RessortForschtKlima

Abschätzung des THG-Minderungspotenzials der RessortForschtKlima-Projekte - Vorstellung des Wirkketten-Ansatzes unter Berücksichtigung der Besonderheiten von Forschungsprojekten

Tania Runge[1], Claudia Heidecke[1], Bernhard Osterburg[1], Til Feike[2], Sara Kranz[3]

Unter Mitwirkung der Projektbeteiligten der 27 RessortForschtKlima-Projekte

[1] Thünen-Institut, Stabsstelle Klima, Boden, Biodiversität; [2] Julius Kühn-Institut, Institut für Strategien und Folgenabschätzung; [3] Max Rubner-Institut, Forschungskoordination

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis I

1 Einleitung 1

2 Die Ausgangssituation - Klimaschutzziele Deutschlands in den Bereichen Landwirtschaft und LULUCF sowie bereits Erreichtes 2

3 Methodik 4

3.1 Bewertung von Aktivitäten im Klima- und Transformationsfonds - der Wirkketten-Ansatz 4

3.2 Ansatz zur Ermittlung von (potenziellen) Treibhausgaseinsparungen bei RessortForschtKlima 5

3.3 Einordnung der RessortForschtKlima-Projekte 7

3.3.1 Einordnung der Projekte nach Treibhausgasen bzw. Kohlenstoffsenke 7

3.3.2 Einordnung der Projekte nach den im Förderaufruf aufgeführten Aspekten 8

3.3.3 Weitere Zuordnungen der Projekte 8

4 Untersuchung des potenziellen Klimaschutzbeitrags der RessortForschtKlima-Projekte nach Themenschwerpunkten 9

4.1 Verringerung der Treibhausgas-Emissionen in der Tierhaltung 9

4.1.1 Nachhaltige Emissionsmodelle für eine umweltverträgliche Rinderfütterung (NEMUR) 9

4.1.2 Ökologische Tierhaltung als Beitrag zum Klimaschutz - im Fokus von Tierkrankheiten und Tierseuchen (ÖtiKliS) 10

4.2 Erhöhung der Ressourceneffizienz und Senkung der Stickstoffüberschüsse 11

4.2.1 Ertragsentwicklung und optimierte N-Düngung im Klimawandel (KlimaN) 11

4.2.2 Optimierung des Potenzials von Halbzwergen beim Roggen für die Steigerung der Klimaschutzleistung von Getreidefruchtfolgen (PRoKlima) 12

4.2.3 Stickstoff (N) optimierter Raps zur Reduktion der Treibhausgasemissionen (NORA) 12

4.2.4 Identifikation zukünftiger züchterischer Potenziale für mehr Klimaschutz in der Pflanzenproduktion (KlimZucht) 13

4.3 Humuserhalt und -aufbau in Ackerland 13

4.3.1 Humusaufbau mit mehr Wurzeln (WurCel) 14

4.3.2 Evaluation des Potenzials eines perennierenden Getreideanbaus für die Kohlenstoffspeicherung (KlimaGetreide) 14

4.3.3 Vermehrte Humusreproduktion durch den Anbau von Sorghum in Deutschland als aktiver Beitrag zum Klimaschutz (SORGHUM) 15

4.3.4 Erschließung von Klimaschutzpotenzialen durch verbesserte Fruchtfolgegestaltung (KlimaFFolgen) 15

4.3.5 Kohlenstoffsequestrierung in Hecken und Feldgehölzen (CatchHedge) 16

4.4 Emissionsreduktion entlang der Wertschöpfungskette, einschließlich Ernährungsverhalten 16

4.4.1 Treibhausgasreduktion durch innovative Züchtungsfortschritte bei alternativen pflanzlichen Proteinquellen (TRIP) 17

4.4.2 Klimagerechte Ernährung aus der Perspektive von Verbrauchern und Gesellschaft (ENKL) 17

4.4.3 Bewertung des CO_2-Fußabdrucks der Weinproduktion zur Erschließung zusätzlicher Klimaschutzpotenziale im Weinbau (CaberNET) 18

4.4.4 Abwehr von Vorratsschädlingen in Deutschland (AVoiD) 18

4.5 Klimaschutz durch Vernässung von Moorböden und Reduzierung der Torfnutzung 19

4.5.1 Herstellung und Einsatz von Holzfaserstoffen als Torfersatzstoff (HoFaTo) 19

4.5.2 Roadmap zur Vernässung von organischen Böden (RoVer) 20

4.5.3 Ökonomische und ökologische Potenziale von Paludikulturen auf wiedervernässten Moorstandorten zum Klimaschutz (MOCOR) 21

4.6 Nachhaltige Waldbewirtschaftung und Holznutzung 21
4.6.1 Anreizwirkungen, Akzeptanz und Klimawirksamkeit unter-schiedlicher Honorierungsoptionen für den Klimaschutz in der Waldwirtschaft (AnAKHon) 21
4.6.2 Klimaneutrale Begasungsverfahren und alternative Behandlungsmethoden für Rundholz im Export (KLIMAtiv) 22
4.7 Klimaschutz in weiteren Landschaftsräumen 23
4.7.1 Nützlingsförderung in Agri-Photovoltaikanlagen (Solarnützlinge) 23
4.7.2 Wiedervernässung von Agrargewässern als Klimaschutz-Sofortmaßnahme (WAKS) 23
4.7.3 Maximierung der Kohlenstoffsequestrierung in Stadtbäumen (CliMax) 23
4.7.4 Treibhausgasneutrales Deutschland: Auswirkungen auf Wirtschaft und Lebensverhältnisse in ländlichen Räumen (TREND:LR) 24
4.8 Fernerkundung für die Treibhausgas-Berichterstattung 25
4.8.1 Fernerkundung für eine Verbesserung der Klimaberichterstattung (KlimaFern) 25
4.8.2 Deutschlandweite raum-zeitliche Modellierung von Kohlenstoffgehalten landwirtschaftlicher Böden durch eine integrative Auswertung von Satellitenbildzeitreihen und Geodaten (KoBoS) 25

5 Fazit 26

Literatur 27

Anhang 1: Übersicht der Kürzel und Namen der RessortForschtKlima-Projekte 31

Anhang 2: Übersicht über die den acht Themenschwerpunkten zugewiesenen Projekte mit einer Kurzbeschreibung und deren Zuordnung 32

1 Einleitung

RessortForschtKlima ist ein Verbund von **27 Forschungsprojekten**, der zum Ziel hatte, neue Erkenntnisse zum Klimaschutz in Deutschland in den Bereichen Landwirtschaft, Wald und Ernährung zu erlangen. Die Ressortforschungseinrichtungen im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat (BMLEH) hatten den Auftrag, THG-Minderungsoptionen zu analysieren, Wissen auszubauen und unabhängige Forschung in diesen Gebieten zu stärken und die Politik zum Stand von Wissenschaft und Technik zu beraten. Die Forschung des Verbunds soll dazu beitragen in Deutschland die in der Novelle des Klimaschutzgesetzes (KSG)[1] für 2030 festgelegten Klimaschutzziele und bis 2045 Klimaneutralität zu erreichen.

Die im Rahmen des Klimaschutz-Sofortprogramms 2022 geförderten **RessortForschtKlima-Projekte** mit einer Laufzeit von drei Jahren deckten dabei ein breites Spektrum an Forschungsfragen ab, die über Institutsgrenzen hinweg interdisziplinär am Julius Kühn-Institut (JKI), Friedrich-Loeffler-Institut (FLI), Max Rubner-Institut (MRI) und Thünen-Institut untersucht wurden. Ziel war es, Lösungen für den effektiven Klimaschutz durch Veränderungen in der Landnutzung, der land- und forstwirtschaftlichen Produktion sowie in der Verarbeitung bis hin zum Verbraucher zu entwickeln. Klimaschutz in Landwirtschaft, Forst und Ernährung umfasste dabei sowohl die Verringerung von Treibhausgas (THG)-Emissionen als auch die Verbesserung der Kohlenstoffsequestrierung. Entsprechend dem Auftrag aus dem Klimaschutzbericht 2022[2] umfasste die Spannbreite der Projekte Forschungsaktivitäten zur Begleitung und Weiterentwicklung von Klimaschutzmaßnahmen, zu verbesserten Ansätzen zur Folgenabschätzung und zur Klimaberichterstattung sowie zu sozioökonomischen Fragestellungen. Die Projekte reichten von der Züchtungsforschung bis hin zu klimaoptimierten Pflanzen, Klimaschutz in der Tierhaltung, emissionsmindernder Landnutzung, klimawirksamem Ernährungsverhalten und Wirtschaftseffekten von Klimaschutz in ländlichen Räumen.

Ziel des vorliegenden Berichtes ist es, mit Ende der Projektlaufzeit den potenziellen Beitrag der durchgeführten RessortForschtKlima-Projekte zur Treibhausgas (THG)-Minderung einschließlich der Stärkung von Kohlenstoffsenken darzustellen.

Wenn es um die Betrachtung des Klimaschutzbeitrags geht, dann nehmen **Forschungsprojekte eine Sonderstellung** ein, denn nur in den seltensten Fällen werden Emissionsminderungen unmittelbar und umgehend durch die Projekte erzielt. Es stellte sich daher die Frage, welchen potenziellen Beitrag zur THG-Minderung die durch die Forschungsaufträge gewonnenen Erkenntnisse liefern können. Dabei wurde nach den betrachteten Klimaschutzaspekten differenziert, wobei die Effekte qualitativ und soweit möglich auch quantitativ unter Berücksichtigung des erwartbaren Zeithorizonts bis Erreichen einer Klimawirkung abgeschätzt wurden. Dabei wurden bestehende Hemmnisse für eine Quantifizierung und Skalierung (auf Projektebene / regional bzw. deutschlandweit) herausgearbeitet. Ein weiterer Fokus wurde auf die Interaktionen zwischen (potenziellen) Klimawirkungen sowie auf Synergien und Trade-offs zwischen Klimaschutz und anderen Schutzgütern gelegt, soweit diese in den Projekten behandelt wurden.

Untersucht wurden alle in den Projekten adressierten THG-Emissionen, einschließlich der negativen Emissionen im Bereich Landnutzung (Kohlenstoffsenke). Für ausgewählte Fragestellungen erfolgten darüber hinaus Betrachtungen entlang der Wertschöpfungskette, um THG-Minderungspotenziale auch in den der Land- und Forstwirtschaft vorgelagerten (z.B. Mineraldüngereinsatz) und nachgelagerten Bereichen (z. B. Verarbeitung und Konsum von Nahrungsmitteln) zu erfassen. Grundlage für diesen Bericht bilden die Erkenntnisse aus den Arbeitsgruppen im Rahmen der jährlich durchgeführten Vernetzungstreffen, eine Abfrage zu allen 27 Projekten, die ein Jahr vor Projektende im November 2024 durchgeführt wurde, ergänzt um veröffentlichte und berichtete Projektergebnisse und weitere Literatur.

[1] Aktuelle Fassung vom 15.7.2024 (https://www.recht.bund.de/bgbl/1/2024/235/regelungstext.pdf?__blob=publicationFile&v=2); zu Projektstart gültige, am 31. August 2021 in Kraft getretene Gesetzesnovelle (https://dserver.bundestag.de/btd/19/302/1930230.pdf)

[2] https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/klimaschutzbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=6 (S.51)

Für Projekte, die im Rahmen des Klima- und Transformationsfonds (KTF) finanziert werden, gibt es Anleitungen, wie die THG-Emissionsminderungen erfasst werden sollen. Der Klima- und Transformationsfonds (KTF) ist ein zentrales Finanzierungsinstrument der Bundesregierung für Energiewende und Klimaschutz in Deutschland (BRH 2023a) und seine Programme sollen vorrangig und effizient zum Ziel der THG-Minderung beitragen. Nachfolgend wird dieser Ansatz vorgestellt und untersucht, inwieweit diesem für die RessortForschtKlima-Projekte gefolgt werden konnte bzw. welche Einschränkungen es gab. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass sich die Zielrichtung des Aufrufs für diese Projekte erheblich unterschieden hat von Aufrufen, die bereits während der Projektlaufzeit auf die unmittelbare Verringerung der THG-Emissionen abzielten. So steht die zentrale Frage im Raum, welchen Beitrag Forschungsprojekte – und hier speziell die des RessortForschtKlima-Verbunds – zur THG-Minderung leisten können und wie dieser zu bewerten ist, auch wenn die Klimawirkung selbst nicht oder nur eingeschränkt quantifizierbar ist. Hierfür wurden **die RessortForschtKlima-Projekte acht Themenfeldern zugeordnet**, die im Hinblick auf die jeweils adressierten THG und dazugehörigen Optionen zur THG-Minderung vorgestellt werden, entweder durch Emissionsreduktion oder durch Verbesserung der Senkenfunktionen.

Eine Liste mit den Kürzeln in alphabetischer Reihenfolge und dem Langnamen des Projektes findet sich im Anhang 1. Nähere Details zu den einzelnen Projekten können dem Abschlussbericht (RessortForschtKlima, 2025) entnommen werden.

2 Die Ausgangssituation - Klimaschutzziele Deutschlands in den Bereichen Landwirtschaft und LULUCF sowie bereits Erreichtes

Im Jahr 2024 lagen die Emissionen in der deutschen Landwirtschaft bei 62,1 Mio. t CO_2e (KSG-Sektor Landwirtschaft, d.h. Quellgruppe 3 Landwirtschaft einschließlich der Emissionen aus stationärer und mobiler Feuerung in der Landwirtschaft). Die wichtigsten THG im KSG-Sektor Landwirtschaft sind Methan (CH_4) mit 54 %, das vorwiegend aus der Tierhaltung stammt, und Lachgas (N_2O) mit 29 % (UBA, 2025c). Bei diesen beiden THG ist in Deutschland die Landwirtschaft Hauptemittent (UBA, 2025b). Betrachtet man die Emissionsquellen innerhalb der Landwirtschaft, so stehen mit 25,4 Mio. t CO_2e die Emissionen in Form von Methan (CH_4) aus der Wiederkäuerverdauung an erster Stelle, gefolgt von N_2O-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden in Höhe von 15,1 Mio. t CO_2e. Diese Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden entstehen durch Stickstoffumsetzungsprozesse, insbesondere nach Ausbringung N-haltiger Mineraldünger und von Wirtschaftsdüngern. Emissionen aus der Wirtschaftsdüngerlagerung in Form von CH_4 und N_2O betragen 9,2 Mio. t CO_2e. Hinzu kommen Kohlendioxid-Emissionen in Höhe von insgesamt 3,85 Mio. t CO_2e aus der Kalkung, aus Harnstoffdüngern sowie aus anderen Düngern. Weitere 1,6 Mio. t CO_2e stammen aus der Biogasproduktion aus Energiepflanzen, diese machen 4,5 % der landwirtschaftlichen Emissionen aus (UBA, 2025b). Der Landwirtschaft zugerechnet werden außerdem 8,4 Mio. t CO_2e aus Brennstoffverbräuchen in der Landwirtschaft, z.B. durch Landmaschinen (stationäre & mobile Feuerung). Die Zuordnung erfolgt jedoch nur bei der Berichterstattung zur Überprüfung der Einhaltung des Emissionsminderungspfades gemäß Klimaschutzgesetz, da Emissionen aus Brennstoffverbräuchen eigentlich der Energiewirtschaft zuzurechnen sind. Deshalb werden sie beim Nationalen Inventarbericht nach UNFCC in der Kategorie Energie berichtet (UBA, 2025a). Emissionen und Einbindung von CO_2 in Böden werden nicht im Sektor Landwirtschaft, sondern im Sektor LULUCF betrachtet.

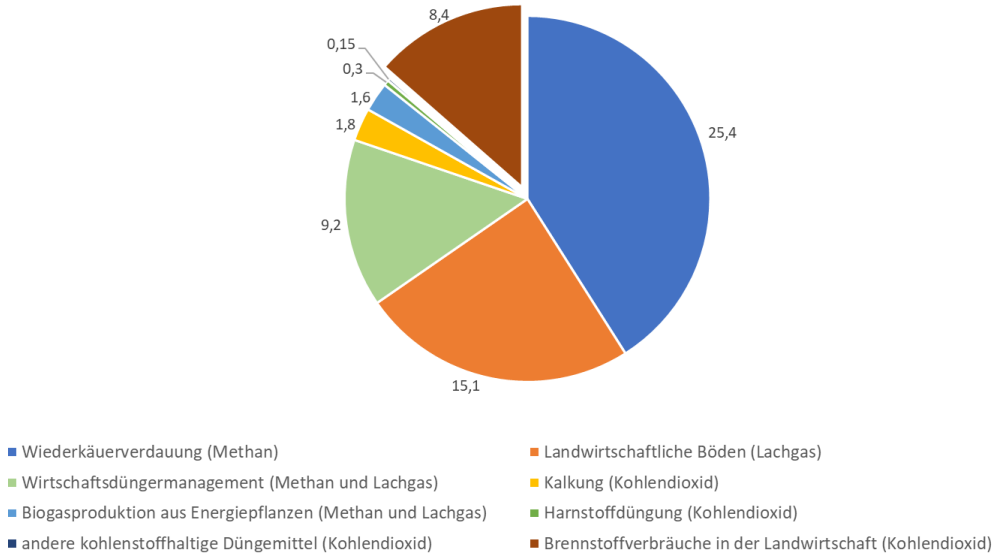

Abb. 1: THG-Emissionen aus dem Sektor Landwirtschaft, einschließlich Brennstoffverbrauch in der Landwirtschaft in 2024 (in Mio. t CO_2e)
Quelle: eigene Darstellung basierend auf UBA 2025c

Der Bereich Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft einschließlich Holzprodukte (LULUCF) umfasst sowohl Kohlenstoffsenken als auch THG-Emissionen. Während im Sektor Landwirtschaft sowie bei den Brennstoffverbräuchen ein kontinuierlicher Rückgang in den Emissionen gelang, haben die Emissionen im LULUCF-Bereich in den letzten Jahren zugenommen. Dies ist nicht nur mit der Altersstruktur der Wälder zu erklären, sondern ist insbesondere bedingt durch Schäden im Wald aufgrund von Dürre und Kalamitäten. Dadurch sind die Wälder von einer Senke zu einer Quelle von Treibhausgasemissionen geworden. Die Senkenwirkung der Wälder kompensiert daher nicht mehr die THG-Freisetzung bei der landwirtschaftlichen Nutzung von Böden, insbesondere aus entwässerten organischen Böden. Im Bereich LULUCF betrugen die Emissionen im Jahr 2024 insgesamt 51,3 Mio. t CO_2e (UBA, 2025d). Für die Berichterstattung erfolgt eine Aufteilung in Wälder, Ackerland, Grünland, Feuchtgebiete und Siedlungen. Die Emissionen aus organischen Böden werden gemäß ihrer Nutzung in allen Landnutzungsklassen berichtet. Die Landnutzungskategorie „Feuchtgebiete“ umfasst auch Emissionen aus Torfabbau und -nutzung.

Acker- und Grünland sowie Feuchtgebiete sind mit 42,1 Mio. t CO_2e THG-Quellen, aber auch der Wald trug mit 0,5 Mio. t CO_2e zu den Emissionen bei. Lediglich Holzprodukte sind eine Senke mit -2,2 Mio. t CO_2e (UBA, 2025d). Die Höhe der Emissionen in den Sektoren Landwirtschaft und LULUCF zeigen, dass weitere Anstrengungen zur THG-Reduzierung erforderlich sind.

Darüber hinaus entstehen Emissionen bei der Herstellung von Betriebsmitteln für die Landwirtschaft, insbesondere bei der Produktion von mineralischem Stickstoffdünger sowie in deutlich geringerem Umfang bei der Herstellung von Pflanzenschutzmitteln. Diese werden dem Bereich Industrie zugerechnet, ebenso wie Emissionen, die bei der Verarbeitung von Ernteprodukten entstehen, z.B. in der Lebensmittelindustrie. Die Emissionen, die durch importierte Betriebsmittel im Ausland entstehen, sind nicht Bestandteil der deutschen THG-Inventare, beispielsweise die Emissionen aus der Produktion und dem Transport von Importfuttermitteln.

Bisherige Projektionen zeigen, dass weitere Maßnahmen notwendig sind, um einen Rückgang der Emissionen voranzubringen und die Kohlenstoffsenkenfunktion im LULUCF-Sektor zu stützen. Mit den bereits umgesetzten und konkret geplanten Maßnahmen kann laut Projektionsbericht 2025 (Förster et al., 2025) das Ziel der Netto-Treibhausgasneutralität bis 2045 in Deutschland nicht erreicht werden. Auch wenn die Emissionen in den vergangenen Jahren aufgrund sinkender Tierbestände und geringerer Stickstoffdüngung zurückgegangen sind, sind weitere Klimaschutzmaßnahmen in den Sektoren Landwirtschaft und LULUCF notwendig. Forschungsprojekte, auch in Zusammenarbeit mit der Landwirtschaft und Industrie, sind daher unerlässlich, um innovative Lösungen zur weiteren Reduktion der Emissionen des Sektors Landwirtschaft und der landwirtschaftlichen Flächennutzung von über 100 Mio. t CO2e zu entwickeln.

