Klocke, P.; Leiber, F.; Stolze, M.; Niggli, U. (2017): Strategies for feeding the world more sustainably with organic agriculture. In: Nature communications 8(1), S. 1290, DOI: [10.1038/s41467-017-01410-w](https://doi.org/10.1038/s41467-017-01410-w)
11. TAB (2021): Nachhaltigkeitsbewertung landwirtschaftlicher Systeme – Herausforderungen und Perspektiven. (Meyer, R.; Priefer, C.; Sauter, A.) TAB-Arbeitsbericht 188, Berlin. [publikationen.bibliothek.kit.edu/](http://publikationen.bibliothek.kit.edu/) (4.3.2024)

## Fokusthemen

Für eine vertiefende Untersuchung im Resilienz-Check schlagen wir drei Fokusthemen für das Infrastruktursystem Landwirtschaft und Ernährung vor. Diese basieren auf der Analyse der Trends und der systemischen Risiken im Zuge des Resilienz-Radars, einschließlich der Auswertung der verschiedenen Expertenbefragungen. Die vorgeschlagenen Fokusthemen sind eng mit den identifizierten Trendclustern und der Transformation des Infrastruktursystems verbunden und besitzen eine hohe Relevanz für transformative Resilienzstrategien. In methodischer Hinsicht eignen sich die spezifischen Themenzuschnitte sowohl für die geplante Partizipation im Resilienz-Check als auch für die Entwicklung von Zukunftsszenarien.

### **Fokusthema 1: New-Food-Systeme – Pflanzenproduktion und zellkulturbasierte Herstellung tierischer Lebensmittel**

Wie im Trendcluster [Flächennutzungskonkurrenzen](#) bereits beschrieben, werden neben der klassischen Landwirtschaft, die mit einem relativ hohen Ressourcenverbrauch verbunden ist, zunehmend alternative Agrarsysteme, auch als New-Food-Systeme bekannt, entwickelt und erforscht. Diese Systeme sind darauf ausgelegt, Nahrungsmittel mit einem deutlich geringeren Einsatz an natürlichen Ressourcen zu produzieren. Ein zentrales Ziel besteht darin, die Dekarbonisierung der Lebensmittelproduktion und damit die Transformation des Infrastruktursystems Landwirtschaft und Ernährung voranzutreiben und die Versorgungssicherheit mit den natürlichen Grenzen in Einklang zu bringen. Für die Szenarioentwicklung werden als fachliche Schwerpunkte erstens das Thema vertikale Landwirtschaft (Vertical Farming) zur Erzeugung von Gemüse (und langfristig von Weizen), zweitens die Präzisionsfermentation (Precision Fermentation) zur mikrobiologisch maßgeschneiderten Produktion von Milchprodukten sowie drittens die Herstellung von In-vitro-Fleisch (Cultured Meat) fokussiert. Diese Innovationen haben zum Ziel, möglichst flächensparsam mit neuartigen Systemen Nahrungsmittel jenseits der klassischen Landwirtschaft zu erzeugen. Fortschritte in der Bio- und Gentechnologie, der Lebensmitteltechnologie und der KI eröffnen das Potenzial, die Produktion, die Verarbeitung und den

Konsum von Lebensmitteln grundlegend zu verändern. Vertikale Indoorfarmen mit bodenlosen Systemen zur Erzeugung von Gemüse sind zwar unabhängig von äußeren Umwelteinflüssen, können aber auch neue Unsicherheiten für die Versorgungssicherheit mit sich bringen. So sind geschlossene Systeme zur Pflanzenproduktion durch einen hohen Energieverbrauch, aufwändige Hygienemaßnahmen zur Vermeidung der Verbreitung von pflanzlichen Krankheitserregern sowie eine hohe Anfälligkeit gegenüber technischen Störungen gekennzeichnet.

