

Abschätzung von Treibhausgas-Vermeidungskosten: Methodik und Anwendung am Beispiel eines erhöhten Weidefutteranteils auf rinderhaltenden Betrieben in Österreich

Estimating greenhouse gas abatement costs: method and application using the example of
an increased pasture feed intake on cattle farms in Austria

Christian Fritz*, Florian Grassauer und Georg Terler

Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt Raumberg-Gumpenstein, Irdning-Donnersbachtal, Österreich

*Correspondence to: christian.fritz@raumberg-gumpenstein.at

Received: 31 Dezember 2020 – Revised: 22 April 2021 – Accepted: 15 Juli 2021 – Published: 21 Dezember 2021

Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund von Klimaschutzzielen erstellen viele Länder Treibhausgas-Vermeidungskostenkurven, um zukünftige Maßnahmen hinsichtlich Klima- und Kostenauswirkungen zu vergleichen. Für die österreichische Landwirtschaft liegen bislang keine solchen Auswertungen vor. Ausgehend von einer Literaturübersicht wird die Methodik zur Erstellung von Vermeidungskostenkurven dargelegt. Am Beispiel der Weidehaltung werden die einzelnen Schritte zu Maßnahmenauswahl, Reduktionspotenzial- und Kostenberechnung bis hin zur Interpretation dargestellt. Die Analyse erfolgt unter Berücksichtigung von IPCC-Emissionsfaktoren und Ergebnissen aus Lebenszyklusanalysen, um auch Vorleistungsemissionen abzubilden. Das Treibhausgas-Reduktionspotenzial der Beispielmaßnahme „vermehrte Weidehaltung“ (1,5 bis 5 % mehr Weidefutteraufnahme) beträgt für die Bereiche Wirtschaftsdüngerlagerung, Energiebereitstellung und Vorleistungsemissionen ca. $3\% \pm 2$, die mittleren Vermeidungskosten betragen $65 \text{ €} / \text{t CO}_2$ -Äquivalente. Bis 2050 könnten damit 1 000 kt CO_2 Äquivalente eingespart werden.

Schlagerworte: Treibhausgase, Klimaschutzmaßnahmen, Vermeidungskosten, Weidehaltung, Viehhaltung

Summary

In view of climate protection, many countries use greenhouse gas abatement cost curves to compare prospective measures with regard to climate effects and costs. Such an assessment is not available for Austrian agriculture. The methodology of abatement cost curves is outlined. An application is shown for pasture farming, from definition of goals, measures and reference situation, through the calculation of reduction potential and costs to interpretation. The analysis accounts for IPCC emission factors and data of life cycle analyses to include upstream emissions. The greenhouse gas reduction potential of 1,5 to 5 % more pasture intake is approx. $3\% \pm 2$, the avoidance costs are $-65 \text{ €} / \text{t CO}_2$ -equivalents. This could save 1 000 kt of CO_2 -equivalents by 2050.

Keywords: Greenhouse gases, climate action, abatement costs, pasture grazing, animal husbandry

1 Einleitung

Landwirtschaftliche Treibhausgase und Beiträge zum Klimaschutz sind Gegenstand der gesellschaftlichen, politischen und wissenschaftlichen Diskussion. Wird die landwirtschaftliche Produktion ähnlich wie die industrielle betrachtet, erfordern internationale Emissionszielvereinbarungen auch in der österreichischen Landwirtschaft Einsparungsmaßnahmen. Eine Vermeidungskostenanalyse hilft dabei, möglichst kostengünstige Maßnahmen auszuwählen.

1.1 Landwirtschaftliche Treibhausgase

Die Bewertung der Beiträge von Landwirtschaft und Viehhaltung zur globalen Erwärmung hängt insbesondere von Referenzzeitpunkt/Ausgangsniveau und Abgrenzung zwischen biogen-natürlichen und anthropogen-fossilen Stoffumsätzen ab. Die Methodik der Betrachtung von Treibhausgasminderungsoptionen hat hierauf Bezug zu nehmen. Drei wichtige landwirtschaftliche Treibhausbeiträge – N₂O-Emissionen der Bodenbewirtschaftung, CH₄-Emissionen der Tierhaltung und C-Bilanz der Flächennutzung – entspringen biogenen Prozessen aus De-/Nitrifikation, enterischer Fermentation und Kohlenstoffab-/aufbau in Boden beziehungsweise Biomasse. Die betroffenen Gase haben unterschiedliche atmosphärische Verweilzeiten, und die verwendete Treibhauspotenzialmetrik beeinflusst die Wirkungsabschätzung (Reisinger et al., 2017, Kolstad et al., 2014).