3 Methodik

3.1 Bewertung von Aktivitäten im Klima- und Transformationsfonds - der Wirkketten-Ansatz

Im Rahmen des Klima- und Transformationsfonds (KTF) wird der Beitrag von Projekten auf den Klimaschutz häufig mit Hilfe des sogenannten Wirkketten-Ansatzes dokumentiert. Im Folgenden wird der Wirkketten-Ansatz kurz vorgestellt. Darauf aufbauend werden die Schwierigkeiten diskutiert, diesen Ansatz auf Forschungsprojekte zu übertragen.

Eine Wirkkette, teilweise auch als Wirkungskette bezeichnet, geht von einem ursächlichen Ereignis (Auslöser) aus, welches eine Abfolge von weiteren Ereignissen nach sich zieht bzw. nach sich ziehen kann. Sie dient dazu, eine Kausalität zwischen einer (geplanten) Aktivität bis hin zur (potenziellen) Wirkung herzustellen, die dann bestenfalls quantifizierbar ist. Wirkketten werden in vielen verschiedenen Forschungsfeldern angewandt, um die Effekte einer Aktivität aufzuzeigen und das System zu visualisieren, in das die Aktivität eingebunden ist. Auch in der Projektarbeit findet dieser Ansatz seit Längerem Anwendung. So heißt es beispielsweise „Eine Wirkungskette bildet die geplanten Wirkungen eines Projektes ab. Dies ist die Voraussetzung für eine spätere Überprüfung der Zielerreichung.“ (PTB, 2008).

Der Wirkketten-Ansatz bietet sich als eine Möglichkeit zur Ermittlung von THG-Minderungen an (Tews et al., 2020). So hatte das Ministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Zuge des Förderaufrufs im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative (NKI) eine Arbeitshilfe zur Ermittlung der Treibhausgasminderung mit Hilfe des Wirkketten-Ansatzes veröffentlicht (BMWK, 2024). Eine ausführlichere Beschreibung enthält das im Auftrag des BMWK erstellte „Methodenhandbuch zur Evaluation der Nationalen Klimaschutzinitiative (NKI)“ (Schumacher et al., 2023). Laut BMWK (2024) dient die Wirkkettenbetrachtung dazu, im Rahmen von Projekten, und zwar bereits zum Zeitpunkt des Projektantrags, möglichst fundierte Aussagen zu den potenziell erreichbaren THG-Einsparungen zu treffen. Zu Projektende sind dann die tatsächlich erreichten Einsparungen zu quantifizieren. Im Zentrum steht dabei die Frage: Wie bringt man eine definierte THG-Maßnahme mit bekannter Wirkweise am besten voran und wie erreicht man möglichst viele Personen, um eine möglichst große und langfristige Wirkung zu erzielen? Der Bundesrechnungshof (BRH 2023b) fordert für staatlich geförderte Klimaschutzmaßnahmen, dass „die Fördereffizienz in Bezug auf die Minderung von Treibhausgasen (THG-Fördereffizienz) ein maßgebliches Kriterium für Förderentscheidungen im Klimaschutz sein müsse“. Um die THG-Fördereffizienz bestimmen zu können, sollen bereits in der Antragsphase die geplanten THG-Einsparungen den Projektkosten gegenübergestellt werden. Bei Abschluss des Projektes soll dann nochmals die Fördereffizienz unter Berücksichtigung des Projekterfolges ermittelt werden. Dies ist für Forschungsprojekte jedoch nur sehr eingeschränkt möglich.

Die Wirkkette soll laut BMWK (2024) genutzt werden, um die Ursächlichkeit einer Klimaschutz-Maßnahme für eine eingetretene Wirkung zu beurteilen. Ziel ist es, fundierte Aussagen zu den erreichten bzw. erreichbaren THG-Einsparungen zu treffen. Dabei gilt es, die kausalen Zusammenhänge nicht nur qualitativ, sondern die Minderung auch quantitativ in Tonnen CO_2e darzustellen. Am Anfang der Wirkkette steht die Intervention. Darunter versteht man diejenigen Arbeitsschritte beziehungsweise Handlungen in einem Vorhaben, die darauf gerichtet sind, bei der Zielgruppe THG-Minderungen auszulösen. Die Effektivität einer Maßnahme ist dabei auch immer von der jeweiligen Zielgruppe abhängig. In Abhängigkeit davon, wer mit Maßnahme(n) adressiert wird und deren Effektivität, ergibt sich ein bestimmter Einsparwert. Unter Berücksichtigung des erreichbaren Einsparwerts wird in einem nächsten Schritt die durchschnittliche jährliche Einsparung (in kg oder t CO_2e/a) ermittelt. Relevant ist außerdem der zeitliche Ablauf der Aufnahme einer Innovation. So kann die Zeitspanne zwischen Umsetzung durch frühzeitige Anwender (early adopters) und der späteren Anwendung in der Breite sehr unterschiedlich lang sein. Für die THG-Wirksamkeit ist darüber hinaus die Wirkdauer einer Maßnahme entscheidend. Je länger die Wirkdauer, desto höher die kumulierte Einsparung. Bei einer investiven Maßnahme kann die Wirkdauer relativ sicher abgeschätzt werden, da sie der Nutzungsdauer einer technischen Anlage oder eines Bauwerks entspricht. Bei Maßnahmen, die Verhaltensänderungen erfordern, besteht immer die Gefahr einer Rückkehr zum gewohnten Verhalten, so dass eine Abschätzung der Wirkdauer mit mehr Unsicherheiten behaftet ist.

Die einzelnen Schritte in der Wirkkette sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

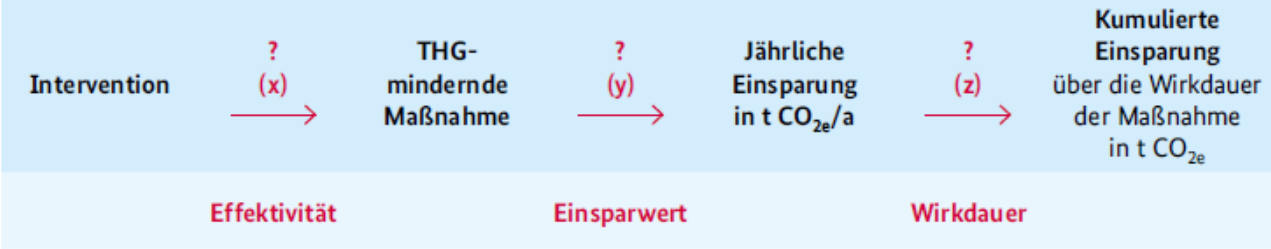

Abb. 2: Wirkkette zur Ermittlung von THG-Einsparungen
Quelle: BMWK (2024), S.5

Neben einer einzelnen Maßnahme können auch Maßnahmenbündel Gegenstand der Untersuchung sein. Bei investiven Vorhaben stehen technologische Veränderungen im Vordergrund, z.B. zur Energieeinsparung. Je höher der Technologie-Reifegrad (TRL, Technology Readiness Level) ist, desto eher kann davon ausgegangen werden, dass die Innovation auch Eingang in die Wirtschaft findet und umgesetzt wird. Dennoch bleibt es schwer abschätzbar, wann innovative technische oder auch nicht-technische Produkte und Verfahren marktfähig sind. In Forschungsprojekten dominieren - sofern überhaupt adressiert - niedrige TRL, hier ist eine Abschätzung noch schwieriger.

3.2 Ansatz zur Ermittlung von (potenziellen) Treibhausgaseinsparungen bei RessortForschtKlima

Forschungsprojekte erbringen in der Regel keinen unmittelbaren Klimaschutzbeitrag in der Projektlaufzeit und auch ihr potenzieller Klimaschutzbeitrag kann nur eingeschränkt und mit Unsicherheiten eingeschätzt werden. Daher hatte auch das BMWK in einer Antwort auf die Forderung des Bundesrechnungshofs nach einer einheitlichen Berechnung der THG-Minderungen klargestellt, dass die Messung bzw. Abschätzung der THG-Minderung in den verschiedenen Förderbereichen unterschiedlich gut möglich sei und die Datenqualität variiere (BRH 2023b). Es wurde dargelegt, dass in manchen Fällen eine genaue Berechnung der THG-Minderung nur teilweise oder gar nicht möglich sei. „Im letztgenannten Fall solle jedoch dargelegt werden, wie die Maßnahme nachweislich und in besonderem Maße zu einer THG-Minderung führt bzw. wie sie mittelbar und langfristig essenziell zur Erreichung der Sektorziele beitrage.“ (BRH 2023b, S.15) Laut BMWK gelte dies insbesondere für Forschungsvorhaben oder Beratungsprojekte.

Die Guidelines der Europäischen Kommission für die THG-Projektionen geben vor, dass auch Forschungsprogramme und Demonstrationsprojekte als Klimaschutzmaßnahme zu berichten sind (EU-Kommission, 2025). Neben Maßnahmen mit quantifizierbarer THG-Minderungswirkung werden im Projektionsbericht (Förster et al., 2025) auch flankierende Maßnahmen ohne direkte, quantifizierbare Wirkung aufgeführt, darunter auch Forschung neben Informations- und Bildungsmaßnahmen. Flankierende Maßnahmen unterstützen die Umsetzung von Maßnahmen mit quantifizierbarer Wirkung. Die RessortForschtKlima-Projekte gehören entsprechend zur Maßnahme „Forschungsinitiative zur Erreichung der Klimaschutzziele 2030“, die im Projektionsbericht als flankierende Maßnahme aufgeführt wird.

Bei Forschungsprojekten geht es zunächst darum, neue bzw. verbesserte Ansatzpunkte für THG-Emissionsreduktionen bzw. für Kohlenstoffsenken zu identifizieren und weiterzuentwickeln. Darunter sind auch solche, deren Wirkweise noch nicht oder kaum bekannt ist.

Im RessortForschtKlima Verbund wurde untersucht, mit welcher Fragestellung die Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen bei ihrem Projekt ansetzten und welche Optionen sie betrachtet haben. Eine Reihe von RessortForschtKlima-Projekten legte ihren Fokus auf naturwissenschaftliche Erkenntnisse. Bei anderen Projekten ging es darum, für Deutschland spezifische bzw. regional differenzierte Emissionsfaktoren zu bestimmen (zur Verbesserung der Emissionsberichterstattung von „Tier 1“ zu „Tier 2“ bzw. „Tier 3“). Denn erst dann ist es möglich, den THG-Minderungseffekt von Maßnahmen entlang der Wirkungskette genauer zu bemessen und zu skalieren. Einige Forschungsprojekte leisteten einen Beitrag zur Verbesserung der Datengrundlage für die Berichtspflichten oder trugen zur kontinuierlichen Verbesserung der Inventarmethoden bei. Um die Erreichung

nationaler und internationaler Klimaschutzziele nachzuweisen, müssen THG-Minderungen in den THG-Inventaren berichtet werden können.

Ein weiterer Unterschied bei den RessortForschtKlima-Projekten liegt in der mit größeren Unsicherheiten behafteten Einschätzung des Wirkumfangs und der Wirkdauer der potenziell effektiven THG-mindernden Maßnahmen. Der häufig kurzen Laufzeit von Forschungsprojekten – bei RessortForschtKlima sind es 3 Jahre – steht eine zumeist sehr langsame Durchdringung der land- und forstwirtschaftlichen Praxis gegenüber. Erst zu einem späteren Zeitpunkt, häufig erst Jahre nach Projektabschluss, und auch nur dann, wenn die Projekterkenntnisse auf entsprechende Akzeptanz in Politik und/oder Praxis treffen und auch umgesetzt werden, kann eine signifikante und dauerhafte Wirkung erzielt werden. Aus diesen Gründen ist eine Einschätzung des Gesamtpotenzials an THG-Einsparungen über Zeit und Raum nur bei einigen Projekten möglich gewesen und mit großen Unsicherheiten behaftet. Zudem ist das Allokationsproblem nicht zu unterschätzen: Eine Zuweisung der erzielten THG-Minderung zu einem einzelnen Projekt und die entsprechende Abgrenzung zu anderen Projekten und Aktivitäten der öffentlichen und privaten Hand mit ähnlicher Zielrichtung ist sehr schwierig. Weiterhin treten Skaleneffekte in der Regel, und so auch bei den vorliegenden Projekten, meist erst dann ein, wenn weitere Forschungsvorhaben auf den erzielten Ergebnissen aufbauen bzw. diese bestätigen. Nicht selten sind Anschlussprojekte bzw. ergänzende Untersuchungen erforderlich, z.B. um in Pilotvorhaben Maßnahmen in der Praxis umzusetzen. Dafür bedarf es auch häufig des Einsatzes von Multiplikatoren außerhalb der Wissenschaft, um Wirkungen über einen längeren Zeitraum zu erzielen. So entfalten neue Erkenntnisse zu klimaschonenden Pflanzeneigenschaften und entsprechenden Genotypen erst dann ihre Klimaschutzwirkung, wenn entsprechende neue Sorten entwickelt und erfolgreich geprüft wurden und diese großflächig in den praktischen Anbau gelangen.

Für die RessortForschtKlima-Projekte sollten trotz der beschriebenen Herausforderungen die Wirkmechanismen so gut wie möglich dargestellt werden. Es wird zumindest qualitativ dargelegt, worauf die jeweils (angestrebte) THG-Minderung beruht. Hierfür wurden die einzelnen RessortForschtKlima-Projekte in thematische Gruppen zusammengefasst. Wenn möglich, erfolgte darüber hinaus auch eine quantitative Potenzialabschätzung, bei gleichzeitiger Benennung identifizierter Unsicherheiten.

Für die Untersuchung der RessortForschtKlima-Projekte ergibt sich nachfolgend dargestellter Wirkketten-Ansatz. Die gestrichelten Pfeile werden verwendet um zu signalisieren, dass es nicht für alle Projekte sinnvoll und möglich ist alle Schritte der Wirkkette darzustellen. Insbesondere Aussagen bezüglich Effektivität, Einsparwert und Wirkungsdauer sind mit großen Unsicherheiten behaftet – dies ist an dieser Stelle zu betonen.

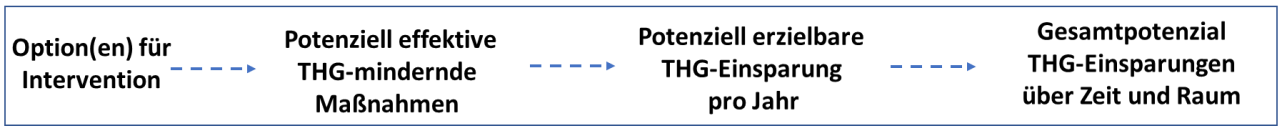

Abb. 3: Für Forschungsprojekte angepasste Wirkkette zur Ermittlung von potenziell erzielbaren THG-Einsparungen

An dieser Stelle wird nochmals darauf hingewiesen, dass der Förderaufruf für die RessortForschtKlima-Forschungsprojekte einer anderen Logik folgte. Die Forschungsprojekte sind als Antwort auf die mit dem Klimaschutzgesetz gestiegenen Anforderungen an die Landwirtschaft und besonders an den LULUCF-Sektor zu sehen. Forschungsaktivitäten sollten einen Beitrag leisten zu den vier als „besondere Herausforderungen“ identifizierten Aspekten: „Klimaberichterstattung, wissenschaftliche Folgenabschätzungen, die wissenschaftliche Begleitung und Weiterentwicklung laufender Maßnahmen sowie die sozioökonomische Forschung zur Begleitung von Vorhaben“ (BMWK 2022, S.51). Jedes der RessortForschtKlima-Projekte lässt sich zumindest einem dieser vier Aspekte zuordnen. In Abhängigkeit davon liegt der Ansatz- bzw. Schwerpunkt an unterschiedlichen Stellen entlang der Wirkkette, wie die folgende Abbildung veranschaulicht. Eine Zuordnung der einzelnen Projekte erfolgt in Kapitel 3.3.2.

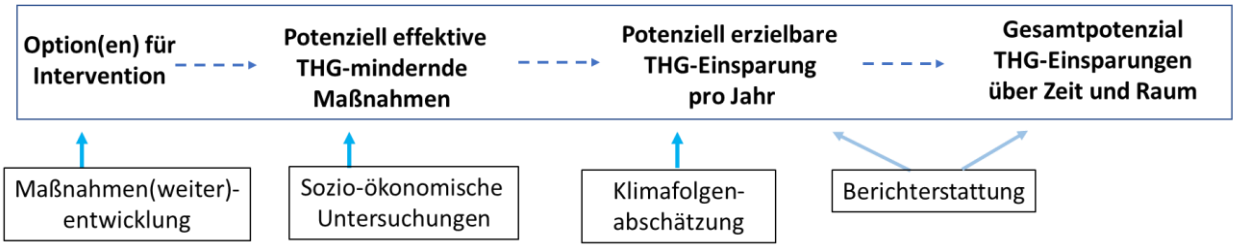

Abb. 4: Ansatzpunkte der RessortForschtKlima-Projekte entlang der Wirkkette

3.3 Einordnung der RessortForschtKlima-Projekte

Im November 2024 wurde eine Abfrage zur Klimaschutzwirkung der Einzelprojekte durchgeführt. Es wurde danach gefragt, welche(s) Treibhausgas(e) im Fokus steht/en bzw. ob Kohlenstoffsenken adressiert werden. Zudem wurde um die Einordnung eines oder mehrere der folgenden Aspekte gebeten: Wissenschaftliche Begleitung und Weiterentwicklung laufender Klimaschutz- und / oder Kohlenstoffspeicherungsmaßnahmen, wissenschaftlicher Beitrag zur Folgenabschätzungen von Klimaschutzmaßnahmen und/oder Kohlenstoffspeicherung, qualitative und / oder quantitative Verbesserung bei der Klimaberichterstattung, Sozio-ökonomische Untersuchungen zu Klimaschutz und Kohlenstoffsequestrierung. Darüber hinaus wurde gefragt, ob im Rahmen des Projektes eine Quantifizierung der (potenziellen) Klimaschutzwirkung erfolgt und ob beabsichtigt ist, ein Potenzial für Deutschland herzuleiten. Die gesammelten Antworten werden im Folgenden kurz vorgestellt.

3.3.1 Einordnung der Projekte nach Treibhausgasen bzw. Kohlenstoffsenke

Die RessortForschtKlima-Projekte decken eine breite Palette an Treibhausgasen ab. Acht Projekte beschäftigten sich mit CO_2-Senken. Zwei Projekte untersuchen Optionen zur Reduktion von Emissionen im LULUCF Sektor. Während acht Projekte Minderungsoptionen für Emissionen verschiedener Treibhausgase untersuchten (zusammengefasst unter CO_2e), fokussierten sich andere auf ein einziges Treibhausgas. So wurden die Treibhausgase Methan, Sulfuryldifluorid sowie CO_2 alleine in jeweils einem Projekt betrachtet, N_2O in drei Projekten. Das Kreisdiagramm gibt die Verteilung wieder. Daneben finden sich die einzelnen Projektakronyme der RessortForschtKlima-Projekte, die in Kapitel 4 ausführlicher vorgestellt werden.

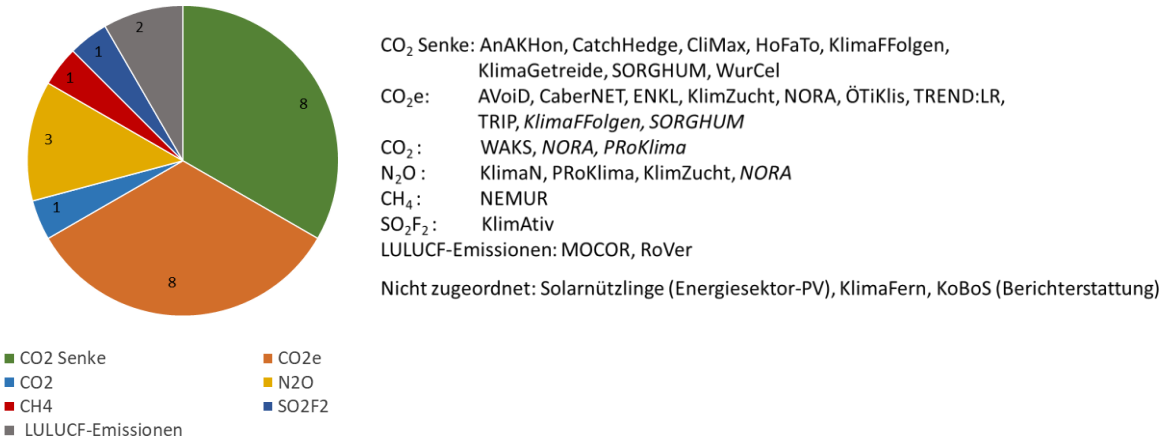

Abb. 5: Zuordnung der Projekte zu Treibhausgasen sowie Kohlenstoffsenke
(Anzahl Projekte; kursiv: zusätzlich betrachtete Kategorie, nicht mitgezählt)

3.3.2 Einordnung der Projekte nach den im Förderaufruf aufgeführten Aspekten

Auftrag der Projekte war es, mindestens zu einem der folgenden vier Aspekte einen Beitrag zu leisten: Berichterstattung, Folgenabschätzung, Maßnahmen(weiter)entwicklung, sozio-ökonomische Untersuchung. So beschäftigten sich 19 der 27 Projekte mit der wissenschaftlichen Begleitung und Entwicklung von Maßnahmen, darunter 11 ausschließlich. Davon führte eine überwiegende Zahl vorbereitende Untersuchungen zu Maßnahmen bzw. wissenschaftlich begleiteten Feldversuche durch. 8 Projekte leisteten einen Beitrag zur wissenschaftlichen Folgenabschätzung, darunter eines ausschließlich. 7 Projekte verfolgten die Gewinnung zusätzlicher Erkenntnisse für die Berichterstattung, eines ausschließlich, und 8 behandelten sozio-ökonomische Fragestellungen, darunter 2 ausschließlich.