## Fokusthema 2: digitale Landwirtschaft

Digitale Technologien können einen wesentlichen Beitrag zur Transformation des Landwirtschafts- und Ernährungssystem leisten und finden zunehmend Eingang in die Lebensmittelproduktion. Wie im Trendcluster [Digitalisierung der Landwirtschaft, Logistik und Handel](#) beschrieben, ist die Entwicklungsdynamik insbesondere in den Technologiebereichen Sensorik, Robotik und KI hoch. Für die fachliche Schwerpunktsetzung bei der Szenarioentwicklung werden autonome Feldroboter und Roboterschwärme vorgeschlagen. Roboterplattformen ermöglichen den flexiblen und intelligenten Einsatz verschiedener Werkzeuge, insbesondere für eine schonende Bodenbearbeitung. Ökologisch vorteilhaft ist die geringe Bodenverdichtung, insbesondere durch neue Möglichkeiten einer sehr präzisen, zukünftig möglicherweise sogar auf die Einzelpflanze ausgerichteten Produktionsgestaltung. Von autonomen Feldrobotern würde auch der ökologische Landbau profitieren, da hier weder chemisch-synthetische Pflanzenschutz- noch Düngemittel eingesetzt werden. Hinzu kommt, dass mithilfe autonomer Kleintechnik Ansätze des ökologischen Landbaus (mechanische Unkrautbekämpfung, Fruchtfolgegestaltung) auf den konventionellen Landbau übertragen werden könnten.

## Fokusthema 3: Wassermanagement in der Landwirtschaft

Eine stabile Wasserversorgung ist für die Transformation des Infrastruktursystems Landwirtschaft und Ernährung vor dem Hintergrund zunehmender Hitze- und Trockenperioden essenziell. Der steigende Wasserbedarf erhöht das Risiko der Wasserknappheit in Deutschland und stellt das Landwirtschafts- und Ernährungssystem vor

neue Herausforderungen. Wie im Trendcluster [Ökologische Produktionsgrundlagen](#) beschrieben, können technologische Entwicklungen wie Luftfeuchtigkeitsabsorption, aber auch angepasste ackerbauliche Maßnahmen und ein (kommunales) nachhaltiges Wassermanagement der Wasserverknappung sowie der Zunahme von Wassernutzungskonflikten entgegenwirken. Für die Szenarioentwicklung werden aussichtsreiche Verfahren des Wassermanagements fokussiert, dabei explizit auch geschlossene Produktions- und Bewässerungssysteme. Durch effizientere Bewässerungsmethoden wie Tröpfchenbewässerung, Aquaponik und Wasserrückhalt kann der Bewässerungsbedarf in der Landwirtschaft reduziert werden. In geschlossenen Systemen ist der Verbrauch von Wasser, das aus der Umwelt entnommen wird, durch eine interne Wasseraufbereitung und Wiederverwendung relativ gering. Der Wasserbedarf solcher Systeme könnte in einigen Regionen in Deutschland aus aufbereitetem Abwasser gedeckt werden, sofern zukünftige gesetzliche Vorgaben dies erlauben. Beide Ansätze machen die Landwirtschaft grundsätzlich wetterunabhängiger und damit auch resilienter.

# Methodik und Vorgehen

Die Umsetzung des Resilienz-Radars erfolgt in drei aufeinander aufbauenden Arbeitsphasen. In allen Phasen wird die Expertise interner und externer Expert/innen einbezogen.

In der ersten Phase wurden vor allem Foresight- und TA-Studien im Umfeld der ausgewählten Infrastruktursysteme erfasst und analysiert. Hierbei wurden insbesondere mittel- bis langfristige Trends identifiziert, die nachweisbare Auswirkungen auf die Infrastruktursysteme haben. Ergänzend wurden unter Berücksichtigung der Ergebnisse des [TA-Projekts](#) „Krisenradar – Resilienz von Gesellschaft, Politik und Wirtschaft durch Krisenvorhersage stärken“ relevante wissenschaftliche Quellen zur Analyse von systemischen Risiken ausgewertet. Diese können eine Gefährdung von Gesellschaften oder Wirtschaftssystemen als Ganzes zur Folge haben und beinhalten damit grundsätzlich auch die Gefahr, dass Funktionsfähigkeit und Stabilität von Infrastruktursystemen erheblich beeinträchtigt werden, wenn sich diese Risiken verwirklichen.

Die Identifikation aufkommender soziotechnischer Trends erfolgte zusätzlich durch den Einsatz von Software- und KI-Technologien. Dafür wurde ein Quellenpool aufgebaut, der einschlägige Datenbanken (z.B. EPTA, ORBIS, Knowledge4Policy, OpenTA), Publikationen (Foresightstudien, Trendberichte, Konferenzsammelbände und Preprints), wissenschaftliche Plattformen (z.B. ScienceDaily) sowie journalistischen Hintergrundanalysen (Tagesspiegel Background, Heise online) umfasst. Die neuesten Veröffentlichungen wurden über eine zentrale Plattform semiautomatisch und kontinuierlich abgerufen. Das Team sichtete die Beiträge regelmäßig und bewertete deren Relevanz für die ausgewählten Infrastruktursysteme. Ergänzend wurde nach Innovationen mithilfe einer Medienanalysesoftware mit Zugang zu 150 Mio. Onlinequellen gesucht. Dabei lag der Fokus vor allem auf Tages- und Wochenzeitungen sowie Onlinenews.