Die Feststellung von sektoralen Treibhausgasemissionen ist auf Modellrechnungen und eine Auswahl von Berechnungsstandards angewiesen. Internationalen Verträgen folgend veröffentlicht Österreich territorial-sektoral zugeordnete Emissionsdaten gemäß IPCC-Richtlinien (Intergovernmental Panel on Climate Change). Diese zeigen Treibhausgasdaten als Produkt von Aktivitätsdaten und Emissionsfaktoren, beispielsweise Tierzahlen und Methanausscheidung pro Tier (Anderl et al., 2020). Die Inventurberichte werden ergänzt mit Projektionsstudien zur Emissionsentwicklung, wobei auf Basis eines ökonomischen Modells (PASMA, Positive Agricultural Sector Model Austria) Aussagen über zu erwartende Aktivitätsdaten generiert werden (Sinabell et al., 2018). Gegenüber dem IPCC-Ansatz berücksichtigen Lebenszyklusanalysen auch Emissionen, die bei Vorleistungen in anderen Sektoren und/oder im Ausland anfallen. Verbunden mit einer hohen Gütereinfuhr liegen diese Werte rund 20 bis 70 % über der nationalen Inventur (Steiningger et al., 2018). Aufgrund internationaler Vertragsverpflichtungen liegt vielen Vermeidungskostenstudien ein territorial-sektoraler Ansatz zu Grunde. Mit Blick auf den globalen Ernährungssektor scheinen hingegen konsum- oder lebenszyklusbasierte Minderungsmaßnahmen erstrebenswert (O'Brien et al., 2014).

1.2 Forschungsstand und Ziel

Für viele Länder liegen landwirtschaftliche Vermeidungskostenanalysen vor, beispielsweise für Frankreich (Pellerin et al., 2017), Irland (O'Brien et al., 2014) und die Schweiz

(Alig et al., 2015a). Als ein Beispiel enthält die französische Studie Vermeidungsgrenzkostenkurven für 26 Maßnahmen betreffend Düngung, Bodenbearbeitung und Fütterung. Für jede Maßnahme wie beispielsweise „N-reduzierte Fütterung“ werden die Wirkmechanismen zur Emissionsänderung, das Reduktions-/Anwendungspotenzial und die Kosten pro Produktionseinheit beschrieben.

Die Methodik für Vermeidungskostenanalysen ist nicht abschließend definiert (Eory et al., 2018), nationale Studien sind Gegenstand methodischer Überarbeitungen (Pellerin et al., 2017), und methodische Fragen zu Treibhausgasbilanzierung und/oder Vermeidungskostenrechnung sind Gegenstand der Forschung (O'Brien et al., 2014; Reisinger et al., 2017). Parallel dazu liegen stärker agronomisch orientierte Studien vor, die näher auf mögliche Minderungsmaßnahmen eingehen (Flessa et al., 2012; Hülsbergen und Rahmann, 2015). Modellbetriebs- und Systemvergleiche zeigen beispielsweise, dass Weidehaltung die Treibhausgasemissionen verringern kann (Alig et al., 2015b; Lorenz et al., 2019). Ein Effekt resultiert aus der verringerten Wirtschaftsdüngerlagerung während der Sommermonate, die mit Treibhausgasemissionen einhergeht, ein anderer aus dem verringerten Energieeinsatz für Futterbergung/-lagerung/-bereitung und Güllelagerung/-ausbringung (Flessa et al., 2012; Hülsbergen und Rahmann, 2015).