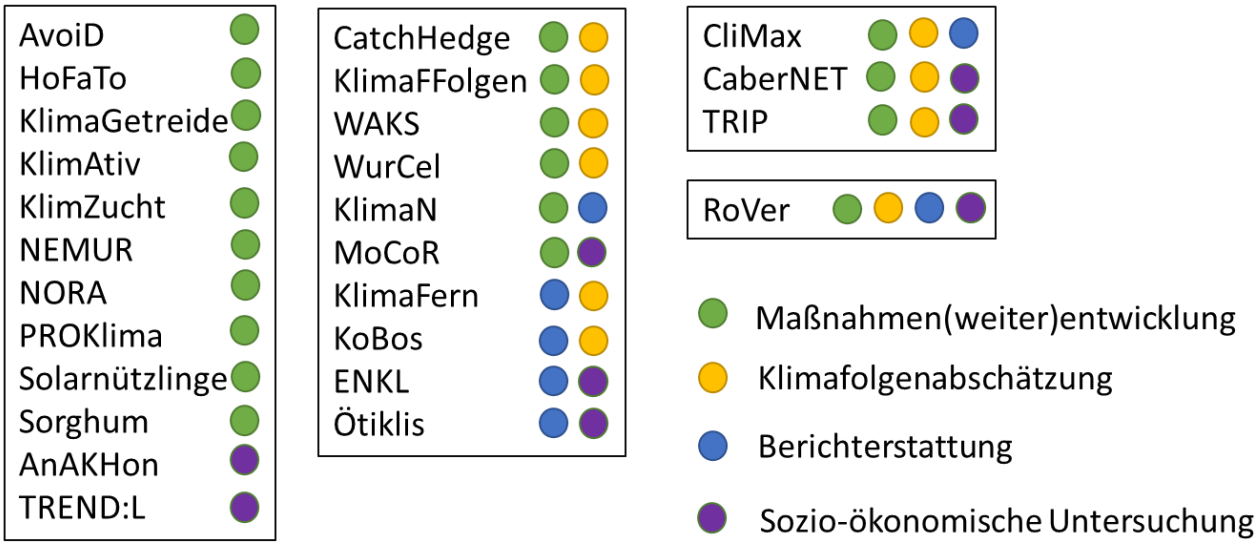

Abb. 6: Zuordnung der RessortForschtKlima-Projekte zu den vier zu betrachtenden Aspekten

3.3.3 Weitere Zuordnungen der Projekte

Auf die Frage nach dem Zeithorizont, das heißt zur Erwartung wann die Erkenntnisse aus den Projekten Eingang in die Praxis (und Politik) finden werden, **dominierte mittel- bis längerfristig als Zeitangabe**. Eine Ausnahme bildeten die zwei Moor-Projekte, bei denen davon ausgegangen wurde, dass bereits kurz- bis mittelfristig eine Wirkung erzielt werden kann.

Ebenfalls abgefragt wurde die (geplante) Berechnungsmethode zur Quantifizierung des Klimaschutzpotenzials. Zum einen gab es Projekte, die eine Produkt-bezogene Quantifizierung des THG-Minderungspotenzials entlang der Wertschöpfungskette in Form von Lebenszyklusanalyse (LCA), CO_2-Fußabdruck bzw. Treibhausgas-bilanzierung durchführten. Daneben gab es die Szenarien-basierte Quantifizierung. Hier wurde das THG-Minderungspotenzial mit Hilfe von Simulation, Szenarien-Analysen oder Modellierung ermittelt. Hier fanden sich auch Ansätze mit Einsatz maschinellen Lernens. Als weitere Methoden zur Quantifizierung wurden genannt: Hochrechnung und vergleichende in-situ-CO_2-Emissionsmessungen.

4 Untersuchung des potenziellen Klimaschutzbeitrags der RessortForschtKlima-Projekte nach Themenschwerpunkten

Die 27 RessortForschtKlima-Projekte wurden mit Ausnahme des Vernetzungs- und Koordinierungsprojektes **acht thematischen Schwerpunkten** zugeordnet. Diese orientieren sich an der zentral adressierten Klimaschutzwirkung. Im Folgenden wird zunächst auf die Wirkmechanismen für jeden betrachteten Schwerpunkt allgemein eingegangen, ergänzt um die spezifischen Aktivitäten der diesem Thema zugeordneten Projekte. Anhang 2 enthält einen tabellarischen Überblick zu den einzelnen Projekten mit einer Kurzbeschreibung des Projektschwerpunktes und des geplanten Beitrags zur THG-Minderung. Zudem findet sich im Anhang für jedes Projekt eine Zuordnung zu den vier zu untersuchenden Aspekten sowie eine Einordnung der Forschungsaktivität entlang der Wirkkette.

4.1 Verringerung der Treibhausgas-Emissionen in der Tierhaltung

Die Nutztierhaltung machte im Jahr 2024 mit 34,9 von 62,1 Mio. t CO2e (UBA 2025b) einen herausragenden Anteil bei den landwirtschaftlichen THG-Emissionen Deutschlands aus. Davon stammten 41 % aus der Wiederkäuerverdauung und 14,9 % aus dem Wirtschaftsdüngermanagement. Nicht berücksichtigt sind hierbei die THG-Emissionen, die bei der heimischen Futterproduktion entstehen, da sie dem Pflanzenbau zugerechnet werden. Bei dem Ziel, die Emissionen aus der Tierhaltung zu reduzieren, nehmen Methanemissionen eine zentrale Rolle ein. Die beiden folgenden Projekte NEMUR und ÖtiKliS zielen auf Emissionsminderungen bei Rindern, Schweinen und Geflügel ab.

4.1.1 Nachhaltige Emissionsmodelle für eine umweltverträgliche Rinderfütterung (NEMUR)

Im Rahmen des Projektes **NEMUR** wurden Milchkühe im Versuchsstall des Friedrich-Loeffler-Instituts mit variierenden Rationen gefüttert, z.T. mit Weidegang, um die ruminalen Methanemissionen zu messen. Zum Einsatz kam das Greenfeed-Methan-Messsystem. Diese neue wissenschaftlich validierte Methode zur Quantifizierung der Methanemissionen bei Rindern hat den Vorteil, dass sich die Messstation in Laufstallsysteme integrieren lässt. Die Tiere werden hierbei, anders als in der Respirationskammer, nicht in ihrer Bewegung und dem Futteraufnahmeverhalten eingeschränkt. Es wurden verschiedene Versuchsreihen in den drei Projektjahren durchgeführt, mit unterschiedlichen Futterkomponenten in 32 Futterrationen. Diese variierten hinsichtlich der Energie- und Nährstoffkonzentration und wurden in Wiegetrögen verfüttert. Auf Basis der erhobenen Daten wurden Gleichungen zur Schätzung der Methanemissionen abgeleitet und wissenschaftlich validiert. Im Projekt selbst wurde nicht nur das Messverfahren im Milchviehstall angewendet, sondern auch durch ergänzende Untersuchungen, u. a. von Pansenfermentations-Parametern, die Umsetzung der Ration im Pansen charakterisiert. Eine Besonderheit im Versuchsaufbau war, dass auch der Gesundheitszustand der Holstein-Kühe mit untersucht wurde, um herauszufinden inwieweit dieser einen Einfluss auf die Methanemissionen hat. Es wurden verschiedene Futterrationen getestet: in der deutschen Milchviehhaltung übliche und solche, die zum Ziel hatten die Methanproduktion zu reduzieren. Auf diese Weise konnten Futtermischungen mit THG-Minderungspotenzial identifiziert und auch im Rahmen des Versuchs quantifiziert werden. Es sind jedoch weitere Schritte erforderlich, damit die ermittelten Werte auch im Berichtswesen entlang der Wirkkette „Methan reduzierte Fütterung von Milchvieh“ als Treibhausgaseinsparungen anerkannt und berichtet werden. Hierfür wäre außerdem erforderlich, dass die im Rahmen von NEMUR und ggf. in weiteren Forschungsprojekten THG-optimierten Futterrationen in der Praxis Verwendung finden. Letztendlich könnten so die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse dazu dienen, dass landwirtschaftliche Betriebe auf Basis der auf ihrem Betrieb eingesetzten Futtermittel und der Rationsgestaltung die betrieblichen Methanemissionen abschätzen, ihr Reduktionspotenzial identifizieren und durch gezielte Anpassung der Rationen tatsächlich reduzieren können. Es konnte gezeigt werden, dass die 32 verschiedene Futterrationen einschließlich Weidegang, die über einen Zeitraum von drei Jahren verfüttert wurden, zu einer hohen Variabilität der Emissions- und Leistungsparameter von Milchkühen führten. Als weiteres Ergebnis aus den dreijährigen Untersuchungen zeigte sich, dass bei gleicher Rationsgestaltung Tiere mit gutem Gesundheitszustand weniger Methan pro kg energiekorrigierter Milch ausstoßen als kranke Tiere, z.B. solche mit Lahmheiten (Unruh et al., 2024).

Potenziell erzielbare THG-Einsparung: Derzeit werden Gleichungen zur Schätzung der Methanemissionen in landwirtschaftlichen Betrieben und unter wissenschaftlichen Bedingungen abgeleitet, die dazu beitragen könnten, die Methanemissionen in Zukunft zu reduzieren. Bei entsprechender Umsetzung in der Praxis, der aktuelle Milchviehbestand in Deutschland liegt bei insgesamt 3,589 Mio. Milchkühen (09/2024), könnten so Einsparungen erreicht werden. Innerhalb welchen Zeithorizonts angepasste Futterrationen Eingang in die Praxis finden, hängt jedoch sowohl von den Futterkosten als auch von der Anrechenbarkeit ab (in der betrieblichen Klimabilanz, in der THG-Berichterstattung).

4.1.2 Ökologische Tierhaltung als Beitrag zum Klimaschutz - im Fokus von Tierkrankheiten und Tierseuchen (ÖtiKliS)

Im Projekt **ÖtiKliS** stand die Tiergesundheit im Vordergrund, mit Fokus auf der Schweine- und Geflügelhaltung. Durch Biosicherheitsmaßnahmen auf landwirtschaftlichen Betrieben, hier insbesondere im Stall und auf dem Betriebsgelände, lässt sich die Gefahr durch Tierseuchen reduzieren. Im Vordergrund standen die Verbesserung der Lebensdauer und Produktivität der Tiere sowie die Verringerung der Zahl der unproduktiven Tierverluste durch Krankheitsprävention und verbesserte Biosicherheitsmaßnahmen (Herrmann et al., 2024). Die Tierseuchensituation bleibt in Deutschland angespannt, vor allem aufgrund des Auftretens der Afrikanischen Schweinepest (ASP), der Maul- und Klauenseuche (MKS) Anfang des Jahres in Brandenburg und der Geflügelpest (HPAI). Da im Seuchenfall nicht nur die erkrankten Tiere sterben, sondern auch darüber hinaus ganze Bestände zur Seuchenprävention gekeult werden müssen und somit einer Verwertung entzogen werden, sind die Tierverluste nicht nur ökonomisch relevant, sondern führen auch zu unproduktiven Treibhausgasemissionen. Daher sind Anstrengungen im Bereich Tiergesundheit positiv für die Klimabilanz einzuordnen. Um die Klimaauswirkungen einer Bestandskeulung im Vergleich zu einem regulären, uneingeschränkten Produktionsablauf in der Mastschweinehaltung zu quantifizieren erfolgte die Berechnung der Emissionen auf Basis einer Lebenszyklusanalyse (LCA). Zu Beginn wurden anhand von Literaturdaten ein Referenzbetrieb eines durchschnittlichen deutschen Mastschweinebetriebs sowie der typische Verfahrensablauf im Falle eines Tierseuchenausbruchs modelliert. Auf dieser Grundlage wurden die Emissionen berechnet, die im Zuge der Bekämpfung eines Ausbruchs der Afrikanischen Schweinepest entstehen. Bisher werden Tierverluste im Seuchenfall nicht gesondert in der THG-Berichterstattung erfasst, sondern nur absolute Veränderungen der Bestandszahlen. Damit ist von einer Unterschätzung der Klimawirkung auszugehen. Gleichzeitig gewinnt die Biosicherheit weiter an Bedeutung durch die Zunahme an Tiererkrankungen, die ein Seuchenmanagement in Deutschland erfordern. Das Projekt lieferte erste belastbare Daten über die Emissionen, die im Zusammenhang mit einem Tierseuchenausbruch und dessen Bekämpfung entstehen. Eine Optimierung der Biosicherheit zur Vermeidung eines Tierseucheneintrags ist häufig kurzfristig und teilweise kostengünstig umsetzbar. Die Einrichtung epidemiologischer Einheiten, dabei bilden die dort gehaltenen Tiere (Bestand oder Teilbestand) eine Einheit, wodurch im Seuchenfall Teilkeulungen ermöglicht werden sollen, erfordert hingegen mehr Zeit und Investitionen. Während Verbesserungen der Biosicherheit relativ schnell realisierbar sind, lässt sich die Einrichtung epidemiologischer Einheiten zur Eindämmung bzw. Vermeidung von Seuchenfällen nur mittel- bis langfristig umsetzen.

Potenziell erzielbare THG-Einsparung: Eine Reduktion unproduktiver CO_2e-Emissionen durch verbesserte Biosicherheit und Vermeidung von Seuchenfällen ist erstrebenswert, nicht nur aus Sicht des Tierwohls und aus ökonomischen Aspekten, sondern auch aufgrund der klimatischen Auswirkungen. Wie relevant dies in Deutschland mit einem Gesamtbestand von 21,184 Mio. Schweinen (09/2024) ist, zeigen diese Berechnungen: Erstmals wurde der CO_2-Fußabdruck eines Ausbruchs der Afrikanischen Schweinepest simuliert. Dieser lag bei 4 kg CO_2e/kg Lebendgewicht. Dies führt im Durchschnitt zu einer Erhöhung der Betriebsemissionen um 150 % im Vergleich zur regulären Mastschweineproduktion. Daher ist es unabdingbar, die Tiere durch eine hohe Biosicherheit präventiv vor einem Tierseucheneintrag zu schützen und gesund zu halten, dadurch ihre Lebens- und Produktionsleistung zu optimieren und so den unproduktiven Anteil zu reduzieren.

4.2 Erhöhung der Ressourceneffizienz und Senkung der Stickstoffüberschüsse

Die THG-Minderung durch Senkung von Stickstoffüberschüssen im Ackerbau zielt vorrangig auf die Reduzierung von N_2O-Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden. Stickstoff (N) ist ein essentieller Nährstoff von Kulturpflanzen. Gleichzeitig wirkt der durch Düngung aus landwirtschaftlich genutzten Böden freiwerdende Stickstoff in Form von Lachgas (N_2O) als Treibhausgas. Lachgas ist ein sehr langlebiges und wirksames THG, das gemäß den aktuellen Regeln zur Emissionsberichterstattung 265-mal so klimaschädlich ist wie Kohlendioxid (IPCC 2014, Fifth Assessment Report). Laut Treibhausgasberichterstattung stammten 2023 ca. 42 % der Stickstoff-zufuhr der Landwirtschaft aus Mineraldüngern (UBA 2025f). In 2022 lag der N-Überschuss über alle Kulturen bei rund 63 kg N/ha landwirtschaftlicher Fläche (BMLEH 2025). Daher trägt die Reduzierung von Stickstoffüberschüssen zum Klimaschutz bei. Dieser Beitrag ist umso höher, je besser Stickstoffangebot und Pflanzenbedarf zueinander passen. Dies kann durch Steigerung der Stickstoffnutzungseffizienz (NUE, Nitrogen Use Efficiency) erreicht werden, zum einen durch Züchtungsfortschritt bei den Kulturpflanzen (vgl. Laidig et al., 2024) und zum anderen durch eine bessere Berücksichtigung von Extremwetter bei der Düngung.

Im Rahmen des RessortForschtKlima-Verbundes gibt es drei Projekte, die zur Erhöhung der Ressourceneffizienz bei der Züchtung ansetzten. Alle diese Züchtungsprojekte strebten zwar eine Klimaschutzwirkung an, inwieweit diese auch tatsächlich eintritt ist neben der erfolgreichen Züchtungsarbeit auch von weiteren Akteuren wie Saatzuchtunternehmen, Landwirten und Handel abhängig. Diese Projekte setzten relativ am Anfang der Wirkkette „Klimaschutz durch Steigerung der Stickstoffnutzungseffizienz im Pflanzenbau“ an. Nicht zuletzt spielen bei neuen Sorten auch die Ertragsfähigkeit und -stabilität unter verschiedenen Anbaubedingungen in Deutschland eine wesentliche Rolle und auch die Frage, inwieweit diese sich durchsetzen können und ihr Potenzial bezüglich TGH-Minderung auch tatsächlich „ausspielen“ können. Emissionseinsparungen bei der Mineraldüngerproduktion, die dem Sektor Industrie zuzurechnen sind, wurden hier nicht betrachtet. Durch energieoptimierte Herstellungsprozesse, aber vor allem durch den Einsatz erneuerbarer Energiequellen bei der Produktion zur Herstellung des sogenannten „Grünen Düngers“ kann die THG-Bilanz verbessert werden, was sich bei Einsatz solcher Stickstoffdünger positiv auf den CO_2-Fußabdruck auswirkt.

4.2.1 Ertragsentwicklung und optimierte N-Düngung im Klimawandel (KlimaN)

Zunehmende Folgen des Klimawandels mit vermehrten Extremwetterlagen führen dazu, dass ein zunehmender Teil des N-Düngers nicht von den Pflanzen aufgenommen wird, sondern – sofern dieser nicht als Nitrat in das Grundwasser ausgewaschen wird – in Form von Lachgas, Stickoxid und Ammoniak in die Atmosphäre entweichen kann. Das Projekt **KlimaN** untersuchte den Einfluss des Klimawandels auf die Erträge und die Potenziale einer effizienten Stickstoffdüngung trotz vermehrter Extremwetterereignisse. Betrachtet wurden Zusammenhänge zwischen Witterungseffekten auf Proteingehalt, Proteinertrag, N-Nutzungseffizienz (NUE) und Kohlenstoffbilanz sowie Ansatzpunkte für eine klimaangepasste Düngung in der Praxis. Langjährige detaillierte Wetterdaten kombiniert mit regionalisierten Ertragsdaten (Duden et al., 2024) dienen einem besseren Verständnis bezüglich beobachteter Ertragsvariabilität und bedarfsgerechter N-Düngung. Hierdurch können nicht nur Lachgasemissionen in der Landwirtschaft reduziert werden, sondern durch Einsparung von Düngemitteln darüber hinaus auch CO_2-Emissionen bei der energieintensiven Herstellung von Mineraldünger. Zudem wurde ein Choice Experiment mit Landwirten durchgeführt, um die Zusammenhänge zwischen Düngeentscheidungen in der Praxis, Preisanreizen und Unsicherheiten in Bezug auf die Ertrags- und Qualitätserwartung bei Winterweizen zu untersuchen.

<u>Potenziell erzielbare THG-Einsparung:</u> Eine Reduktion der N_2O-Emissionen durch eine bessere Anpassung der Düngung an die N-Verfügbarkeit und Aufnahmefähigkeit ist durch verbesserte Witterungs- und Ertragsvorhersagen möglich und sollte insbesondere in Regionen mit hoher und steigender Ertragsvariabilität aufgrund des Klimawandels umgesetzt werden. Dabei spielen Zeitpunkt, Stärke und Dauer von Extremwetterereignissen eine wichtige Rolle. Die Ergebnisse zeigen außerdem, dass eine standortoptimierte Sortenwahl und diversifizierte Anbauziele helfen können, das Risiko zu streuen und den Bedarf an unterschiedlichen Weizenqualitäten auch im Klimawandel THG-effizient zu bedienen. Zudem leisten stresstolerante und stickstoffeffiziente Sorten einen nachweisbaren Klimaschutzbeitrag, sodass die NUE als zusätzliches Kriterium bei der Selektion und in der Wertprüfung neuer Sorten noch stärker genutzt werden sollte.