In der zweiten Phase wurden Interviews mit ausgewählten Expert/innen geführt, um deren Fachwissen, Einschätzungen und Meinungen zu wesentlichen Trends und Herausforderungen sowie zu Wirkungszusammenhängen im Kontext systemischer Risiken für die Infrastruktursysteme zu erfassen. Für die Interviews wurde ein einheitlicher Leitfaden und Fragenkatalog erstellt. Auf den Ergebnissen der Interviews aufbauend wurden moderierte infrastrukturspezifische Workshops mit ausgewählten Expert/innen durchgeführt. Hier wurden

erste Arbeitsergebnisse zum Systembild des jeweiligen Infrastruktursystems sowie zu relevanten Trends und möglichen Folgen von systemischen Risiken vorgestellt und diskutiert. Abschließend erfolgte eine Einschätzung hinsichtlich politischer Relevanz und möglicher Vertiefungsthemen. Die Antworten der Befragten sowie weitere Kommentare, Hinweise und detaillierte Ausführungen wurden während der Interviews und Workshops protokolliert und die Ergebnisse anschließend qualitativ ausgewertet.

In der dritten Phase wurde für jedes der Infrastruktursysteme eine explorative Onlineerhebung unter Einbeziehung des Expertenpanels mithilfe der Software SoSci Survey durchgeführt. Aufgabe war es, auf Grundlage der vorangegangenen Schritte Trends auszuwählen und hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Verletzlichkeit und Resilienz des genannten Infrastruktursystems zu bewerten. Außerdem wurden die insgesamt etwa 80 Expert/innen dazu befragt, welche Trends in den nächsten 10 Jahren zu einer erhöhten Resilienz der Infrastruktursysteme beitragen könnten und welche Trends die Transformation der Infrastruktursysteme in Richtung Klimaneutralität besonders hemmen. Darüber hinaus sollten sie einschätzen, wie derzeit der Grad der Robustheit des jeweiligen Infrastruktursystems in Bezug auf prioritäre systemische Risiken eingeschätzt wird. Abschließend wurde für jedes System erfragt, auf welche Schwerpunktthemen die Politik in den nächsten 5 Jahren in Bezug auf die Resilienz des Infrastruktursystems vorrangig fokussieren sollte. Der quantifizierbare Teil der Ergebnisse wurde statistisch ausgewertet, die Kommentare, Hinweise und detaillierten Ausführungen einer qualitativen Analyse unterzogen.

Die Resultate aller drei Arbeitsphasen wurden abschließend integrativ analysiert und in dem vorliegenden Foresight-Report zusammengefasst.

## Autorinnen und Autoren

Das Resilienz-Radar sowie der Foresight-Report sind eine gemeinsame Aktivität des TAB-Betreibers ITAS zusammen mit dem Konsortialpartner IZT. Verantwortlich für die Inhalte sind die [folgenden Wissenschaftler/innen](#). Bei inhaltlichen Fragen zum Foresight-Report wenden Sie sich bitte an Michaela Evers-Wölk oder Christoph Kehl.

## Beteiligte Expert/innen

Die Umsetzung des [Resilienz-Radars](#) erfolgt in drei aufeinander aufbauenden Arbeitsphasen. In allen Phasen wird die Expertise interner und externer Expert/innen einbezogen. Für die Analyse des Infrastruktursystems Energie wurden u.a. die [folgenden Fachleute](#) im Rahmen von leitfadengestützten Fachgesprächen, moderierten Gruppendiskussionen oder einer explorativen Online-Erhebung eingebunden.

## Zitationsvorschlag

Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) (2024): Foresight-Report zum Infrastruktursystem Landwirtschaft und Ernährung (Autor/innen: Bledow, N.; Eickhoff, M.; Evers-Wölk, M.; Kahlisch, C.; Kehl, C.; Nolte, R.; Rioussset, P.). Berlin.  
<https://foresight.tab-beim-bundestag.de/reports/landwirtschaft-und-ernahrung>

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](#)