In Österreich liegen keine Vermeidungskostenkurven für die Landwirtschaft vor. Eine Berechnung für andere Sektoren zeigt eine Erreichbarkeit der Kyoto-Ziele alleine durch Maßnahmen mit negativen Vermeidungskosten (Wächter, 2013). In der Studie von Schwarz et al. (2013) wurde dem Verkehrssektor „reduzierte Bodenbearbeitung“ zugeordnet und mit Vermeidungskosten von 365 €/t CO₂-Äq (CO₂-Äquivalente) berechnet. Die Kosten einer N-effizienten Fütterung wurden von Pierer et al. (2016) durchschnittlich mit -14 €/kg N für Schweine und -21 €/kg N für Rinder berechnet (Pierer et al., 2016). Darüber hinaus liegen Studien zu Treibhauswirkungen, Minderungsmaßnahmen und Treibhausbilanzen ohne Kostenbetrachtungen vor. Zu den Klimawirkungen einer vermehrten Weidefutteraufnahme sind uns keine österreichischen Studien bekannt.

Ziel des vorliegenden Methodenpapiers ist es, (1) eine Methodik zur Erstellung von Vermeidungsgrenzkostenkurven für die österreichische Landwirtschaft darzulegen und (2) die Berechnung der Vermeidungskosten einer Treibhausgas-Minderungsmaßnahme anhand des Beispiels einer vermehrten Weidefutteraufnahme darzustellen.

2 Methode Treibhausgas-Vermeidungskosten

Treibhausgas-Vermeidungsgrenzkostenkurven zeigen die Emissionsminderung verschiedener Maßnahmen gereiht nach ihren marginalen Kosten. Vermeidungskosten sind definiert als der Quotient der Kostenänderung und der Emissionsänderung pro Produktionseinheit (z.B. ha) gegenüber einem Referenzzustand (Formel 1) (O'Brien et al., 2014; Pellerin et al., 2017):

$$\text{Vermeidungskosten} \left[\frac{\text{€}}{\text{to CO}_2\text{-Äq}} \right] = \frac{\Delta \text{ mittlere jährliche Kosten} \left[\frac{\text{€}}{\text{ha}} \right]}{\Delta \text{ emittierte Treibhausgase} \left[\frac{\text{to CO}_2\text{-Äq}}{\text{ha}} \right]}$$

Zur Ermittlung des Reduktionspotenzials können Aktivitätsdaten mit Emissionsfaktoren bewertet werden und/oder es kann eine prozess-/betriebsbezogene Analyse erfolgen. Die Kosten von Minderungsmaßnahmen werden häufig von der einzelbetrieblichen auf die nationale Ebene hochgerechnet. Die Erstellung von Vermeidungsgrenzkostenkurven erfordert mehrere Schritte (O'Brien et al., 2014; Alig et al., 2015a; Pellerin et al., 2017).

- (1) Zielfestlegung und Auswahl potenzieller Minderungsmaßnahmen
- (2) Ermittlung Referenzsituation, Reduktionspotenzial und Kosten/Erlöse
- (3) Unsicherheitsbewertung, Maßnahmenreihung und Interpretation

2.1 Zielfestlegung und Maßnahmenauswahl

Vermeidungskostenstudien haben initial das Untersuchungsziel festzulegen, wobei zum Teil normative Entscheidungen zu treffen sind. Die Maßnahmendefinition legt fest, in welchen Bereichen, in welchem Ausmaß und für welche Zeiträume Abweichungen des zukünftigen Produktionssystems gegenüber einem Referenzzustand geplant werden. Zentral ist die Unterscheidung produktionstechnischer Einsparungsmaßnahmen von Produktionsmengenanpassungen. Festzulegen ist auch, ob/wie landwirtschaftliche Treibhausgasen, vorgelagerte und verlagerte Emissionen eingehen. Je nach Sektorenabgrenzung werden Emissionen aus Landnutzung und Landnutzungsänderung, Mineräldüngerproduktion, Deseleinsatz aber auch Gutschriften beispielsweise aus Biogasproduktion zugerechnet.

Die Maßnahmenauswahl erfordert die Festlegung von Auswahl- und Ausscheidkriterien wie eindeutige Wirkrichtung, nationale Datenverfügbarkeit und technische Machbarkeit. Häufige Kriterien sind wissenschaftliche Absicherung insbesondere hinsichtlich Evidenz und Einigkeit, die Machbarkeit aus technischen und sozioökonomischen Gesichtspunkten und die politisch-rechtliche Zweckmäßigkeit in Hinblick auf Produktions-, Klima- und Umweltschutzziele. Als Instrument kann ein schrittweises Auswahlverfahren dienen, wobei beispielsweise Expertenworkshops zu dokumentierten Maßnahmenbewertungen führen, die wiederum anhand des Forschungsstandes geprüft werden.