Die Förderung von Züchtung und Anbauberatung inklusive verbesserter Witterungs- und Ertragsvorhersage für standort- und klimaoptimierte Düngestrategien sowie geänderte Preisanreize können dabei einen entscheidenden Beitrag zur weiteren Erhöhung und Erschließung der THG-Minderungspotenziale im Ackerbau leisten.

4.2.2 Optimierung des Potenzials von Halbzwergen beim Roggen für die Steigerung der Klimaschutzleistung von Getreidefruchtfolgen (PRoKlima)

Das Projekt **PRoKlima** zielte auf die Optimierung des Potenzials von sogenannten Halbzwergen beim Roggen für den Klimaschutz. Dies erfolgte durch gezielte Züchtung von Kurzstroh-Populationsroggen und weitere züchterische Innovationen, durch die Bewertung des Wurzelwachstums von Kurz- vs. Langstrohroggen unter divergenten Bodenfeuchtebedingungen, sowie durch die Modellierung und THG-Bilanzierung von Roggen. Insbesondere die so verbesserte Lagertoleranz bzw. Standfestigkeit von Roggen auch bei Starkniederschlägen, Hagel- und Sturmereignissen bietet einen wichtigen Beitrag zur Ressourceneffizienz und entsprechende THG-Minderungspotenziale. Zudem ist eine durch die Züchtungsarbeit verbesserte Stickstoffnutzungseffizienz (NUE) ein zentraler Hebel zur Reduktion der Lachgasemissionen (N_2O) in Getreidefruchtfolgen. Die Analysen im Projekt zeigten, dass Roggen knapp eine Tonne CO_2e geringere THG-Emissionen pro Hektar verursacht als Weizen. Die Hauptgründe hierfür liegen vor allem im geringeren Stickstoffbedarf von Roggen. Zudem bietet das extensive Wurzelsystem von Roggen vs. Weizen und die entsprechend stärkere Partitionierung von kohlenstoffhaltigen Assimilaten in den Wurzelraum höhere Kohlenstoffsequestrierungspotenziale durch Anbau von Roggen gegenüber Weizen und anderen Getreidearten.

<u>Potenziell erzielbare THG-Einsparung:</u> Durch die entwickelten züchterischen und züchtungsforschungs-spezifischen Innovationen zur Erhöhung der Lagertoleranz von Roggen sowie durch neue Einblicke zum klimaschonenden Anbau von Roggen unter Trockenstress trägt das Projekt mittel- bis langfristig zum Klimaschutz im Getreideanbau bei. Die im Durchschnitt um knapp eine Tonne pro Hektar geringeren THG-Emissionen von Roggen im Vergleich zu Weizen bieten grundsätzlich ein großes THG-Minderungspotenzial für den deutschen Getreideanbau. Eine mögliche Substitution von 10.000 ha Weizen durch Roggen würde einer THG-Minderung von knapp 10.000 t CO_2e pro Jahr entsprechen, eine mögliche Substitution von 100.000 ha entsprechend knapp 100.000 t CO_2-Einsparung pro Jahr. Aufgrund der anhaltend hohen Nachfrage nach Weizen, sowohl auf den internationalen Märkten, als auch im heimischen Backwaren- und Futtermittelmarkt, ist mit einer solchen Substitution jedoch kurzfristig nicht zu rechnen. Eine bessere kommunikative Nutzung des Klimaschutzvorteils von heimischem Roggen gegenüber Weizen in der Vermarktung regionaler Roggenprodukte könnte mittelfristig dazu beitragen die Klimaschutzvorteile von Roggen, insbesondere Roggenhalbzwergen, besser zu erschließen.

4.2.3 Stickstoff (N) optimierter Raps zur Reduktion der Treibhausgasemissionen (NORA)

Auch in der Rapszüchtung werden im Rahmen des **NORA**-Projektes Anstrengungen unternommen, die NUE zu verbessern. Hier werden jedoch dezidiert unterschiedliche Managementbedingungen mitbetrachtet. So wurden Neuzüchtungen von Hybridraps bei unterschiedlichen Stickstoffdüngungsstufen angebaut, einschließlich eines Stickstoffsteigerungsversuch mit 5 Düngestufen zwischen 80 - 240 kg N/ha. Getestet wurde auch ein auf Drohnen gestütztes Monitoring von Feldversuchen an mehreren Standorten mit großer Anzahl von Testgenotypen zur Vorhersage von Biomasse und N-Gehalt. Auf Basis der erhobenen Daten wurden korrigierte Mittelwerte und die Heritabilität für jede Kombination von Genotyp, N-Stufe und Standort berechnet. Zusätzlich wurde das Erntegut mittels Nah-Infrarot-Spektrometrie (NIRS) analysiert, um den Protein- und Ölgehalt der Samen jedes Genotyps zu bestimmen. Die so gewonnen Informationen sind Grundlage für eine Modell-basierte THG-Bilanzierung von Raps unter Berücksichtigung der Düngeintensität. Es bestehen jedoch Unsicherheiten bezüglich möglicher Anbauverbreitung verbesserter Rapsgenetik in der Praxis.

<u>Potenziell erzielbare THG-Einsparung:</u> Eine Reduktion der N_2O-Emissionen durch N-effizienteren Hybridraps mit stabilen Erträgen bei hohen Protein- und Ölgehalten ist auch bei reduzierter N- Düngung möglich. Dabei sind Produktivitätssteigerung und Klimaschutz in Einklang zu bringen. Die Rapsanbaufläche in Deutschland betrug 2024 rund 1,09 Mio. ha. Im Projekt wurde ermittelt, dass der Züchtungsfortschritt zu einer Reduktion des CO_2-

Fußabdrucks von Raps um jährlich etwa 1 % beigetragen hat. Dieser züchterische Fortschritt wurde jedoch durch zunehmend ungünstige Witterungsbedingungen im Klimawandel und veränderte Bewirtschaftungspraktiken teilweise wieder aufgehoben. Bei einer fortwährenden Förderung von Züchtungsforschung von Raps, wie dem NORA-Projekt, ist auch zukünftig mit einer weiteren Reduktion im CO_2-Fußabdruck von Raps durch Züchtungsfortschritt zu rechnen. Der Zeithorizont ist mittel- bis langfristig.

4.2.4 Identifikation zukünftiger züchterischer Potenziale für mehr Klimaschutz in der Pflanzenproduktion (KlimZucht)

Die Züchtungsforschung und Züchtung verbesserter Sorten hat einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Ertragsleistung und Krankheitsresistenzen geleistet, und so substantiell zur Erhöhung der Produktivität im Ackerbau über die vergangenen Jahrzehnte beigetragen. Inwieweit verbesserte Sorten auch helfen THG-Emissionen zu mindern, ist bisher wenig erforscht. Daher zielte **KlimZucht** auf die Bewertung des Beitrags des Zuchtfortschritts zur Reduzierung des CO_2-Fußabdrucks der Pflanzenproduktion in Deutschland und zur Bewertung weiterer züchterischer Potenziale ab. Basierend auf deutschlandweiten Langzeit-Versuchsdaten des Bundessortenamts wurden die THG-Emissionen pro Hektar und pro kg Erntegut mittels partieller Lebenszyklusanalyse seit den 1980er Jahren bewertet. Eine umfassende Unsicherheitsanalyse des deutschen Weizen-CO_2-Fußabdrucks zeigte, dass die Methode zur Abschätzung der N_2O-Emissionen, d. h., IPCC Tier 1 (IPCC, 2019, IPCC, 2006), Tier 2 (IPCC, 2019, IPCC, 2006, Mathivanan et al., 2021) und der N-Bilanz-Methode (Eagle et al., 2020) die größte Unsicherheitsquelle darstellt. Die Emissionen nach Tier 1 lagen am höchsten, gefolgt von Tier 2 und der N-Bilanz-Methode mit den niedrigsten Emissionen. Weiterhin zeigte sich, dass die Emissionen bei höheren Erträgen bei Tier 1 und 2 ansteigen, während sie bei NB abnahmen. Gleichzeitig stiegen die Emissionen bei Tier 1 und 2 mit steigendem N-Input stark an, während der Anstieg bei NB wesentlich geringer ausfiel. Während NB eine bessere Stickstoffeffizienz bei gleichbleibendem N-Input und steigenden Erträgen in geringere Verluste und N_2O-Emissionen übersetzt, ist dies bei den einfachen Tier 1 und 2 Ansätzen nur bedingt möglich. Dass die gängigen Tier 1 und 2 Ansätze verbesserte NUE durch steigende Erträge bei gleichbleibendem N-Input nicht umfassend berücksichtigen, stellt eine Herausforderung bei der Bewertung und Weiterentwicklung klimaintelligenter Anbaustrategien dar. Hierbei ist anzumerken, dass in der deutschen Emissionsberichterstattung einer positiven Entwicklung der NUE durch die Berechnung gasförmiger Verluste, der Höhe der N-Flächenbilanz und der N-Auswaschung und damit der verringerten indirekten N_2O-Emissionen Rechnung getragen wird.

<u>Potenziell erzielbare THG-Einsparung:</u> Bei Produktionsmengen von rund 2 Mio. t (Triticale), 9 Mio. t (Wintergerste) und 20 Mio. t (Winterweizen) hat der Züchtungsfortschritt in den letzten Jahrzehnten zu einer THG-Minderung von jährlich ca. 5.000, 16.000 und 25.700 t CO_2e pro Jahr geführt. Bei Aufrechterhaltung des Zuchtfortschritts durch Förderung der Züchtungsforschung, struktureller Unterstützung der Züchtungsbranche und entsprechenden Innovationen kann man auch zukünftig von einem ähnlichen THG-Minderungspotenzial durch die Pflanzenzüchtung ausgehen. Zudem bietet ein möglichst regelmäßiger Wechsel von Sorten (z. B., Wechsel alle 1-3 Jahre) gegenüber einem längerfristigen Anbau derselben Sorte (z. B., Wechsel nur alle 5-8 Jahre) zusätzliches THG-Minderungspotenzial, da so der Alterungseffekt der Sorten, d. h. der Verlust von Resistenzen, in der landwirtschaftlichen Praxis nicht wirksam wird. Dies ist besonders vor dem Hintergrund der Reduktionsziele im Pflanzenschutz von zunehmender Klimaschutzrelevanz. Bei vollständigem Verzicht auf Fungizide entspräche ein jährlicher versus einem Sortenwechsel nach fünf Jahren einer jährlichen THG-Minderung von ca. 25.000, 26.000 und 109.000 t CO_2e in Triticale, Wintergerste und Winterweizen.

4.3 Humuserhalt und -aufbau in Ackerland

Beim Humuserhalt und -aufbau in Ackerland stehen der Ausbau der Kohlenstoffsenken durch verstärkten Einbau von Kohlenstoff in Pflanzen und die C-Speicherung im Boden im Vordergrund. Böden sind die größten terrestrischen Speicher für organischen Kohlenstoff, wobei der Kohlenstoffanteil im Humus ca. 58 % beträgt. Landwirtschaftliche Aktivitäten beeinflussen den Humusgehalt und damit die Funktion der Böden als Senke für CO_2. Während Dauerhumus recht stabil ist, kann Nährhumus direkt durch Bewirtschaftungsmaßnahmen (z.B. Bodenbedeckung, Fruchtartwahl) positiv wie negativ beeinflusst werden. In Deutschland sind in mineralischen Ackerböden im Mittel 61 t CO_2 pro Hektar im Oberboden (0-30 cm) gespeichert (BMEL, 2018). Ackerböden in

Deutschland sind heutzutage eine THG-Quelle: in der Landnutzungskategorie Ackerland betrugen die THG-Gesamtemissionen im letzten Berichtsjahr 20,1 Mio. t CO_2e (UBA, 2025a). Davon stammen 47 % von ackerbaulich genutzten organischen Böden und 45 % von Mineralböden, letztere hauptsächlich infolge von Grünlandumbruch. Die verbleibenden 7 % sind aus der Biomasse freiwerdendes CO_2 (UBA, 2025d). Durch gezielte Maßnahmen gilt es, den mit diesen THG-Emissionen einhergehenden Humusabbau zu stoppen und sofern möglich umzukehren, so dass (wieder) vermehrt Humus auf Ackerstandstandorten aufgebaut wird. Ziel ist es, dass mehr Kohlenstoff in den Ackerboden eingebracht wird und auch dort verbleibt und nicht in Form von CO_2 entweicht. Fünf RessortForschtKlima-Projekte befassten sich mit Ansätzen, die „Ackerland als Kohlenstoffsenke durch Förderung von Durchwurzelung" zugeordnet werden können, verbunden mit dem Ziel einer Stärkung des C-Einbaus in Pflanzen und der C-Speicherung im Boden. Zu berücksichtigen ist, dass sich die Datengrundlagen und Methoden zur Abbildung von Änderungen der Bodenkohlenstoffvorräte in Ackerböden in der THG-Berichterstattung derzeit im Aufbau befinden. Bisher gehen deshalb auch nicht alle Maßnahmen, die die Erhöhung der Kohlenstoff-speicherung in mineralischen Böden zum Ziel haben, in den Projektionsbericht ein (WBNK, 2025, S.25). Betrachtet man die potenzielle Humusleistung der fünf zu diesem Themenkomplex gehörenden Projekte, so ist diese bei Hecken am höchsten und auch am dauerhaftesten, gefolgt von mehrjährigem Getreide und einer angepassten mehrjährigen Fruchtfolge, während der Wechsel von Mais zu Sorghum - beides einjährige Kulturen - sowie der Anbau von wurzelstarkem Getreide langfristig eher zum Humuserhalt beiträgt.

4.3.1 Humusaufbau mit mehr Wurzeln (WurCel)

Da Wurzeln sehr viel stärker zum Humusaufbau beitragen als oberirdische Pflanzenteile, wirkt sich deren Steigerung positiv auf die THG-Bilanz aus. Hier ist es wichtig, dass die Züchtung zur Steigerung der unterirdischen Biomasse ansetzt. Im Rahmen des **WurCel**-Projektes wurden Zwischenfrüchte und Hauptkulturen mit besonders intensiver Durchwurzelung identifiziert. Dabei wurde der Einfluss des Managements (Aussaatzeitpunkt, Düngung, Sorte) auf die Wurzelbiomasse berücksichtigt. Bei Zwischenfrüchten ist besonderes ein früher Aussaatzeitpunkt entscheidend. Neben Auswirkungen auf den Ertrag kann reduzierte Düngung auch Einfluss auf die Wurzelbiomasse haben, hierzu wurden ebenfalls Versuche durchgeführt. Es wurde ein FACE-Experiment durchgeführt, bei dem Pflanzen unter erhöhtem CO_2-Gehalt wachsen, um den Anstieg durch den Klimawandel zu simulieren. Dabei wurde teilweise vermehrtes Wurzelwachstum unter erhöhten CO_2-Gehalten beobachtet, v.a. in den oberen Bodenschichten. Zusätzlich wurden im Projekt neue Methoden zur verbesserten und schnelleren Bewertung des Wurzelwachstums entwickelt.

<u>Potenziell erzielbare THG-Einsparung:</u> Verstärkte C-Sequestrierung im Boden durch intensivere Durchwurzelung (Wurzelmasse und deren Verteilung) dank Selektion von stark wurzelndem Hauptkulturen und Zwischenfrüchten ist möglich. Zusätzliche kann eine bessere Durchwurzelung des Bodens auch eine Klimaanpassung an Trockenheit darstellen. Der Klimaschutzeffekt zusätzlicher Wurzeln liegt primär auf der Erhöhung der Kohlenstoffspeicherung in Ackerböden durch Arten- und Sortenwahl bzw. Züchtung Richtung mehr Wurzeln. Das managebare Potenzial Wurzelbiomassen im Ackerbau zu erhöhen (oder auch zu reduzieren) liegt kurzfristig bei ca. 10 %. Größere Potenziale könnten langfristig realisiert werden. Eine 10-prozentige Erhöhung der durchschnittlichen Wurzelbio-masse in deutschen Ackerböden und der damit einhergehende zusätzliche C-Eintrag in Böden führt zu einem Bodenkohlenstoffaufbau, der einer C-Bindung von 1,3 bis 3,5 Mio. t CO_2 jährlich entspricht. Dieses Potenzial besteht über einen Zeithorizont von 30 Jahren, bis ein neues Fließgleichgewicht erreicht ist. Durch geeignete Wahl der Zwischenfrüchte und Management lässt sich recht kurzfristig die Kohlenstoffspeicherung verbessern, gute Durchwurzelung sind bereits ein Zucht- und Auswahlkriterium bei Zwischenfrüchten. Bei Getreide über-wiegen aktuell (noch) andere Kriterien bei der Sortenwahl, so dass zusätzliche Effekte mittel- bis langfristig erwartbar sind.

4.3.2 Evaluation des Potenzials eines perennierenden Getreideanbaus für die Kohlenstoffspeicherung (KlimaGetreide)

Beim Projekt **KlimaGetreide** liegt der Fokus auf perennierendem Getreide. Dies ist Getreide, das nicht mit Kornreife abstirbt, sondern mehrjährig ist, was sich positiv auf die Ausbildung unterirdischer Biomasse auswirkt. Angebaut wird Kernza®, ein mehrjähriger Weizen der ursprünglich aus den USA stammt sowie einjähriger Weizen

als Referenz. Der Anbau erfolgte teilweise als Mischung mit Esparsette als Stickstofflieferant. Anhand von Bodenproben wurde das Wurzelwachstum untersucht. Um auch künftig Versuche mit mehrjährigem Getreide durchführen zu können, erfolgte zudem der Aufbau einer Saatgutvermehrungsanlage für mehrjährigen P-Weizen (Triticum aestivum x Thinopyrum intermedium) sowie die Vermehrung von Kernza®. Beim perennierenden Getreide wurde zudem ein geringerer Krankheitsdruck als bei der Referenzsorte festgestellt. Durch Mehrjährigkeit und die hohe Wurzelbiomasse soll dauerhaft Kohlenstoff im Boden gebunden werden. Inwieweit dies gelingt wird sehr davon abhängig sein, ob künftig ein kommerzieller Anbau erfolgt.

Potenziell erzielbare THG-Einsparung: Verstärkte C-Sequestrierung beim Anbau von perennierendem Getreide durch größere Wurzelmasse, tiefere Durchwurzelung und mehrjährige Bodenruhe fördert den Humusaufbau. Der dauerhafte Charakter erlaubt den Aufbau eines weit-verzweigten Netzwerks an Mykorrhiza-Pilzen, wodurch weitere Kohlenstoffeinträge in den Boden ermöglicht werden. Neben dieser aktiven Kohlenstoff-Speicherung kommt es durch den verringerten maschinellen Arbeitsaufwand zu einer Minderung der CO_2-Emissionen. Aktuell gibt es für dieses Getreide jedoch keinen Markt in Deutschland, so dass von einem langfristigen Zeithorizont ausgegangen werden muss, ehe es zu THG-Einsparungen durch mehrjähriges Getreide kommt.

4.3.3 Vermehrte Humusreproduktion durch den Anbau von Sorghum in Deutschland als aktiver Beitrag zum Klimaschutz (SORGHUM)

Die wärmeliebende C4-Pflanze Sorghum soll durch züchterische Selektion kälteresistenter werden und so künftig alternativ zu Silomais angebaut werden können. Im Rahmen des **SORGHUM**-Projektes wurden daher kältestresstolerante und standortoptimierte Sorghum-Genotypen identifiziert. Es wurden an unterschiedlichen Standorten Feldversuche mit ausgewählten Sorghumhybriden zur Ertragsprüfung und Untersuchung der Kühletoleranz in der Jugendentwicklung/Kornansatzphase durchgeführt. Kommerziell verfügbare Sorghum- und Maissorten dienten als Referenz. Auch hier wurden Wurzelproben genommen, um zu untersuchen inwieweit die für Sorghum typisch deutlich stärkere Durchwurzelung im Vergleich zu Mais (Hostetler et al., 2024) zur Humusanreicherung beitragen kann. Zudem wurde das Agrarökosystemmodell DSSAT für Sorghum parametrisiert und zur Bewertung des CO_2-Fußabdrucks des Sorghumanbaus eingesetzt. Dabei wurden Wechselwirkungen zwischen Genotyp, Umwelt und Management (G×E×M) berücksichtigt, um das Klimaschutzpotenzial durch den Sorghumanbau umfassend zu analysieren. Erste Modellierungen zeigen, dass die kühletoleranteren und ertragreicheren Sorghumhybriden einen geringeren CO_2-Fußabdruck als die Referenzkulturen haben. Bezüglich einer möglichen Ausweitung des Anbaus und dem damit verbundenen Zeithorizont bestehen noch Unsicherheiten, weshalb die Wirksamkeit bezüglich der THG-Minderung aktuell schwer einzuschätzen ist.