Zu beiden Schritten liegen diverse Grundlagen wie beispielsweise der Nationale Energie- und Klimaplan (NEKP) vor (Alig et al., 2015a; BMNT, 2019; Kirchengast et al., 2019).

2.2 Reduktionspotenziale und Kosten-/Erlöswirkung

Die Reduktionspotenzialbestimmung setzt eine Referenzsituation für die jeweiligen Zieljahre voraus, beispielsweise Milchproduktionsmenge pro Tier, Tierbesatz pro Fläche sowie Produktionstechnik und eingesetzte Futtermittel. An-

hand des Szenarios WEM (with existing measures) liegen Emissionszahlen, Tierzahlen, N-Anfallsmengen, Flächen und Erträge zu ca. 30 Tierkategorien und 30 Ackerkulturen für die Jahre 2020 bis 2050 vor (Sinabell et al., 2018).

Die Abschätzung der Treibhausgas-Reduktionspotenziale umfasst meist die Ermittlung der Einsparungsmenge pro Produktionseinheit (z.B. kg CH₄ pro kg Milch) und des Ausmaßes an betroffenen Einheiten (z.B. Betriebe, GVE). Um nicht nur eine theoretische Abschätzung zu treffen, muss auch das praktische Umsetzungspotenzial berücksichtigt werden. Potenzielle Einflussgrößen wie Emissionsfaktoren, Produktionsstrategien und Bezugsgrößen sollten variiert werden. Um Interaktionen zwischen Maßnahmen zu vermeiden, sollten möglichst isolierte Maßnahmen *ceteris paribus* oder ganze Maßnahmenpakete betrachtet werden.

In betriebswirtschaftlicher Hinsicht legt die Methode der Vermeidungskostenrechnung anhand der Kostenwirkung einer Maßnahme einen Fokus auf die Effizienz. Differenzkostenrechnungen werden angewendet, sofern nur das Produktionsverfahren betroffen ist, Vollkostenrechnungen sofern Investitionen und die Betriebsentwicklung beeinflusst werden (Alig et al., 2015a). Neben Instrumenten der Planungsrechnung und Modellierung sollten auch Betriebsauswertungen in die Analyse miteinfließen. Um Produktionsfaktoren und betriebliche Risiken zu bewerten, werden meist pagatorische und kalkulatorische Kosten einbezogen. Erlöswirkungen aus Mengenänderungen werden ebenso berücksichtigt wie Transaktions- und Informationskosten; positive Erlöswirkungen gehen als negative Kosten ein. Methodisch-operativ wird häufig zu jeder Maßnahme ein Datenblatt mit Annahmen, Modellen, Datenquellen und einer Beschreibung zur Abschätzung von Effekten, Einsparungspotenzial und Kosten beigelegt (Alig et al., 2015a; Pellerin et al., 2017).

2.3 Maßnahmenreihung und Ergebnisbewertung

Für die Erstellung von Vermeidungsgrenzkostenkurven werden die Maßnahmen nach Grenzkosten gereiht. Das Vorliegen unterschiedlicher Treibhausgase erfordert eine Charakterisierung, wofür häufig eine etablierte Treibhauspotenzialmetrik wie das Global Warming Potential über 100 Jahre (GWP₁₀₀) verwendet wird und CO₂-Äq ausgewiesen werden. Die Auswahl einer Metrik ist zu begründen beziehungsweise sollte eine Sensitivitätsanalyse erfolgen (Kolstad et al., 2014; Reisinger et al., 2017). Eine solche empfiehlt sich ohnehin aufgrund von Unsicherheiten beginnend vom Untersuchungsziel bis hin zur Potenzial- und Kostenabschätzung. Mehrere Maßnahmen können gemeinsam in Form einer Vermeidungsgrenzkostenkurve grafisch dargestellt werden.

3 Ergebnisse zur Maßnahme Weidehaltung

Vermehrte Weidehaltung wurde in vielen Studien kontrovers diskutiert, da ehemals ein nachteiliger Einfluss aufgrund eines hohen Weide-N₂O-Emissionsfaktors ange-

nommen wurde (Flessa et al., 2012; Lorenz et al., 2019). Dieser beträgt anhand der aktuellen Studienlage einheitlich 0,006 kg N₂O-N pro kg N für ausgebrachten Wirtschaftsdünger und für Weideausscheidungen (Hergoualc’h et al., 2019).

3.1 Maßnahme und Referenzsituation

National wird vermehrte Weidehaltung beispielsweise im Agrarumweltprogramm und im NEKP angesprochen; in einem Szenarienbericht des österreichischen Umweltbundesamtes wird eine Verdoppelung des Weideanteils für Rinder bis 2050 genannt (Krutzler et al., 2017; BMNT, 2019; Kirchengast et al., 2019). Die vorliegende Definition lautet: „Erhöhung des Anteils an Weidefuttermittelaufnahme betreffend Zeitraum, Tiere und/oder Betriebe in den Bereichen Nachzucht, Milchkühe, Mutterkühe und Mast.“ Die Quantifizierung wird nachfolgend beschrieben.

Die Referenzsituation bildet das WEM-Szenario (siehe Tabelle 1) ergänzt um Produktionsdaten gemäß Klimainventur (Sinabell et al., 2018; Anderl et al., 2020). Der mögliche Umfang der Maßnahmenumsetzung wird ausgehend von der ceteris paribus Bedingung so definiert, dass die produktionstechnischen Grundlagen a priori vorhanden sind. Dies betrifft insbesondere standortklimatisch verfügbare Weidetage, arrondierte Flächen, Fütterung/Zufütterung auf Weide, Melken und Managementkompetenzen zur Weidehaltung beziehungsweise deren Ausbaupotenzial (Stocker, 2005; Steinwidder et al., 2017). Vor diesem Hintergrund wird die Erhöhung in den Bereichen Milchkühe und Mast mit +1,5 %-Punkten und für Nachzucht und Mutterkühe mit +5 %-Punkten angenommen und linear bis 2050 verteilt. Dies entspricht beispielsweise bei 160 Weidetagen +10 %-Punkten an zusätzlichen Weidestunden auf jedem dritten Milchviehbetrieb. Tabelle 1 stellt die Veränderung exemplarisch für Milch- und Mutterkühe dar; es wird eine Verschiebung zulasten der Güllelagerung unterstellt.

3.2 Reduktionspotenzial

Die Wirkung der Weidehaltung ist vielschichtig und steht in Verbindung zu N-Effizienz in Futter- und Düngeanlage-

ment, Rationsgestaltung und Futterwerbungsaufwand. Als Instrument zur Treibhausgasreduktionspotenzialermittlung erfolgt literaturgestützt eine Aufstellung der betroffenen Teilbereiche mit zugehörigen IPCC-Emissionsfaktoren und Studienergebnissen. Tabelle 2 zeigt, dass in den Bereichen Bodenkohlenstoff, Emissionen aus Böden, Zukauffuttermittel und verdaunungsbedingte Emissionen keine Änderung durch die definierte Maßnahme angenommen wird.

Am Wirtschaftsdüngerlager beträgt das errechnete Änderungspotenzial ca. 2 % ± 1 für CH₄- und 4 % ± 3 für direkte N₂O-Emissionen pro Jahr, bezogen auf die Gesamtumsetzung im Jahr 2050. Die Berechnung erfolgte mit Daten gemäß Inventurbericht/WEM-Szenario getrennt nach Tierkategorien, Haltungs- und Düngersystem; das Reduktionspotenzial korrespondiert mit Literaturangaben (Flessa et al., 2012; Hülsbergen und Rahmann, 2015). Die CH₄-Emissionen wurden nach IPCC 2006, Tier 2 mit den Tierzahlen gemäß WEM-Szenario (Sinabell et al., 2018) für alle Tierkategorien berechnet (Formel 2):

$$CH_4 = \text{Tierzahl} * oTM * 365 * B0 * 0,67 * MCF / 100 * \text{Anteil(Gülle, Weide)}$$