Potenziell erzielbare THG-Einsparung: Sorghum ist eine vielversprechende alternative Kulturpflanze für Regionen, die zu Dürre und suboptimalen Bodenbedingungen neigen und weist ein im Vergleich zu Mais tieferes Wurzelsystem auf. Sie besitzt die Fähigkeit, unter ungünstigen Bedingungen einen stabilen Ertrag zu erzielen und gleichzeitig einen geringeren CO_2-Fußabdruck als Mais zu haben, indem sie beispielsweise weniger Düngemittel als Mais benötigt. Der Anbau von Sorghum unterstützt somit den Übergang zu einem nachhaltigeren, emissionsärmeren Agrarsystem. Dieses Potenzial lässt sich jedoch erst dann effektiv ausschöpfen, wenn Sorghum Mais zumindest teilweise ersetzt.

4.3.4 Erschließung von Klimaschutzpotenzialen durch verbesserte Fruchtfolgegestaltung (KlimaFFolgen)

Im Projekt **KlimaFFolgen** stand die Bewertung und Erschließung der Klimaschutzpotenziale durch verbesserte klimaoptimierte Fruchtfolgen im Vordergrund (Attia et al. 2024). Neben einer regionalen und einer deutschlandweiten Potenzialanalyse wurde im Projekt ein Entscheidungsunterstützungssystem (EUS) für klimaschonende Fruchtfolgen entwickelt, das prozessbasierte Boden-Pflanze-Atmosphärensystem-Modelle mit Ökobilanzierung koppelt, um eine möglichst ganzheitliche Bewertung von Anbau und Fruchtfolgen zu ermöglichen und bessere Entscheidungen zu unterstützen. Die gewonnenen Erkenntnisse zum THG-Minderungspotenzial durch verbesserte Fruchtfolgen und das entwickelte Fruchtfolge-EUS tragen mittel- bis langfristig zum Klimaschutz bei, wobei entscheidend ist, wie das EUS tatsächlich von der Praxis genutzt wird.

Potenziell erzielbare THG-Einsparung: Die regionale und deutschlandweite Potenzialanalyse zeigen, dass verbesserte Fruchtfolgen erhebliche Klimaschutzpotenziale mit sich bringen. Während die N_2O-Emissionen nur in sehr begrenztem Maß durch die Fruchtfolgegestaltung reduziert werden können, zeigen verbesserte Fruchtfolgen mit vermehrtem Zwischenfruchtanbau substantielle zusätzliche Kohlenstoffspeicherpotenziale von mehreren Tonnen pro Hektar. Bei 11,7 Mio. Hektar Ackerfläche in Deutschland kann dies einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Die Effekte stellen sich jedoch nur mittel- bis langfristig ein und es kommt zu einer Sättigung im Speicherpotenzial. Die Realisierung verbesserter Fruchtfolgen hängt zudem maßgeblich davon ab, inwieweit die Marktsituation sowie die regulatorischen und förderpolitischen Rahmenbedingungen eine Optimierung von Fruchtfolgen hin zu mehr Klimaschutz ermöglichen.

4.3.5 Kohlenstoffsequestrierung in Hecken und Feldgehölzen (CatchHedge)

Das fünfte zu diesem Themenfeld gehörende Projekt ist das Verbundvorhaben **CatchHedge.** Das Projekt verfolgte das Ziel, mehr Hecken in der Agrarlandschaft zu etablieren und deren Potenzial zur THG-Minderung zu ermitteln. Hecken können viel Kohlenstoff speichern, sowohl in ihrer ober- wie auch unterirdischen Biomasse, und tragen durch Wurzeln und Streu zu einer (lokalen) Humusakkumulation bei. Die gesamte Heckenfläche in Deutschland beträgt aktuell etwa 4080 km². Pro Hektar speichern Hecken etwa 231 t Kohlenstoff, was vergleichbar mit der Speicherleistung von Wald ist. Daraus ergibt sich eine gesamte, einmalige Kohlenstoffspeicherleistung von 94 Mio. t C. Würde man alle Hecken entfernen und die Fläche ackerbaulich nutzen, wären auf der gleichen Fläche insgesamt 56 Mio. t C weniger gebunden. Neben einer Inventarisierung der Hecken Deutschlands unter Nutzung von Fernerkundungsdaten galt es, geeignete Standorte für Neuanpflanzungen zu identifizieren. Aber auch rechtliche und förderpolitische Aspekte (Schütze et al. 2024), das Management bei Pflanzung und Pflege und Verwertungsmöglichkeiten des Aufwuchses wurden vor dem Hintergrund THG- und Biodiversitäts-optimierter Hecken untersucht. Eine Besonderheit ist die Anlage einer Hecke auf dem Thünen-Standort Trenthorst von 2400 m Länge mit verschiedenen Gehölzpflanzen. Neben einer positiven Klimawirkung sind Hecken auch wichtig für die Förderung der Biodiversität, zudem können sie zur Vermeidung von Erosion beitragen und sich positiv auf den lokalen Wasserhaushalt auswirken. Damit Neuanpflanzungen in größerem Umfang erfolgen und die damit einhergehende Senkenwirkung auch eintritt, sind teilweise ordnungsrechtliche Anpassungen erforderlich. Daneben muss eine ausreichende finanzielle Ausstattung und flächendeckende Verfügbarkeit von Förderprogrammen für die Umsetzung vorhanden sein.

Potenziell erzielbare THG-Einsparung: Die C-Sequestrierung erfolgt durch langjährige Kohlenstoffakkumulation in Hecken. Bei einer Ausschöpfung des ermittelten maximalen Potenzials für neue Hecken könnten in Abhängigkeit der Heckenbreite von 10 (± 2) m einmalig 229 (± 46) Mio. t C, bzw. bei einer Pflanzung nur in den ermittelten Priorisierungsgebieten 45 (± 9) Mio. t C gespeichert werden. Das entspricht einer Höhe von 100 (± 20) % (Maximalszenario) bzw. 20 (± 4) % (Priorisierungsgebiete) des deutschen LULUCF-Senkenziels für 2030. Eine kurz- bis mittelfristige Erhöhung des Heckenbestands in Deutschland ist möglich. Dem stehen jedoch teilweise rechtliche Regelungen sowie die zumeist fehlende ausreichende finanzielle Ausstattung und flächendeckende Verfügbarkeit von einfach zu beantragenden Förderprogrammen entgegen.

4.4 Emissionsreduktion entlang der Wertschöpfungskette, einschließlich Ernährungsverhalten

Damit Landwirtschaft und Ernährung einen Beitrag zu mehr Klimaschutz leisten können, ist es unerlässlich, die gesamte Lebensmittelkette zu betrachten. Dies umfasst die landwirtschaftliche Produktion bis zum Verzehr, einschließlich der Vermeidung und Verwertung von Lebensmittelabfällen. Besonders bedeutend ist hierbei die Ebene der Verbraucherinnen und Verbraucher und die nachhaltige Gestaltung von Ernährungsweisen. Das Ernährungssystem ist national für ca. 25 % (WBAE, 2020, S. 357) der THG-Emissionen verantwortlich. Damit kommt der Ernährung ein erheblicher Anteil zu und das Reduktionspotenzial ist groß. Laut UBA-CO_2-Rechner verursacht die Ernährung in Deutschland 1,75 t CO_2e pro Kopf und Jahr, bei gesamten Emissionen in Höhe von 10,41 t CO_2e pro Kopf und Jahr im deutschen Durchschnitt (UBA, 2025e). Zentrale Hebel, um über das Ernährungsverhalten Emissionen zu senken, ist der Verzehr von pflanzlichem anstelle von tierischem Eiweiß. So hat die Eiweißpflanzenstrategie zur Aufgabe, zum Erreichen der Klimaschutzziele beizutragen (BMEL, 2024b). Dies schließt damit einhergehende und notwendige Änderungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette mit

ein. Durch eine vegetarische Ernährungsweise könnten 20 % bis 47 %, durch eine vegane Ernährungsweise 38 % bis 52 % an THG-Emissionen eingespart werden, im Vergleich zu einer durchschnittlichen Ernährungsweise (UBA, 2024).

Im Themenfeld wurde ein breites Spektrum an Aspekten mit sehr verschiedenen Zielgruppen behandelt: Treibhausgasreduktion durch neue Ansätze in Züchtung unter Berücksichtigung der Nachfrage nach pflanzenbasierter Ernährung, Bewertung von $C0_2$-Fußabdrücken vom Anbau bis zum Verbraucher am Beispiel Wein, alternative Getreidelagerung für Klimaschutz, soziale Wirkungen von Ernährung und klimafreundliches Ernährungsverhalten. Bei diesem Themenfeld sind sozio-ökonomische Untersuchungen ein zentraler Aspekt in allen Projekten.

4.4.1 Treibhausgasreduktion durch innovative Züchtungsfortschritte bei alternativen pflanzlichen Proteinquellen (TRIP)

Die Substitution von Milch- und Fleischprodukten durch heimische pflanzliche Proteine bietet ein großes Klimaschutzpotenzial im Agrar- und Ernährungssektor. Verbesserte Sorten sowie optimierter Anbau und Verarbeitung pflanzlicher Proteine können dabei helfen zusätzliche THG-Minderungspotenziale zu erschließen. Daher zielte das Projekt **TRIP** zum einen auf die züchterische Verbesserung von Hafer (*Avena sativa*), insbesondere bezüglich Proteingehalt und Pilzresistenz ab. Zum anderen stand die Entwicklung moderner Genom-Editing-Methoden zur Erweiterung des genetischen Potenzials von Hafer und Lupine (*Lupinus* sp.) sowie zur Reduktion von Allergenen im Fokus. Außerdem erfolgten die Bewertung und Verbesserung der Klimawirkung vom Anbau bis zum fertigen Hafer- und Lupinenprodukt sowie die Analyse internationaler Handelsfolgen von Hafer- und Lupinendrinks. Umfängliche Analysen des Hafer- und Lupinenanbaus zeigten für Lupine durchschnittliche THG-Emissionen von 0,15 kg CO_2-Äq pro kg Korn und von 1,6 kg CO_2-Äq pro kg Protein, und für Hafer von 0,16 kg CO_2-Äq pro kg Korn sowie 3,0 kg CO_2-Äq pro kg Protein, wobei insbesondere der Hafer große Unterschiede zwischen Standorten und Jahren aufweist. Im Vergleich weist Weizen THG-Emissionen von 0,35 CO_2-Äq pro kg Korn auf (Riedesel et al., 2022). Die Analyse entlang der Wertschöpfungskette zeigte für Haferdrink Emissionen von ca. 0,2 kg CO_2e pro Liter und für Lupinentempeh von ca. 0,4 kg CO_2e pro kg. Durch Integration von Daten zu Milch- und Fleischalternativen in das CAPRI Modell wurde es möglich, verschiedene Ernährungsszenarien für Deutschland zu berechnen, wobei die Substitutionsraten für die erreichbare THG-Minderung von zentraler Bedeutung sind.

<u>Potenziell erzielbare THG-Einsparung:</u> Das Projekt trägt mittel- bis langfristig durch die entwickelten züchterischen und züchtungsforschungsspezifischen Innovationen, durch neue Erkenntnisse zu klimaschonendem Anbau von Hafer und Lupine, sowie zum Konsum heimischer Milch- und Fleischersatzprodukte zum Klimaschutz bei. Im Hinblick auf die THG-Minderungspotenziale würde eine Substitution von Kuhmilch durch Haferdrinks pro Jahr ca. 275.000 t CO_2e pro Jahr (bei 10 % Substitution) bzw. ca. 550.000 t CO_2e pro Jahr (bei 20 % Substitution) in Deutschland entsprechen. Eine Reduktion des CO_2-Fußabdrucks (PCF) von Hafer durch verbesserte Sorten und verbesserten Anbau würde zudem eine Reduktion der THG-Emissionen um 25.000 t CO_2e pro Jahr (bei 10 % PCF-Reduktion) bzw. 50.000 t CO_2e pro Jahr (bei 20 % PCF-Reduktion) in Deutschland ermöglichen.

Zusätzliche Klimaschutzpotenziale ergeben sich durch den optimierten Anbau verbesserter Lupinensorten und die Ausweitung des Anbaus gegenüber Nicht-Leguminosen, sowie durch die Substitution von Fleisch durch heimische pflanzenbasierte Fleischersatzprodukte. Durch Einführung eines verbindlichen CO_2-Kennzeichnungslabels könnten die klimaschutzrelevanten Vorteile der pflanzlichen Erzeugnisse für Verbraucherinnen und Verbraucher leichter erkennbar gemacht werden und so zur besseren Erschließung der Klimaschutzpotenziale durch pflanzenbasierte Proteine beitragen.

4.4.2 Klimagerechte Ernährung aus der Perspektive von Verbrauchern und Gesellschaft (ENKL)

Das Projekt **ENKL** beschäftigte sich mit der sozialen Dimension einer nachhaltigen Ernährung sowie der Förderung einer klimafreundlichen Ernährung im Alltag von Verbraucherinnen und Verbrauchern. Über Recherchen, Workshops und Interviews wurden Erkenntnisse zu sozialer Nachhaltigkeit in der Lebensmittelproduktion und -verarbeitung sowie beim Endverbrauch gewonnen und notwendige Handlungsbedarfe zur Stärkung der sozialen

Dimension identifiziert. Weiterhin wurden durch Einzelinterviews und Gruppendiskussionen, mehrwöchige Experimente und Umsetzungstagebücher sowie eine deutschlandweite Online-Befragung mögliche Handlungsoptionen zur Förderung eines klimafreundlichen Ernährungsverhaltens erarbeitet.

Potenziell erzielbare THG-Einsparung: Veränderungen im Ernährungsverhalten und entsprechend in den Agrar- und Ernährungssystemen werden Jahrzehnte in Anspruch nehmen. Die zentrale Voraussetzung für eine klimafreundliche Ernährung ist die Beseitigung von Hürden in den Ernährungsumgebungen von Verbraucherinnen und Verbraucher und die Schaffung förderlicher Rahmenbedingungen. Erfolgreiche Kommunikation kann diese Handlungsfelder sinnvoll ergänzen. Die Berücksichtigung der sozialen Dimension ist dabei in verschiedener Hinsicht ein notwendiger Faktor. Änderungen im Ernährungsverhalten sind tiefgreifende soziale Veränderungen, die Gewohnheiten und Traditionen betreffen. Die erfolgreiche Umsetzung einer Transformation hin zu mehr Nachhaltigkeit und Klimaschutz erfordert Transparenz und eine gerechte Verteilung von Chancen und Risiken sowie die Beteiligung verschiedener gesellschaftlicher Akteursgruppen, die von den Veränderungen betroffen oder daran beteiligt sind. Nur wenn soziale Faktoren und Prozesse ausreichend beachtet werden, lassen sich gesellschaftlicher Wandel realisieren und die genannten THG-Potenziale ausschöpfen.

4.4.3 Bewertung des CO_2-Fußabdrucks der Weinproduktion zur Erschließung zusätzlicher Klimaschutzpotenziale im Weinbau (CaberNET)

Das Projekt **CaberNet** hat in Zusammenarbeit mit 84 Weingütern und sieben Winzer-Genossenschaften mittels eines standardisierten Fragebogens detaillierte Daten erhoben, um den CO_2-Fußabdruck der deutschen Weinproduktion zu bewerten. Es wurden Möglichkeiten zur Verringerung der Treibhausgas (THG)-Emissionen identifiziert sowie Handlungsempfehlungen für den Weinbau erstellt. Die Analysen zeigen einen durchschnittlichen CO_2-Fußabdruck von 1,13 kg CO_2e je 0,75 l Flasche Wein. Betrachtet wurde die Weinproduktionskette von der Neuanlage eines Weinbergs über die Trauben- und Weinproduktion bis hin zur Abfüllung der fertigen Flasche Wein. Ergänzend erfolgten Untersuchungen zur Akzeptanz eines Mehrwegsystems bei Weinflaschen, da die THG-Emissionen der Einweg-Glasflasche einen substantiellen Anteil an der Gesamtklimawirkung einer Flasche Wein haben. Das höchste THG-Einsparpotenzial wird durch eine Kombination aus der Verwendung von Mehrwegflaschen sowie weinbaulichen Maßnahmen, beispielsweise der optimierten Materialauswahl des Drahtgerüsts und der Reduktion des Dieselverbrauchs erzielt. Neben den THG-Emissionen wurden weitere Umweltwirkungen untersucht.

Potenziell erzielbare THG-Einsparung: Verschiedene weinbauliche Maßnahmen weisen substantielle THG-Minderungspotenziale im Weinbau auf. So ermöglicht eine optimierte Materialwahl des Drahtgerüstes, etwa durch den Einsatz von Hartholzpfählen gegenüber imprägnierten Weichholzpfählen, Einsparungen von rund 20 % der deutschen Traubenproduktion, dies entspricht ca. 38.500 t CO_2e pro Jahr. Ebenso weist der ausschließliche Anbau pilzwiderstandsfähiger (PIWI)-Rebsorten ein Reduktionspotenzial von rund 16 % für die Traubenproduktion in Deutschland auf. Hierdurch könnte die Häufigkeit von Pflanzenschutzmittelanwendungen reduziert werden, was Emissionen aus Kraftstoffverbrauch und Pflanzenschutzmittelherstellung reduzieren und rund 30.600 t CO_2e pro Jahr einsparen könnte. Das größte THG-Minderungspotenzial ergibt sich durch die Verwendung von Mehrwegflaschen für deutschen Wein. Bereits bei acht Wiederverwendungen der Glasflasche könnten rund 30 % der CO_2-Emissionen einer Flasche Wein eingespart werden. Deutschlandweit könnten hierdurch schätzungsweise 344.000 t CO_2e pro Jahr eingespart werden. Darüber hinaus bieten weitere weinbauliche Maßnahmen zusätzliche Reduktionspotenziale.

4.4.4 Abwehr von Vorratsschädlingen in Deutschland (AVoiD)

Das Projekt **AvoiD** untersucht die hermetische Lagerung von Getreide unter Berücksichtigung des Auftretens von Lagerschädlingen sowohl im Feld als auch am Lagerstandort. Durch Sauerstoffentzug bei der Lagerung wird ein qualitätsmindernder Schädlingsbefall verhindert (Müller-Blenkle, Adler, 2024). Hierfür wurden mobile Siloschläuche getestet sowie Versuchssilos gebaut und mit Technik fürs Monitoring versehen. Relevante THG-Einsparungen können nur realisiert werden, wenn Lagerhalter von der wirtschaftlichen Vorteilhaftigkeit der hermetischen Lagerung überzeugt sind. Daher wurde zur Bewertung der Praktikabilität hermetischer Lager-

systeme eine ökonomische Analyse im Vergleich zu belüfteten Lagern durchgeführt, die zugunsten hermetischer Systeme ausfiel.

Potenziell erzielbare THG-Einsparung: Bei der Annahme, dass die Produktion von 1 t Weizen bis zum Hof rund 422 kg CO_2e verursacht, erhöhen sich bei einem Lagerverlust von 2 % bzw. 5 % die feldseitigen Emissionen um etwa 8 bzw. 21 kg CO_2 je Tonne (bei ausschließlicher Betrachtung der THG-Reduktionen beim Lagergut selbst). Bei 2 000 t Lagerkapazität entspricht dies 17 bzw. 42 t CO_2. Damit wird deutlich, dass selbst moderate Verluste messbar ins Gewicht fallen und hermetische Systeme substantielle Klimaschutzvorteile bieten. Die hermetische Getreidelagerung in Schläuchen ist kurzfristig umsetzbar (TRL 6, teilw. 8), die Errichtung stationärer hermetischer Silozellen ist mittel- bis langfristig umsetzbar. Neben der THG-Einsparung durch reduzierte Verluste, bieten hermetische Lagersysteme einen weiteren Vorteil, indem Pflanzenschutzmittel im Vorratsschutz eingespart werden können.

4.5 Klimaschutz durch Vernässung von Moorböden und Reduzierung der Torfnutzung

Moor- und weitere organische Böden (im Folgenden kurz „Moorböden“) sind unter wassergesättigten Bedingungen aus Resten torfbildender Pflanzen wie z. B. Torfmoosen entstanden. Torf ist aufgrund des sehr langsamen Wachstums eine endliche Ressource und wird vom Weltklimarat wie ein fossiler Rohstoff betrachtet. Bei drainierten Mooren geht der Torfkörper durch mikrobielle Zersetzung zu CO_2 verloren. Insgesamt wurde in 2023 aus entwässerten oder unzureichend vernässten Moorböden eine Emissionsmenge von gut 50 Mio. t CO_2e freigesetzt (davon CO_2: 44,5 Mio. t), das entspricht etwa 7 % der gesamten Treibhausgasemissionen in Deutschland (UBA, 2025d). Moorböden werden in Deutschland überwiegend landwirtschaftlich genutzt und werden deshalb in den Landnutzungskategorien Ackerland und Grünland (d.h. Wiesen, Weiden, Mähweiden) im Sektor LULUCF erfasst. Dort werden auch die Emissionen von Methan (CH_4) erfasst. Hinzu kommen die N_2O-Emissionen aus Moorböden des Sektors Landwirtschaft. Die höchsten Emissionen pro Flächeneinheit entstehen dabei auf entwässerten Ackerstandorten mit 40,4 t CO_2e pro Hektar und Jahr, gefolgt von Grünland mit 31,7 t CO_2e pro Hektar und Jahr (Tiemeyer et al., 2020). Insgesamt liegt der Anteil der landwirtschaftlich genutzten Standorte an den gesamten THG-Emissionen aus Mooren bei 83 %. Torfabbau findet in Deutschland noch auf ca. 10 000 ha statt. Ein Ende des Abbaus und der Verwendung von Torf für Substrate kann die Freisetzung von THG reduzieren.

Durch Wiedervernässung kann die CO_2-Freisetzung aus dem Torfkörper durch Mineralisierung vermindert oder gestoppt werden. Auch die N_2O-Emissionen gehen sehr stark zurück; dagegen wird verstärkt CH_4 freigesetzt. Sofern vernässte Flächen in der Landwirtschaft verbleiben sollen, ist eine geänderte landwirtschaftliche Nutzung nötig, z.B. in Form von Paludikultur oder eine Alternativnutzung z. B. für Moor-Photovoltaik. Vernässte Flächen können im Idealfall eine Kohlenstoff- oder sogar THG-Senke darstellen. Unter Idealbedingungen und in einer Initialphase von vier Jahren wurde für Paludikultur auf Niedermoor eine Senke von ca. 12 t CO_2e pro Hektar und Jahr und einem THG-Minderungspotenzial bei Umwandlung von Acker zu Paludikultur von bis zu 52 t CO_2e pro Hektar und Jahr festgestellt (Bockermann et al., 2025). Eine Transformation der derzeitigen Nutzung von Moorböden gelingt nur mit sozial akzeptierten und ökonomisch tragfähigen Konzepten für alternative Nutzungen. Die hier untersuchte Wirkkette zielt auf die Reduktion bzw. Vermeidung von Emissionen aus organischen Böden durch Nutzungsalternativen. Ein Projekt befasste sich mit Torfersatzstoffen, die beiden anderen fokussierten sich auf Vernässung organischer Böden und Nutzungsalternativen. Dabei zeigte sich, dass aus räumlich-rechtlicher Perspektive vergleichsweise einfach vernässbare Standorte teils ein geringeres THG-Einsparpotenzial aufweisen als solche unter intensiver landwirtschaftlicher Nutzung. Dies gilt es bei der Wirksamkeit dieser Maßnahme zu berücksichtigen (Koppensteiner et al., 2023).

4.5.1 Herstellung und Einsatz von Holzfaserstoffen als Torfersatzstoff (HoFaTo)

Im Projekt **HoFaTo** ging es um die Herstellung und Verwendung von Holzfasern als Torfersatz. Dabei wurde das zerfaserte Ausgangsmaterial mit Lignin angereichert, um die N-Immobilisierung zu reduzieren und so die Substrateignung zu verbessern. Es wurden Versuchsreihen zur Anreicherung von Lignin mit zusätzlichem Stickstoff sowie zur Anlagerung von Lignin an den Faserstoff durchgeführt, um so die Stickstoffversorgung von

Pflanzen aus dem Substrat zu verbessern (Coniglio et al., 2024). Wenn die Stabilisierung von Holzfasern gegenüber mikrobiellem Abbau gelingt (inklusive der erforderlichen Prozessanpassungen bei der Erzeugung der modifizierten Holzfasern), diese neuen Substrate die notwendigen Zulassungsvoraussetzungen erfüllen und die Produktionskosten gegenüber Torf-basierten Substraten nicht zu hoch sind, können diese einen beträchtlichen Beitrag zur THG-Minderung leisten. Die Emissionen aus der Torfgewinnung und -nutzung in Deutschland für das Jahr 2023 betrugen 2,4 Mio. t CO2e (UBA, 2025a, S.661). Bisher durchgeführte Ökobilanzvergleiche zwischen Torf und Holzfasern zeigten im Ergebnis Vorteile der Holzfasern, da der nachwachende Rohstoff immer als CO_2-neutral angenommen wurde und die Emissionen aus ihrem Abbau in Ökobilanzen daher nicht ausgewiesen wurden.

Potenziell erzielbare THG-Einsparung: Eine Erweiterung der Rohstoffbasis für die Holzfaserstofferzeugung auf bisher wenig genutzte Laubhölzer reduziert Nutzungskonkurrenzen beim Nadelholz. In Verbindung mit einer Stabilisierung der Fasern gegenüber mikrobiellem Abbau kann dies die Möglichkeiten erweitern, Torf in Pflanzsubstraten zu ersetzen. Eine Vermeidung des Torfabbaus, insbesondere in Kombination mit der Wiedervernässung von Moorflächen kann zu einer Minderung der THG-Emissionen beitragen. Bei dem direkten ökobilanziellen Vergleich von Holz und Torf im Substrat beeinflusst die unterschiedliche Behandlung der zeitlichen biogenen CO_2-Emissionen die Bewertung von Holz als Torfersatz. Holzfasern setzen beim Gebrauch ebenfalls CO_2 frei und benötigen eine energieintensive Herstellung. Daher ist die biogene Herkunft kein automatischer Vorteil. Es muss sichergestellt sein, dass das Holz aus nachhaltig bewirtschafteten Quellen stammt (Stichwort: Wald als CO_2-Netto Senke) und Verfügbarkeiten inklusive Nutzungskonkurrenzen beachtet werden. Die Ökobilanzierung als alleiniges Instrument kann daher nicht alle offenen Fragestellungen abbilden.

4.5.2 Roadmap zur Vernässung von organischen Böden (RoVer)

Das Projekt **RoVer** erstellte eine Roadmap für die Wiedervernässung von Moorböden in Deutschland. Auf Basis von vielfältigen Datenquellen wurden mit Hilfe von Modellen interdisziplinär die Rahmenbedingungen, das Potenzial und die Klimaschutzwirkung von alternativen Nutzungen wie Paludikultur, Moor-PV, Wasserstands-anhebung und Extensivierung oder naturschutzfachliche Aufwertung durch Nutzungsaufgabe und Restaurierung sowie der damit einhergehende Klimaschutz betrachtet. Untersuchungen zur räumlichen Verteilung der Nutzungsintensität von Moorböden in Deutschland und der Betroffenheit von auf Moorböden wirtschaftenden Landwirten erfolgten im Rahmen einer Status-Quo Analyse ebenso wie die ökonomische und rechtliche Bewertung von alternativen Nutzungskonzepten. Deutschlandweite Szenarien für vernässte Moorflächen mit variierenden Flächenanteilen der verschiedenen Landnutzungsoptionen wurden hinsichtlich THG-Minderungs-potenzial und Wirtschaftlichkeit analysiert. Wenn nur die Einkommensverluste berücksichtigt werden, liegen die Vermeidungskosten laut Berechnungen bei 8-60 €/t CO_2e, mit einer höheren Effizienz bei Vollvernässung und Restaurierung als bei Teilvernässung und Extensivierung.

Potenziell erzielbare THG-Einsparung: Die Reduktion der Emissionen, insbesondere CO_2, durch Vernässung von Moorböden, die aktuell landwirtschaftlich genutzt werden oder die zwar ungenutzt, aber zu trocken sind, hat ein bedeutendes Potenzial. Durch Änderung der Landnutzung auf Moorböden von entwässerungsbasierter Landwirtschaft hin zu nasser Nutzung oder Restaurierung lassen sich je nach Standort 20 bis 30 t CO_2e/ha p. a. bodenbürtiger Emissionen im LULUCF-Sektor einsparen. Bei einer Flächenkulisse von 1,6 Mio. ha (Moorböden im Offenland ohne Siedlung) ergibt sich damit ein herausragendes Einsparpotenzial, dessen Ausnutzung von der Ausgestaltung der analysierten Handlungsoptionen abhängt. Damit dieses Potenzial auch realisiert werden kann, muss ein gesamtgesellschaftlicher Konsens bestehen und die Belastungen für die Betroffenen müssen hinreichend berücksichtigt werden. Dies muss durch ökonomisch tragfähige Landnutzungsalternativen und ein integriertes Governance-System, das neben Förderung für alternative Nutzungen wie Paludikulturen oder Moor-PV auch rechtliche Anpassungen und den Aufbau angepasster Strukturen beinhaltet, unterstützt werden. Nur so kann es gelingen, in den nächsten Jahren größere Flächeneinheiten zu vernässen.

4.5.3 Ökonomische und ökologische Potenziale von Paludikulturen auf wiedervernässten Moorstandorten zum Klimaschutz (MOCOR)

Im Projekt **MOCOR** wurden im Rahmen einer Potenzialflächenanalyse wurden kurz- und mittelfristig für die Wiedervernässung und für die Nutzung durch Paludikultur geeignete landwirtschaftlich genutzte Moorböden identifiziert und das THG-Minderungspotenzial einer nassen Bewirtschaftung mit Schilf und Rohrkolben bestimmt. Parallel dazu wurden Wertschöpfungsketten analysiert, die auf Paludikultur basieren. Ein besonderer Fokus lag dabei auf dem Anbau und der Nutzung von Schilf und Rohrkolben als Rohstoffe für die Baustoffproduktion. Berücksichtigt wurden alle relevanten Wertschöpfungsstufen von der landwirtschaftlichen Produktion über die Baustoffherstellung und den Handel bis hin zur Nutzung, Wiederverwendung und Entsorgung. Ergänzend zur Abschätzung geeigneter Standorte in Deutschland erfolgte eine umfassende Datenerhebung zu verschiedenen Paludikulturen, einschließlich Erträgen, Qualitäten und Marktpreisen als Grundlage für modellgestützter Analysen.

Potenziell erzielbare THG-Einsparung: Durch die Etablierung von Paludikultur-Wertschöpfungsketten können erhebliche Mengen an THG-Emissionen eingespart werden. Das Einsparpotenzial wird flächenbezogen ausgewiesen (pro Hektar Ackerland, Grünland). Eine Flächenbewertung und Szenarioanalyse ergab, dass rund 334.000 ha (etwa 2 % der landwirtschaftlichen Fläche bzw. rund 17 % der landwirtschaftlich genutzten Moorböden) gut bis mäßig geeignet sind für eine Wiedervernässung und anschließende Nutzung mit Paludikulturen. Würden diese Flächen wiedervernässt, könnten jährlich bis zu 15,2 Mio. t CO_2e eingespart werden (UBA 2025b). Dies entspricht etwa 36 % der gesamten THG-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Mooren (insgesamt 42,1 Mio. t CO_2e, LULUCF-Emissionen) bzw. 16 %, wenn die Emissionen der Landwirtschaft und jene der landwirtschaftlich genutzten Moorböden (54,8 Mio. t CO_2e + 42,1 Mio. t CO_2e) gemeinsam betrachtet werden. Zusätzlich entsteht weiteres Minderungspotenzial durch die Nutzung von Paludikulturen in der Baustoffproduktion, insbesondere durch Substitution konventioneller Baustoffe und verbesserte Wiederverwertung paludikulturbasierter Materialien.

4.6 Nachhaltige Waldbewirtschaftung und Holznutzung

Bei der Bindung von Kohlenstoff in der Biomasse spielt der Wald eine entscheidende Rolle als Kohlenstoffsenke und -speicher. In den insgesamt 11,5 Mio. ha Wald in Deutschland sind derzeit 1.184 Mio. Tonnen Kohlenstoff (108 t/ha) in den lebenden Bäumen gebunden (BMEL, 2022). Der Wald leidet jedoch unter den Wetterextremen der letzten Jahre und damit einhergehenden Folgen wie die Zunahme von Kalamitäten, wodurch diese Leistung gefährdet ist (Migliavacca et al. 2025). Erforderlich sind daher Anstrengungen in Richtung einer klimaresilienteren Waldbewirtschaftung, um diese wichtigen Leistungen zu erhalten bzw. wieder herzustellen. Hierzu gehören neben Waldumbau auch Erstaufforstung mit geeigneten Baumarten und -genotypen. Daneben exportiert Deutschland zunehmend Kalamitätsholz, welches zuvor mit dem starken Treibhausgas Sulfuryldifluorid (SO_2F_2) begast wird, um die Schadorganismen abzutöten. Eine Tonne SO_2F_2 ist 4.090-mal so klimawirksam wie eine Tonne CO_2 (UBA 2025a, S. 395 Tabelle 204). Seit 2020 erfolgt eine freiwillige Berichterstattung der Klima-schädlichen Schwefel-Fluorverbindungen (IPCC, 2022). Je ein Projekt befasste sich mit dem Erhalt und Ausbau der Speicherleistung des Waldes sowie der Reduktion bzw. Vermeidung von Emissionen bei der Holzbehandlung.

4.6.1 Anreizwirkungen, Akzeptanz und Klimawirksamkeit unter-schiedlicher Honorierungsoptionen für den Klimaschutz in der Waldwirtschaft (AnAKHon)

Im Rahmen des Projekte **AnAKHon** wurden Kohlenstoffertragstafeln für verschiedene Baumarten erstellt (Brinkord et al., 2024). Außerdem wurde mittels Befragungen die Bereitschaft zu bestimmten waldbaulichen Maßnahmen, wie Waldumbau und -wiederaufforstung bei Waldbesitzern und zu Erstaufforstungen bei Besitzern landwirtschaftlicher Flächen ermittelt. Dabei wurde die Contingent Valuation Methode verwendet, um die Kompensationsforderungen von Landbesitzern bezüglich der Landnutzung ihrer Flächen zur zusätzlichen Kohlenstoffsequestrierung zu ermitteln: Befragten wurde ein hypothetisches Förderprogramm vorgestellt, und sie gaben an, wieviel Fläche sie zu jeweils vorgegebenen Preisen zur Verfügung stellen würden. Im Rahmen der Szenarienentwicklung wurden alternative Anpassungs- und Klimaschutzmaßnahmen zunächst einzeln und

anschließend als Maßnahmenbündel untersucht und die Kohlenstoffspeicherung in den Wäldern, die Opportunitätskosten sowie die Holzerträge berechnet. Damit die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse auch eine wirksame Umsetzung erfahren können, sind Anpassungen des geltenden Rechtsrahmens bzw. eine stärkere Ausschöpfung des rechtlichen und finanziellen Spielraums für die Förderung von Waldumbau und Erstaufforstung erforderlich.

Potenziell erzielbare THG-Einsparung: Waldumbau bzw. Erstaufforstung mit Hilfe von Förderprogrammen trägt zu Erhalt und Vergrößerung des Waldes als Kohlenstoffsenke bei. Kohlenstoffbindung setzt bereits bei jungen Wäldern ein, ist aber sehr altersabhängig und entfaltet sich erst später voll. Einzelne Maßnahmen des Förderprogramms „Klimaangepasstes Waldmanagement“ (z. B. Erstaufforstungen, Nutzungsverzichte) haben substantielles Klimaschutzpotenzial, auch wenn dieses z. T. betrieblichen und rechtlichen Restriktionen unterliegt. Das Förderprogramm enthält aber auch einige Kriterien, die sich eher durch Anpassungs- sowie Naturschutzziele als mit dem Klimaschutz rechtfertigen lassen. Klimawirkungen hängen aber auch von Holzverwendung und -handel ab. Eine rein sektorale Betrachtung spiegelt sie nur unvollständig wider.

4.6.2 Klimaneutrale Begasungsverfahren und alternative Behandlungsmethoden für Rundholz im Export (KLIMAtiv)

Die bei der Stammholz-Begasung entstehenden Emissionen werden dem Industriesektor zugeordnet (CRF 2.G.4a). Da diese Quarantänebehandlungen für die Einfuhr in bestimmte Drittstaaten verpflichtend ist und die Freisetzung sich lokal auf Häfen und Begasungsplätze im Inland konzentriert, ist eine Reduktion des Verbrauchs von Sulfuryldifluorid bzw. dessen Substitution durch alternative Gase und phytosanitäre Methoden ein wichtiges Ziel im Projekt **KLIMAtiv**. Phytosanitäre Behandlungsalternativen, die mit deutlich niedrigeren THG-Emissionen einhergehen, sind die Begasung mit den Gasen PH_3 sowie mit anoxischen Atmosphären unter CO_2 und N_2, die Nutzung von Dampf, eine Entrindung oder die Unterwasserlagerung. In diesem Zusammenhang wurde ein Pilotversuch zur Abluftfilterung von SO_2F_2 untersucht als auch eine Heißdampfbehandlung des Holzes, beides im Seecontainer.

Potenziell erzielbare THG-Einsparung: Ersatz bzw. Reduzierung des stark klimaschädlich wirkenden Gases SO_2F_2 bei der Behandlung von Exportholz gegen Quarantäneschädlinge ist durch Dampfbehandlung oder Wasserlagerung als Alternative zur Begasung, dem optimierten Einsatz von SO_2F_2 sowie die Nutzung von PH_3 möglich. Schon die optimierte Behandlung mit SO_2F_2 bei Temperaturen oberhalb 10 °C, wie in der auf Basis der Projektdaten und internationalen Standards erstellten Handlungsanweisung des BMLEH mit den Ländern und dem JKI empfohlen, ergibt eine Einsparung von 20 % des Gases pro Anwendung. Zudem ist die Dampfbehandlung deutlich klimafreundlicher mit nur ca. 1 t CO_2e (bei 56 °C) beziehungsweise 1,3 t CO_2e (bei 71,1 °C).

Würde die SO_2F_2-Behandlung von Rundholz für den Export durch eine Dampfbehandlung ersetzt werden, würde sich der CO_2-Ausstoß bei einer Zieltemperatur von 56 °C um 95 %, bei der von China geforderten Zieltemperatur von 71 °C um 94 % verringern. Der Rundholzexport lag 2024 bei 6,4 Mio. fm (Festmeter), wovon etwa 1,5 Mio. fm nach China exportiert wurden (Quelle: Statistisches Bundesamt). Die Begasung eines 40‘-Containers (67,7 m^3) bei Einsatz von 5,4 kg SO_2F_2 und unter Berücksichtigung der THG-Wirkung von SO_2F_2 für GWP100, ergibt einen Wert von 22,15 t CO_2e. Die exportierten 1,5 Mio. fm Rundholz entsprechen etwa 2,1 Mio. rm (Raummeter=m^3) für deren Transport also mindestens 31.000 Containerladungen notwendig sind. Bei Einsatz von 5,4 kg SO_2F_2 pro phytosanitäre Behandlung ergibt sich eine Freisetzung von ca. 167 t SO_2F_2 und somit bei einer GWP100 von 4080 eine Emission von jährlich 681.000 t CO_2e. Bei einer 94-prozentigen Reduktion durch die im Projekt aufgezeigten alternativen Behandlungsmethoden kann in Deutschland eine Einsparung von ca. 640.000 t CO_2e realisiert werden. Die neue Handlungsanweisung des BMLEH, die maßgeblich mit Ergebnissen aus KLIMAtiv erarbeitet wurde, führt zu einer Einsparung von 20 % SO_2F_2 und somit einer jährlichen THG-Sofortminderung von 136.000 t CO_2e.

4.7 Klimaschutz in weiteren Landschaftsräumen

Dieses breite Themenfeld beschreibt verschiedene Anknüpfungspunkte, die sich aus unterschiedlichen Blickwinkeln mit Klimaschutz in verschiedenen Landschaftsräumen beschäftigen. Neben dem Klimaschutz im Weinbau gehören hierzu die CO_2-Bindung der Stadtbäume, aber auch die Verbesserung des innerstädtischen Klimas. Bei Agri-Photovoltaik-Anlagen steht im Sinne des Ausbaus erneuerbarer Energien die Doppelnutzung der landwirtschaftlichen Flächen und der potenzielle Mehrwert durch die Erhaltung und die Förderung der funktionellen Biodiversität in diesen Systemen im Vordergrund. Wirtschaftsaktivitäten im ländlichen Raum, auch außerhalb der Forst- und Landwirtschaft, müssen sich den Herausforderungen der Minderung von Treibhausgas-Emissionen stellen. Die in den Projekten betrachteten Kleingewässer liegen in der Agrarlandschaft, der Fokus lag auf der Anhebung des Wasserstands. Diese Forschungsvorhaben zielten nicht auf THG-Minderungen im Sektor Landwirtschaft ab, da Emissionsminderungen bei Kleingewässern sowie Kohlenstoffsequestrierung bei Stadtbäumen dem LULUCF-Sektor zuzuordnen sind; die aktuelle Berichterstattung berücksichtigt diese Zuordnung noch nicht.