Organische Trockenmasse (oTM) und maximale Methanbildungsrate (B0) wurden anhand des nationalen Klimaberichts eingesetzt. Der Methankonversionsfaktor (MCF) wurde für die Sommersituation der Güllelagerung zwischen 8,8 % und 37,2 % variiert und hieraus ein unteres und ein oberes Einsparungspotenzial berechnet; der Konversionsfaktor für Weide beträgt 1 % (Anderl et al., 2020). Die Anteile der Systeme Gülle und Weide wurden gemäß Tabelle 1 eingesetzt. Für die direkten N₂O-Emissionen wurde der Emissionsfaktor mit 0,005 ± 0,003 kg N₂O-N pro kg N-Ausscheidung variiert (Anderl et al., 2020) (Formel 3).

$$N_2O = \text{Tierzahl} * N\text{-Ausscheidungen} * \text{Emissionsfaktor} * 44/28 * \text{Anteil(Gülle, Weide)}$$

Die mittlere Änderung der direkten Energiebereitstellung beziehungsweise des Dieseleinsatzes wird mit 4 % ± 2 abgeschätzt. Eine Differenzrechnung anhand von Standardverfahren/Richtwerten ergibt für 10 % der Jahres-Grassilagebereitung und der Wirtschaftsdüngerarbeiten, bei Variation von Ertrag, Schnitzzahl, Werbetechnik, Mechanisierung,

Tabelle 1: Durchschnittliche Milchleistung pro Kuh und Anteile des Düngeanfalls im Güllelager und auf der Weide 2020 und 2050 mit und ohne der Maßnahme „mehr Weidehaltung“, Beispiel Milch- und Mutterkühe.

	Einheit	2020 WEM	2050 WEM	2050 WEM mit mehr Weidehaltung
Ø Milchleistung pro Kuh	kg/a	7 097	8 787	8 787
Düngeanfall Milchkühe auf Weide	%	3,7	3,7	5,2
am Güllelager	%	54,7	54,7	53,2
Düngeanfall Mutterkühe auf Weide	%	17,8	17,8	22,8
am Güllelager	%	27,9	27,9	22,9

Szenario WEM ... With Existing Measures.

Quelle: Eigene Darstellung, Daten Sinabell et al., 2018; Anderl et al., 2020.

Tabelle 2: Betroffene Teilbereiche, Klimawirkungsmechanismen, Literaturquellen und angenommenes Reduktionspotenzial.

Wirkbereich	Beschreibung	Wirkung	Quelle	Reduktionspotenzial
Bodenkohlenstoff	Kaum Unterschiede (gleiche Nutzungsdensität, gutes Weidemanagement)	$C_{org} =$	Flessa et al., 2012; Spanischberger und Mitterböck, 2015	0
Emissionen aus Böden	Gleicher N-Emissionsfaktor; rasche Belüftung auf Weide → weniger CH_4	$N_2O =$ $CH_4 \approx$	Hülsbergen und Rahmann, 2015; Hergoualc'h et al., 2019	0
Zukauffuttermittel	Ration gleichbleibend und bedarfsgerecht → gleicher Grünlandanteil → keine Veränderung	=	Flessa et al., 2012; Steinwider et al., 2017	0
Verdauungsbedingte Emissionen	Jüngeres Futter senkt CH_4 Höhere Futterqualität und -aufnahme kompensieren zusätzlichen Energiebedarf für Aktivität	$CH_4 =$	Beauchemin et al., 2020	0
Wirtschaftsdüngerlagerung	Weniger Lagerung, weniger Emissionen (Sommermonate)	$CH_4 \downarrow$	Flessa et al., 2012; Hülsbergen und Rahmann, 2015	-2% ±1
		$N_2O \downarrow$		-4% ±3
Energiebereitstellung	Weniger Energie für Futterbergung/Lagerung/Bereitung und Güllelagerung/-ausbringung	Energie↓	Flessa et al., 2012; Hülsbergen und Rahmann, 2015	-4% ±2
Vorleistungsemissionen	Weniger Maschinen und Gebäude	Energie↓	O'Brien et al., 2012; Hülsbergen und Rahmann, 2015	-3% ±2
Gesamtwirkung bis Hoftor	Vorteile eines höheren Weideanteils	Gesamt↓	Alig et al., 2015b; Lorenz et al., 2019	-5%

Quelle: Eigene Darstellung, Details zu Literaturquellen sind in der Tabelle angegeben.