4.7.1 Nützlingsförderung in Agri-Photovoltaikanlagen (Solarnützlinge)

Die Substitution von Strom aus fossilen Quellen durch Solarenergie bei Agri-PV kommt dem Energiesektor zugute. Durch APV wird Landwirtschaft und Energiegewinnung auf einer Fläche kombiniert, um Landnutzungseffizienz zu erhöhen und Landnutzungskonflikte zu vermeiden. Somit kann der Ausbau erneuerbaren Energien weiter vorangetrieben werden. Ebenfalls können diese Systeme als Kulturschutz gegen Extremwetterbedingungen dienen. Die im Rahmen des Projektes **Solarnützlinge** durchgeführten Untersuchungen betrachteten vorrangig Fragestellungen zur Biodiversität und möglichen Synergien mit Agri-PV. Es wurden mit Ausnahme zur Emissionsreduktionen durch Vermeiden des Pflanzenschutzeinsatzes in den PV-Anlagen keine Aussagen zu THG-Minderungen getroffen.

Potenziell erzielbare THG-Einsparung: nicht untersucht

4.7.2 Wiedervernässung von Agrargewässern als Klimaschutz-Sofortmaßnahme (WAKS)

Durch den Klimawandel verursachte längere und wärmere Trockenperioden führen bei einer steigenden Anzahl von kleinen (<1 ha) stehenden Gewässern in der Agrarlandschaft nicht nur häufiger, sondern auch länger zur Austrocknung. Dies kann insbesondere in Gewässerbereichen, die nur zeitweise überflutet sind, zu verstärkten CO_2-Emissionen führen (Obrador et al., 2018). Das Projekt **WAKS** untersuchte über einen Zeitraum von zwei Jahren, welchen Einfluss die Anhebung des Wasserstandes eines Kleingewässers auf die CO_2-Emissionen hat. Die Wiedervernässung erfolgte durch Entfernung des organikreichen Sediments. Das Gewässer führt seit der Maßnahme eine permanente Wasseroberfläche. Um die Entwicklung des Gewässers im Jahresgang und zwischen den Jahren zu beobachten, erfolgte ergänzend zu den in situ-Messungen der CO_2-Emissionen das Monitoring verschiedener biogeochemischer Begleitparameter und der Gewässeroberfläche anhand von Luftbildern.

Potenziell erzielbare THG-Einsparung: Eine Reduzierung der Emissionen durch Anhebung des Wasserstands von Kleingewässern ist möglich. So zeigten vergleichende Messungen der CO_2-Fluxe zwischen trocken gefallenem und wiedervernässtem Gewässer eine positive Klimabilanz des renaturierten Gewässers mit deutlich verringerten CO_2-Emissionen. Welche Rolle der bei der Entschlammung entnommene organische Aushub selbst für Treibhausgasemissionen hat, ist nach aktuellem Stand der Forschung noch nicht ausreichend belegt. Das langfristige Bestehen renaturierter Gewässer ist für eine nachhaltige positive Klimawirkung entscheidend. Bei der Wiedervernässung von Agrargewässern geht keine landwirtschaftliche Fläche verloren. Ökosystemleistungen, wie zum Beispiel der Ausgleich von Lebensraumverlusten durch Austrocknung, hingegen, werden zusätzlich gefördert.

4.7.3 Maximierung der Kohlenstoffsequestrierung in Stadtbäumen (CliMax)

Im Projekt **CliMax** werden Aussagen zur Kohlenstoffbindung von Stadtbäumen unter Berücksichtigung der Wasserversorgung getroffen. Die derzeitige Methodik der THG-Bilanzierung bildet den positiven Einfluss von

Grünflächen und Bäumen im urbanen Bereich auf die Netto-Emissionen nicht ab (WBNK, 2025). Moderne Sensor- und Messtechnologien wurden genutzt, um die Wasserversorgung und Verdunstungsleistung von Stadtbäumen zu quantifizieren. Laserscan-Daten wurden eingesetzt, um die stadtweite Kohlenstoffspeicherung von Bäumen unterschiedlicher Arten in Abhängigkeit von Alter und Gesundheitsstatus abzuschätzen. Dabei wurden verschiedene Methoden hinsichtlich ihrer Genauigkeit verglichen. Die im Rahmen von CliMax gewonnenen Erkenntnisse sind für die künftige Berichterstattung von Bedeutung. Ein Hemmnis ist die bisher fehlende flächendeckende Digitalisierung der Baumkatasterdaten der Städte und Gemeinden zur vereinfachten Ermittlung und Dokumentation der Speicherleistung. Die im Rahmen des Projekts entwickelte Prozesskette zur Auswertung von frei verfügbaren Daten LiDAR und Sentinel-2 Daten soll helfen, die Speicherleistung künftig genauer und einfacher zu bestimmen. Außerdem wurden geeignete Maßnahmen zur Stärkung der Kohlenstoffspeicherung bei Bäumen identifiziert, insbesondere zur Vermeidung von Wasserstress und bei Ergänzung durch neue Baumbestände die geeignete Standortvorbereitung. Die getesteten und verifizierten nichtinvasiven Verfahren zur Ermittlung der Kohlenstoffspeicherleistung bei Gehölzen können sowohl im urbanen wie ruralen Bereich zum Einsatz kommen (Strohbach et al., 2025).

Potenziell erzielbare THG-Einsparung: Für die Förderung der C-Sequestrierung ist die Gesunderhaltung von Stadtbäumen, insbesondere durch ausreichende Wasserversorgung wichtig. Für die drei für Braunschweig typischen Stadtbäume Winterlinde, Säuleneiche und Baumhasel wurde eine Lebenszyklusanalyse durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass erst ab dem 12. Standjahr die CO_2-Neutralität erreicht wird, da Neu- und Nachpflanzungen mit THG-Emissionen verbunden sind. Das bedeutet, erst wenn Bäume mehr als 12 Jahre an ihrem Standort stehen wird eine längerfristige Kohlenstoffbindung erreicht. Dies verdeutlicht, wie wichtig die Gesunderhaltung des vorhandenen Baumbestands ist. Eine Beispielsrechnung ergab, dass eine 50-jährige Baumhasel 1t CO_2 in ihrer Biomasse sequestriert. Alte Bäume speichern nicht nur viel Kohlenstoff, sie sorgen auch für mehr Verschattung und Verdunstungskühlung. Ein optimaler Baumstandort ist daher ausschlaggebend für eine positive Klimawirkung von Stadtbäumen.

4.7.4 Treibhausgasneutrales Deutschland: Auswirkungen auf Wirtschaft und Lebensverhältnisse in ländlichen Räumen (TREND:LR)

Beim Projekt **TREND:LR** standen die Auswirkungen von Klimaschutzmaßnahmen auf die Wirtschaft und die Lebensverhältnisse in ländlichen Räumen sowie die Integration des Klimaschutzes in lokale und regionale Entwicklungsprozesse im Rahmen der Politik zur Entwicklung ländlicher Räume im Vordergrund. Es wurden beispielsweise ausgewählte LEADER-Prozesse betrachtet, mit denen u.a. Projekte zur Energieeinsparung gefördert werden sollten (Guhl et al., 2025). Stärkere Anreize zur Berücksichtigung des Klimaschutzes in den Programmen der Länder für ihre Politik zur Entwicklung ländlicher Räume ist für die Integration auf lokaler und regionaler Ebene besonders wichtig. Zudem erfolgte eine Untersuchung der Beschäftigungseffekte höherer Energiepreise.

Potenziell erzielbare THG-Einsparung: Erkenntnisse zu Synergien und Zielkonflikten zwischen Klimaschutz und ländlicher Entwicklung können die Bundesländer für die weitere Ausgestaltung ihrer Klimaschutzpolitik nutzen, beispielsweise in der Programmplanung zur Entwicklung ländlicher Räume. Des Weiteren können regionale Akteure aus den Erkenntnissen lernen, durch Förderung von Synergien kann die Bereitschaft für mehr Klimaschutz gestärkt werden.

4.8 Fernerkundung für die Treibhausgas-Berichterstattung

Die Beobachtung und Analyse der Landnutzung bzw. Landnutzungsveränderungen basiert zunehmend auf Luftbild- und Satellitendaten. Es gilt, diese Datenquellen möglichst effektiv zu nutzen, um daraus zum einen Erkenntnisse zur räumlichen Verteilung von Treibhausgas-Emissionen zu gewinnen und zum anderen Kohlenstoffsenken zu identifizieren. Die Daten aus der Fernerkundung, als georeferenzierte Informationen zur Landnutzung, stellen eine zusätzliche Datenquelle zu den behördlichen oder hoheitlichen Landnutzungsdaten dar und sind geeignet, um Lücken zu schließen (räumlich, zeitlich, thematisch) und so das Monitoring für die THG-Berichterstattung aber auch die Projektionen auf eine solide Datenbasis zu stellen. Die beiden Projekte KlimaFern und KOBOS zielen auf Verbesserungen in der Berichterstattung durch die flächendeckende Erfassung der landwirtschaftlichen Nutzung mit Satellitendaten ab. THG-Emissionsminderungen werden in den Projekten selbst nicht adressiert. Eine Nutzung der generierten Datenbasis kann jedoch zur Verbesserung der Berechnungen für die Ermittlung von THG-Emissionen und Minderungspotenzialen sowohl im Sektor Landwirtschaft (z.B. räumliche Darstellung von Zwischenfruchtanbau) als auch im LULUCF Bereich (z. B. Lokalisierung von Hecken) beitragen.

4.8.1 Fernerkundung für eine Verbesserung der Klimaberichterstattung (KlimaFern)

Das Projekt **KlimaFern** adressiert unmittelbar die oben beschriebene Notwendigkeit von hochaufgelösten, Landnutzungsdaten. Als Ergebnis liegt ein Set von bundesweit flächendeckenden Produkten zu Aktivitätsdaten vor. Dabei lag der Schwerpunkt auf Landnutzungsentscheidungen und Bearbeitungspraktiken von Landwirten, die potenziell zur Kohlenstoffbindung oder -freisetzung bzw. zum Humusaufbau oder -abbau auf landwirtschaftlich genutzten Böden beitragen. Hierbei gelang es, das Alter von Dauergrünland zu identifizieren. Zudem erfolgte die Entwicklung eines Verfahrens zur direkten Kohlenstoffschätzung von Ackerböden aus Satellitendaten, die eine unabhängige Evaluierung der (langfristigen) Wirksamkeit von Klimaschutzmaßnahmen ermöglichen. Für Deutschland erfolgte erstmals eine umfassende Kartierung von Hecken aus sehr hoch aufgelösten Satellitendaten. Für die Agrarlandschaft in Deutschland konnte auf diese Weise im Jahr 2022 ein Heckenbestand von 4.081 km² geschätzt werden, was etwa 2,3 % der gesamten landwirtschaftlich genutzten Fläche entspricht. Die räumliche Verteilung ist sehr heterogen mit Schwerpunkt im Norden / Nordwesten Deutschlands. Da Hecken sowohl ober- als auch unterirdisch deutlich mehr Kohlenstoff speichern als Acker und Grünland, sind diese als Kohlenstoffsenken von Bedeutung. Die Daten aus KlimaFern wurden testweise für die Berechnungen im Inventar-Bericht 2025 verwendet. Mittelfristig ist die Weiterführung der in KlimaFern entwickelten Produkte für eine dauerhafte Implementierung beabsichtigt.

4.8.2 Deutschlandweite raum-zeitliche Modellierung von Kohlenstoffgehalten landwirtschaftlicher Böden durch eine integrative Auswertung von Satellitenbildzeitreihen und Geodaten (KoBoS)

Verbesserungen bei der raum-zeitliche Modellierung durch Verwendung von öffentlich verfügbaren und zusätzlichen nutzerspezifischen Stichproben sowie standardisierten erklärenden Variablen sollen eine räumliche Prognose von Kohlenstoffgehalten deutschlandweit ermöglichen. Als Ergebnis entstehen optimierte regionale Modelle, die wiederum eine Voraussetzung für die Abschätzung signifikanter Trends sind. Bayern diente als Testregion, die im Projekt **KoBoS** entwickelte Prozesskette ist jedoch für beliebige Gebiete in Deutschland anwendbar. Digital Soil Mapping (DSM) wurde genutzt, um ein effektives, flächendeckendes und wiederholbares Monitoring der Kohlenstoffgehalte und deren Veränderungen im Kontext von Klimawandel und Managementmaßnahmen zu untersuchen. DSM-basierte Modellansätze haben das Potenzial, als Nachweis für die Ableitung von Trends im Boden-Kohlenstoffhaushalt zu fungieren und durch die generierte räumliche Information zur Optimierung von Emissionsminderungsmaßnahmen beizutragen. Die so generierte Information kann als Datengrundlagen für Carbon-Farming-Programme genutzt werden. Die Umsetzung von Humusaufbaumaßnahmen kann hierdurch unterstützt werden, in dem ein verlässliches Monitoring von Klimaschutzmaßnahmen mit dem Ziel der Stärkung der Kohlenstoffspeicherkapazität landwirtschaftlicher Böden möglich wird.

5 Fazit

Forschungsprojekte spielen eine entscheidende Rolle bei der Minderung von Treibhausgasemissionen und des Aufbaus von Kohlenstoffsenken im Sektor Landwirtschaft und LULUCF. Wie eingangs erwähnt, trägt die Landwirtschaft in Deutschland im Jahr 2024 mit etwa 9 % zu den gesamten Treibhausgasemissionen (inkl. LULUCF) bei, vor allem durch Methan (CH_4) und Lachgas (N_2O) aus Tierhaltung und Düngemitteleinsatz. Hinzukommen zusätzlich Emissionen aus der Landnutzung aus mineralischen und organischen Böden, so dass der Anteil der Emissionen aus Landwirtschaft inklusive Landnutzung sogar bei ca. 15 % liegt. Da dem Sektor Landwirtschaft im Klimaschutz in den letzten zwei Jahrzehnten nicht dieselbe Bedeutung geschenkt wurde wie anderen Sektoren (insbesondere dem Energiesektor), fehlt es an umfassenden Maßnahmen und Innovationen, um die Emissionen zu reduzieren. Dafür sind Forschungsprojekte unerlässlich.

Um die Klimaschutzwirkung abzuschätzen, wurden die durch Forschung adressierten THG-Minderungspotenziale in den 27 geförderten RessortForschtKlima-Projekten identifiziert. Insbesondere wurden dafür die Klimaschutzpotenziale in folgenden Bereichen näher betrachtet: Emissionen aus der Tierhaltung, effizienterer Einsatz von Stickstoffdüngern, Humusaufbau sowie Förderung von Kohlenstoffsenken in der Agrarlandschaft sowie im Wald.

Forschungsprojekte sind in der Lage Innovationen für einen besseren Klimaschutz der Landwirtschaft anzustoßen. Dies hat der Verbund der RessortForschtKlima-Projekte gezeigt. Dafür sind Projekte notwendig, die Emissionen direkt adressieren, aber auch solche, die unterstützende Maßnahmen untersuchen, um die Umsetzung und die Skalierung von Maßnahmen am Ende der Wirkkette zu ermöglichen. Eine Quantifizierung der direkten THG-Minderungswirkungen von Forschungsprojekten ist wie beschrieben meistens nicht möglich und auch nicht sinnvoll, da die Forschung eine spätere Umsetzung wirksamer Maßnahmen vorbereiten soll, aber nicht selbst beinhaltet.

Literatur

Attia, A, Marohn, C, Shawon, A R, de Kock, A, Strassemeyer, J, Feike, T (2024). Do rotations with cover crops increase yield and soil organic carbon? – A modeling study in southwest Ger-many. Agriculture, Ecosystems & Environment.109167. https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109167

BMEL, Hrsg. (2018): Humus in landwirtschaftlich genutzten Böden Deutschlands. Ausgewählte Ergebnisse der Bodenzustandserhebung. Zuletzt abgerufen am 15.07.2025: https://www.bmleh.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/Bodenzustandserhebung.pdf?__blob=publicationFile&v=11

BMEL, Hrsg. (2022): Der Wald in Deutschland - Ausgewählte Ergebnisse der vierten Bundeswaldinventur. Zuletzt abgerufen am 13.11.2025: https://www.bundeswaldinventur.de/fileadmin/Projekte/2024/bundeswaldinventur/Downloads/BWI-2022_Broschuere_bf-neu_01.pdf

BMEL, Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2024a): Land- und Forstwirtschaft stärken – Klima schützen. Maßnahmen der Land- und Forstwirtschaft für den Klimaschutz. Zuletzt abgerufen am 18.06.2025: https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/klimaschuetzer-land-und-forstwirtschaft.pdf?__blob=publicationFile&v=7

BMEL, Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2024b): Gutes Essen für Deutschland. Ernährungsstrategie der Bundesregierung. Zuletzt abgerufen am 30.07.2025: https://www.bmleh.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Ernaehrung/ernaehrungsstrategie-kabinett.pdf?__blob=publicationFile&v=8

BMLEH, Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat (2025), online: Tabellen zu Nährstoffbilanzen veröffentlicht. Zuletzt abgerufen am 15.07.2025: https://www.bmel-statistik.de/archiv/nachrichtenarchiv/startseite-news-details?tx_news_pi1%5Baction%5D=detail&tx_news_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx_news_pi1%5Bnews%5D=427&cHash=38ff7d804920b57bb762283cd2b2d6e4

BMUV, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2023): Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz. Zuletzt abgerufen am 1.08.2025: https://www.bundesumweltministerium.de/publikation/aktionsprogramm-natuerlicher-klimaschutz

BMWK, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2022): Klimaschutzbericht 2022 der Bundesregierung nach § 10 Absatz 1 des Bundes -Klimaschutzgesetzes. Zuletzt abgerufen am 18.06.2025 unter: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/klimaschutzbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=6

BMWK, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2024): Arbeitshilfe zur Ermittlung der Treibhausgasminderung. Zur Unterstützung bei der Erstellung von Skizzen, Förderanträgen und Projektberichten im Rahmen des Förderaufrufs für innovative und transformative Klimaschutzprojekte der Nationalen Klimaschutzinitiative (NKI). Zuletzt abgerufen am 18.07.2025: https://www.klimaschutz.de/sites/default/files/mediathek/dokumente/06_2024_BMWK_NKI-Arbeitshilfe_zur_Ermittlung_der_THG_Minderung.pdf

Bockermann C, Eickenscheidt T, Drösler M (2025): Greenhouse gas mitigation potential of temperate fen paludicultures. Global Change Biology. DOI: https://doi.org/10.1111/gcb.70385

BRH, Bundesrechnungshof (2023a): Beratungen zum Entwurf des Wirtschaftsplans 2024 für den Klima- und Transformationsfonds. Beratungsbericht an den Haushaltsausschuss des Deutschen Bundestages. 29. September 2023. Zuletzt abgerufen am 18.06.2025 unter: https://www.bundesrechnungshof.de/SharedDocs/Downloads/DE/Berichte/2024/ktf-wirtschaftsplan-volltext.pdf?__blob=publicationFile&v=4

BRH, Bundesrechnungshof (2023b): Ausgaben für den Klimaschutz müssen sich stärker an der Fördereffizienz ausrichten. Beratungsbericht an den Rechnungsprüfungsausschuss des Haushaltsausschusses des Deutschen Bundestages. 14. April 2023. Zuletzt abgerufen am 18.06.2025 unter:

https://www.bundesrechnungshof.de/SharedDocs/Downloads/DE/Berichte/2023/foedereffizienz-klimaschutz-volltext.pdf?__blob=publicationFile&v=2

Brinkord, M; Elsasser, P; Seintsch, B (2024): Hilfstabellen zur Ab-schätzung der Kohlenstoffspeicherung in Waldbeständen ("Kohlenstoff-Ertragstafeln"). Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut. Thünen Working Paper 239, 32 pp. DOI: 10.3220/WP1715581744000

Bundesregierung (2019): Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050. Zuletzt abgerufen am 18.06.2025 unter: https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Landwirtschaft/Klimaschutz/Klimaschutzprogramm2030.pdf?__blob=publicationFile&v=3

Coniglio R, Schütt F, Appelt J (2024): Challenges for the utilization of ammoxidized lignins and wood fibres as a peat substitute in horticultural substrates. Journal of Cleaner Production 475 (2024) 143737. https://doi.org/10.1016/j.jcle-pro.2024.143737

Duden C, Nacke C, Offermann F (2024): German yield and area data for 11 crops from 1979 to 2021 at a harmonized spatial resolution of 397 districts. Sci Data 11:95, DOI:10.1038/s41597-024-02951-8

Eagle A J, McLellan E L, Brawner E M, Chantigny M H, Davidson E A, Dickey J B, Linquist B A, Maaz T M, Pelster D E, Pittelkow C M, van Kessel C, Vyn T J, Cassman K G (2020): Quantifying On-Farm Nitrous Oxide Emission Reductions in Food Supply Chains. Earth‘s Future. https://doi.org/10.1029/2020EF001504

Eickenscheidt T, Bockermann C et al. (2024). MOORuse Paludikulturen für Niedermoorböden in Bayern – Etablierung, Klimarelevanz & Umwelteffekte, Verwertungsmöglichkeiten und Wirtschaftlichkeit. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.10778063

EU Kommission (2025): EUROPEAN COMMISSION, DIRECTORATE-GENERAL FOR ENERGY (2025) Reporting Guidelines Dataflow 9 to 14: Integrated Policies and Measures under Regulation (EU) 2018/1999 on Governance of the Energy Union and Climate Action, Implementing Regulation 2020/1208 Annex 24 & Implementing Regulation 2022/2299 Annex 9 to 14. https://www.eionet.europa.eu/reportnet/docs/govreg/policies-and-measures/reporting-guidelines-dataflow-9-to-14-policies-and-measures.pdf/view (S. 54)

Förster, H., Repenning, J., Borkowski, K., Braungardt, S., Bürger, V., Cook, V., Emele, L., Görz, W. K., Haller, M., Hennenberg, K., Jörß, W., Kasten, P., Koch, M., Ludig, S., Mendelevitch, R., Moosmann, L., Nissen, C., Scheffler, M., Steinbach, I., et al. (2025). Treibhausgas-Projektionen 2025 für Deutschland (Projektionsbericht 2025). Umweltbundesamt. https://doi.org/10.60810/openumwelt-7906. Abrufbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/treibhausgas-projektionen-2025-fuer-deutschland

Guhl F, Becker S, Küpper P (2025): So lässt sich Klimaschutz in LEADER integrieren - ein Policy Brief. Thünen à la carte. Juni 2025. Zuletzt abgerufen am 18.07.2025: www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-a-la-carte/20250603_alacarte_14_LV.pdf

Herrmann, A, Schulz, K, Wischnewski, N, Brüssau, J, Zeiler, E, Sauter-Louis, C. (2024): Risk Awareness and Attitude of German Farmers towards Biosecurity Measures. Animals 2024, 14, 1102. https://doi.org/10.3390/ani14071102

Hostetler A N, Morais de Sousa Tinoco S, Sparks E (2024): Root responses to abiotic stress: a comparative look at root system architecture in maize and sorghum, Journal of Experimental Botany, Volume 75, Issue 2, 10 January 2024, Pages 553–562, https://doi.org/10.1093/jxb/erad390

IPCC (2006): IPCC (2006): IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). IGES, Japan. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html

IPCC (2014): AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014. Abgerufen am 3.11.2025 unter: https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar5/

IPCC (2019): Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and Federici, S. (eds). IPCC, Switzerland. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol4.html

IPCC (2021): Climate Change 2021: The Physical Science Basis.: Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change“. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/

IPCC (2022): Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. doi:10.1017/9781009157926

IVG, Industrieverband Gartenbau (2024): Ergebnisse der IVG Abfrage zu aktiven Torfabbauflächen, laufenden Genehmigungen und Resttorfvorräten in Deutschland. Abgerufen am 17.07.2025: https://erden-substrate.info/wp-content/uploads/2024/05/Auswertung-IVG-Torfabfrage-2024.pdf

Koppensteiner W, Wegmann J, Ischebeck M, Laggner A, Tiemeyer B (2023) Ermittlung von Potenzialgebieten für Moorschutzmaßnahmen in Deutschland. Natur Landsch 98(3):94-103, DOI:10.19217/NuL2023-03-01

Laidig, F, Feike, T, Lichthardt, C, Schierholt, A, Piepho, H P (2024): Breeding progress of nitrogen use efficiency of cereal crops, winter oilseed rape and peas in long-term variety trials. Theoretical and Applied Genetics. 137, 45. https://dx.doi.org/10.1007/s00122-023-04521-9

Mathivanan G P, Eysholdt M, Zinnbauer M, Rösemann C, Fuß R (2021): New N2O emission factors for crop residues and fertiliser inputs to agricultural soils in Germany. Agriculture, Ecosystems & Environment. https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107640

Migliavacca M, Grassi G, Bastos A et al. (2025): Securing the forest carbon sink for the European Union’s climate ambition. Nature 643, 1203–1213 (2025). https://doi.org/10.1038/s41586-025-08967-3

Müller-Blenkle, C, Adler C S (2024): Increasing the Oxygen Consumption in Hermetic Grain Storage Using Grain Weevils (Sitophilus granarius). Insects, 15(11), 845, https://doi.org/10.3390/insects15110845

Obrador B., von Schiller D., Marcé R., Gómez-Gener L., Koschorreck M., Borrego C, Catalán N (2018): Dry habitats sustain high CO_2 emissions from temporary ponds across seasons. Scientific Reports, 8(1), 3015. https://doi.org/10.1038/s41598-018-20969-y

PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) (2008): Nachhaltige Wirkungen. Beispiele aus der Zusammenarbeit in der Qualitätsinfrastruktur. Abgerufen am 17.10.2025: https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung_q/q.3_internationale_zusammenarbeit/publikationen/002_Impact/PTB_Q5_Impact_DE.pdf

RessortForschtKlima (2025): Ergebnisse aus drei Jahren Forschung für mehr Klimaschutz in Landwirtschaft, Wald und Ernährung: Abschlussbericht der RessortForschtKlima-Projekte. https://doi.org/10.3220/253-2025-220

Riedesel L, Laidig F, Hadasch S, Rentel D, Hackauf B, Piepho H-P, Feike T (2022): Breeding progress reduces carbon footprints of wheat and rye. Journal of Cleaner Production. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134326

Shawon AR, Memic E, Kottmann L, Uptmoor R, Hackauf B, Feike T (2024): Comprehensive evaluation of the DSSAT-CSM-CERES-Wheat for simulating winter rye against multi-environment data in Germany. Agron J, 116 (4), 1844-1868. 10.1002/agj2.21590

Schumacher K et al. (2023): Methodenhandbuch zur Evaluation der Nationalen Klimaschutzinitiative (NKI). Evaluation, Begleitung und Anpassung bestehender Förderprogramme sowie Weiterentwicklung der Nationalen Klimaschutzinitiative (NKI) 2019-2023: Abgerufen am 17.10.2025: https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Downloads/M-O/methodenhandbuch-nki-evaluation.pdf?__blob=publicationFile&v=13

Schütze B, Tönshoff C, Wegmann J (2024): Neuanlage von Hecken: Hemmnisse im rechtlichen und förderpolitischen Kontext. Naturschutz und Landschaftsplanung, 56(11), S. 28-35, DOI:10.1399/NuL.79851

Strohbach M, Shrestha N, Preidl S, Strassemeyer J, Golla B, Quambusch M (2025): Urban Tree biomass estimation: Integrating terrestrial and airborne laser scanning. GfÖ 2025: 54th GfÖ Annual Meeting; Würzburg, Germany, September 1-5 2025; “Ecological Systems under Pressure: Challenges and Solutions”; Book of Abstracts, 668. https://www.openagrar.de/receive/openagrar_mods_00109838

Tews K, Schumacher K, Eisenmann L, Saupe A, Zacharias-Langhans K. (2020): Arbeitshilfe zur Ermittlung der Treibhausgasminderung. Zuletzt abgerufen am 18.06.2025: https://www.klimaschutz.de/sites/default/files/2020-01_BMU-NKI_Arbeitshilfe-Ermittlung-THG-Minderung.pdf

Tiemeyer B, Freibauer A et al. (2020): A new methodology for organic soils in national greenhouse gas inventories: Data synthesis, derivation and application. Ecological Indicators, 109, 105838. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105838

UBA, Umweltbundesamt (2024): Fragen und Antworten zu Tierhaltung und Ernährung. 2.4 Wie viele Treibhausgase und wie viele Flächen lassen sich durch eine vegetarische oder vegane Ernährung einsparen? (vom 10.05.2024). Zuletzt abgerufen am 17.11.2025 unter https://www.umweltbundesamt.de/themen/landwirtschaft/landwirtschaft-umweltfreundlich-gestalten/fragen-antworten-zu-tierhaltung-ernaehrung#1-umwelt-und-klimawirkungen-der-nutztierhaltung

UBA (2025a): Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change 2025: National inventory report for the German greenhouse gas inventory 1990 –2023. Zuletzt abgerufen am 17.07.2025: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/NID_Germany_2025.pdf?download

UBA (2025b): Beitrag der Landwirtschaft zu den Treibhausgas-Emissionen (vom 26.05.2025). Zuletzt abgerufen am 18.06.2025 unter: https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/beitrag-der-landwirtschaft-zu-den-treibhausgas#treibhausgas-emissionen-aus-der-landwirtschaft

UBA (2025c): Datentabelle zu den Treibhausgas-Emissionen 2024. Zuletzt abgerufen am 8.6.2025: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11867/dokumente/datentabelle_zu_den_treibhausgas-emissionen_2024.xlsx

UBA (2025d): Emissionen der Landnutzung, -änderung und Forstwirtschaft (von 26.05.2024). Zuletzt abgerufen am 8.6.2025: https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland/emissionen-der-landnutzung-aenderung#allgemeine-emissionsentwicklung

UBA (2025e): Zuletzt abgerufen am 30.07.2025: https://uba.co2-rechner.de/de_DE/calculator/result/

UBA (2025f): Emissionsübersichten Treibhausgase Emissionsentwicklung 1990-2023 – Treibhausgase. https://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/govreg/inventory/colz4yinw/envz9ha0a/

Unruh, C.; v. Soosten, D.; Bannert, E.; Peschel, M.; Padberg, K.; Meyer, U.; Dänicke, S. (2024): Investigations on the relationship between locomotion score and methane emissions of cows. International Research Symposium on Agricultural Greenhouse Gas Mitigation. From Research to Implementation. 21.-24.10. in Berlin, Germany. Book of Abstracts; p. 128. doi: 10.3220/WP1731925265000xy

WBAE, Wissenschaftlicher Beirat für Agrarpolitik, Ernährung und gesundheitlichen Verbraucherschutz beim BMLEH (2020): Politik für eine nachhaltigere Ernährung: Eine integrierte Ernährungspolitik entwickeln und faire Ernährungsumgebungen gestalten. Gutachten, Berlin. Zuletzt abgerufen am 17.11.2025: https://www.bmleh.de/SharedDocs/Archiv/Downloads/wbae-gutachten-nachhaltige-ernaehrung.html

WBAE (2025): Mehr Auswahl am gemeinsamen Tisch: Alternativprodukte zu tierischen Lebensmitteln

als Beitrag zu einer nachhaltigeren Ernährung. Zuletzt abgerufen am 29.07.2025: https://www.bmleh.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Ministerium/Beiraete/agrarpolitik/alternativprodukte-tierische-lebensmittel.html

WBNK, Wissenschaftlicher Beirat für Natürlichen Klimaschutz (2025): Optionen zur Weiterentwicklung des Aktionsprogramms Natürlicher Klimaschutz. Zuletzt aufgerufen am 31.07.2025 unter: https://www.wissenschaftlicher-beirat-fuer-natuerlichen-klimaschutz.de/veroeffentlichungen/optionen-zur-weiterentwicklung-des-ank/

Anhang 1: Übersicht der Kürzel und Namen der RessortForschtKlima-Projekte

Kürzel	Name
AnAKHon	**An**reizwirkungen, **A**kzeptanz und **K**limawirksamkeit unterschiedlicher **Hon**orierungsoptionen für den Klimaschutz in der Waldwirtschaft
AVoiD	**A**bwehr von **Vo**rratsschädlingen **i**n **D**eutschland
CaberNET	Bewertung des **C**O_2-Fuß**ab**drucks der W**ei**nprodukti**on** zur **E**rschließung zusätzlicher Klimaschu**tz**potentiale im Weinbau
CatchHedge	Kohlenstoffsequestrierung in Hecken und Feldgehölzen
CliMax	Maximierung der Kohlenstoffsequestrierung in Stadtbäumen: Entwicklung eines Verfahrens für die klimawirksame Gestaltung der multifunktionalen, urbanen grünen Infrastruktur
ENKL	Klimagerechte Ernährung aus der Perspektive von Verbrauchern und Gesellschaft
HoFaTo	Herstellung und Einsatz von **Ho**lz**fa**serstoffen als **To**rfersatzstoff
KlimaFern	**Fern**erkundung für eine Verbesserung der **Klima**berichterstattung
KlimaFFolgen	Erschließung von **Klima**schutzpotentialen durch verbesserte **F**rucht**folge**gestaltu**n**g – Deutschlandweite Potentialanalyse und Entwicklung eines schlagspezifischen Entscheidungsunterstützungssystems
KlimaGetreide	Evaluation des Potentials eines perennierenden Getreideanbaus für die Kohlenstoffspeicherung
KlimaN	Ertragsentwicklung und optimierte **N**-Düngung im **Klima**wandel
KLIMAtiv	**Klim**aneutrale Begasungsverfahren und **a**lterna**tiv**e Behandlungsmethoden für Rundholz im Export
KlimZucht	Identifikation zukünftiger züchterischer Potentiale für mehr **Klim**aschutz in der Pflanzenproduktion - Bewertung des Beitrags des **Züch**tungsfortschritts zur Reduzierung des CO_2-Fußabdrucks
KoBoS	Deutschlandweite raum-zeitliche Modellierung von **Ko**hlenstoffgehalten landwirtschaftlicher **Bö**den durch eine integrative Auswertung von **S**atellitenbildzeitreihen und Geodaten
MOCOR	Ökonomische und ökologische Potentiale von Paludikulturen auf wiedervernässten Moorstandorten zum Klimaschutz; Chancen für eine wirtschaftliche Verwertung von Paludikulturen in Baustoffen und anderen Produkten
NEMUR	**N**achhaltige **E**missions**m**odelle für eine **U**mweltverträgliche **R**inderfütterung
NORA	**N o**ptimierter **Ra**ps zur Reduktion der Treibhausgasemissionen
ÖTiKliS	**Ö**kologische **Ti**erhaltung als Beitrag zum **Kl**imaschutz - im Fokus von Tierkrankheiten und Tier**s**euchen
PRoKlima	Optimierung des **P**otentials von Halbzwergen bei **Ro**ggen für die Steigerung der **Klima**schutzleistung von Getreidefruchtfolgen
RoVer	**Ro**admap zur **Ver**nässung von organischen Böden
Solarnützlinge	Potentiale für eine Nützlingsförderung in Agri-Photovoltaik-Systemen
SORGHUM	Vermehrte Humusreproduktion durch den Anbau von Sorghum in Deutschland als aktiver Beitrag zum Klimaschutz
Trend:LR	**Tre**ibhausgas**n**eutrales **D**eutschland: Auswirkungen auf Wirtschaft und Lebensverhältnisse in **l**ändlichen **R**äumen
TRIP	**T**reibhausgas **R**eduktion durch **i**nnovative Züchtungsfortschritte bei alternativen pflanzlichen **P**roteinquellen
WAKS	**W**iedervernässung von **A**grargewässern als **K**limaschutz-**S**ofortmaßnahme – Wissenschaftliche Beurteilung und Folgenabschätzung für die Agrarlandschaft
WurCel	Humusaufbau mit mehr Wurzeln
VKP	**V**ernetzungs- und **K**oordinierungs**p**rojekt

Anhang 2: Übersicht über die den acht Themenschwerpunkten zugewiesenen Projekte mit einer Kurzbeschreibung und deren Zuordnung

Legende:

Betrachtete(r) Aspekt(e)

🟢 Maßnahmen(weiter)entwicklung 🟡 Folgenabschätzung 🔵 Berichterstattung 🟣 Sozio-ökonomische Untersuchung

Position(en) des Forschungsansatzes in der Wirkkette

0 früher Startpunkt A Intervention B Potenziell THG-reduzierende Maßnahme C Potenziell erzielbare THG-Einsparung D Abschätzung kumulierte THG-Einsparung

Akronym	Kurzbeschreibung der Projektschwerpunktes	Aspekt(e)	Position(en) Wirkkette
Verringerung der Treibhausgas-Emissionen in der Tierhaltung			
NEMUR	Testung von unterschiedlichen **Fütterungsvarianten** und **Messung Methanemission** bei Rindern	🟢	0 B
ÖTiKliS	Datenlage zu Emissionen bei **Tierseuchenausbrüchen** erweitern; Rolle **Biosicherheit für Klimaschutz** bei Schweinen	🔵 🟣	0 C
Erhöhung der Ressourceneffizienz und Senkung der Stickstoffüberschüsse			
PRoKlima	**verbesserte Leistungsfähigkeit** von Halbzwergen durch Nutzung eines dominanten **Kurzstrohgens bei Hybridroggen**	🟢	B
NORA	Identifizierung **genetischer Marker** für **Stickstoffnutzungseffizienz** im Rapsanbau; optimierte Genotyp × Management-Kombinationen	🟢	0 D
KlimZucht	**neue Metriken** für die Pflanzenzüchtung oder die **Sortenempfehlung bei Getreide**	🟢	0
KlimaN	Optimierung von **Düngestrategien bei Extremwetterlagen**; Wirksamkeit der **Düngepolitik** im Kontext steigender Klimafolgen	🟢 🔵	C
Humuserhalt und -aufbau in Ackerland			
WurCel	Methoden zur schnelleren und großflächigeren Untersuchung von Wurzeln; Generierung von **Daten zur Wurzelverteilung und -biomasse**	🟢 🟡	0 C
KlimaGetreide	aktive **Reduktion von CO_2** aus der Atmosphäre durch **Anbau perennierenden Getreides**	🟢	B
SORGHUM	Identifizierung und Weiterentwicklung **kältetoleranter** und standortoptimierter **Sorghum-Genotypen** (als Ersatz für Silomais)	🟢	0
KlimaFFolgen	**Software-Unterstützung** von Landwirten und BeraterInnen bei der **Fruchtfolgeplanung** unter Klimaaspekten	🟢 🟡	C
CatchHedge	mehr **Hecken in Landschaft etablieren** für Kohlenstoff-sequestrierung und Klimaanpassung	🟢 🟡	B D
Emissionsreduktion entlang der Wertschöpfungskette, einschließlich Ernährungsverhalten			
AVoiD	Eignung der **hermetischen Lagerung** für Getreide (und Hülsenfrüchte) zur Vermeidung Lagerverluste / **Schädlingsbefall**	🟢 (🟣)	B C
ENKL	mögliche Lösungsstrategien für **klimafreundliche Ernährung**; soziale Dimension nachhaltiger Ernährung	🔵 🟣	C
TRIP	Entwicklung **verbesserter Hafer- und Lupinensorten**; Ausdehnung der **pflanzenbasierten Ernährung**	🟢 🟡 🟣	0 C
CaberNET	Hinweise für Weinproduzenten zu **THG-Minderungspotenzialen in der Weinproduktion**	🟢 🟡 🟣	B D

Klimaschutz durch Vernässung von Moorböden und Reduzierung der Torfnutzung			
HoFaTo	Entwicklung von **Torfersatzprodukten** zur Reduzierung von Torf in **Pflanzsubstraten**	🟢	B
MOCOR	Identifizierung von geeigneten ldw. Flächen und Wertschöpfungsketten zur Nutzung von **Paludikulturen als Baustoff**	🟢 🟣	C
RoVer	Handlungsoptionen für die bundesweite **Wiedervernässung** zum **Schutz der Kohlenstoffvorräte** organischer Böden (Moore)	🟢 🔵 🟡 🟣	B D
Nachhaltige Waldbewirtschaftung und Holznutzung			
AnAKHon	Entwicklung **wirksamerer Förderangebote** zur Stärkung der **Kohlenstoff-Senkenleistung von Wäldern**; Klimaanpassung	🟣	C
KLIMAtiv	Alternativen für **Exportrundholz** zur Verringerung des Ausstoßes von **Sulfurylfluorid (SO_2F_2)**, ggf. Abluftreinigung	🟢	D
Klimaschutz in weiteren Landschaftsräumen			
CliMax	Untersuchung von **Stressfaktoren** und Quantifizierung der **Kohlenstoffspeicherung bei Stadtbäumen**	🟢 🔵 🟡	C
WAKS	Effekt auf **CO_2-Emissionen** von Entschlammung zur **Wiedervernässung von Agrargewässern**	🟢 🟡	B C
Solarnützlinge	**Stärkung des Naturhaushaltes bei Agri-PV** und seiner Anpassung an den Klimawandel	(🟢)	
TREND:LR	**Folgenabschätzung** von Klimaschutz auf die Wirtschaft und Lebensverhältnisse in ländlichen Räumen; **Synergien und Zielkonflikte**	🟣	
Fernerkundung für die Treibhausgas-Berichterstattung			
KlimaFern	Verbessertes **Monitoring** von Klimaschutzmaßnahmen in der **landwirtschaftlichen Flächennutzung** für die Klimaberichterstattung	🔵 🟡	
KoBoS	Dynamische **Optimierung von Modellierungsansätze** zur Ableitung von Trends des Kohlenstoffgehaltes ldw. genutzter Böden	🔵 🟡	