Güllelager- und Düngerausbringungspraxis eine Veränderung von 6 bis 22 l Diesel $a^{-1} ha^{-1}$ beziehungsweise ein Reduktionspotenzial von -3 bis -30 %. (Pöllinger et al., 2018; BAB, 2020). Auch Betriebsauswertungen zeigen eine große Differenz im Kraftstoffbedarf pro Hektar, allerdings einen geringen Einfluss pro Output bei vermehrter Weidehaltung (O'Brien et al., 2012; Hülsbergen und Rahmann, 2015).

Die potenzielle Reduktion in Maschineneinsatz und Gebäuden beziehungsweise die Änderung der Vorleistungsemissionen wurde mit -3 % ± 2 abgeschätzt (O'Brien et al., 2012; Alig et al., 2015b). Hier wirken mögliche induzierte Effekte in Richtung vermehrter Low-input Betriebsstrategien stärker als die direkten Einsparungen. Der betriebliche Gesamttreibhausgasereffekt bei +10 %-Punkten an Weidehaltung wird in der Literatur in einer Größenordnung von -5 % angegeben (Lorenz et al., 2019).

3.3 Vermeidungskosten

Ausgehend davon, dass die betrieblichen Voraussetzungen vorliegen und der Jahresoutput nicht verändert wird, führt vermehrte Weidehaltung zu veränderten Arbeitsverfahren

bezüglich Weidemanagement, Futterwerbung, Fütterung und Düngung. Je nach betrieblicher Ausgangssituation – liegt noch keine Weidehaltung, bereits Stundenweide, Weide mit Zufüttern im Stall vor – bestehen große Unterschiede bei variablen Arbeitskosten, Betriebs-, Instandhaltungs- und Maschinenkosten und auch abnutzungsbeeinflussten Teilen der fixen Kosten. Der undifferenzierte Kostenbeitrag für die betrachtete Weidesteigerung wird anhand der nachfolgenden Literaturdaten mit -100 ± 100 € pro GVE und Jahr veranschlagt.

Gemäß Internetdeckungsbeitragsrechner ist Weidehaltung in Abhängigkeit von Tierkategorie, Ertragslage, Schnittanzahl, Werbetechnik und Weideverfahren bei den variablen Kosten um rund 300 bis 100 € pro ha und Jahr günstiger als Grassilagebereitung (BAB 2020). Betriebsauswertungen und Modellrechnungen in Richtung Vollweide zeigen Vorteile in geringeren Direktkosten von ca. -0,06 bis -0,04 € pro kg Milch und geringeren kalkulatorischen Kosten, und zwar bei kaum reduzierten Erlösen und weniger Arbeitseinsatz im Betriebszweig. Der Ergebnisvorteil liegt in der Größenordnung von € 0,02 bis 0,08 € pro kg Milch (Kirner, 2012; Steinwider et al., 2017; Wolfthaler et al., 2017). Anderer-

seits verweist die Literatur auch auf entgangene Erlöse der Milchvieh-Weidehaltung von 0,01 bis 0,02 € pro kg Milch bis hin zu negativen Wirkungen auf das Betriebszweigergebnis, speziell wenn keine konsequente Low-Input-Weidestrategie umgesetzt wird (Stocker, 2005).

Um die Ergebnisse zu veranschaulichen, erfolgt eine exemplarische Berechnung von absoluten Werten für das Jahr 2030. Hierbei wurden 40 % der sektoralen Kraftstoffverbrennungsemissionen (Anderl et al., 2020) der Rinderhaltung zugeordnet und Vorleistungsemissionen von 720 kt CO₂-Äq pro Jahr angenommen (Steininger et al., 2018). Die Maßnahmenkosten betragen, berechnet über die Jahre 2026-

2050 bei Tierzahlen gemäß WEM-Szenario, durchschnittlich € -2,5 Mio. pro Jahr (Krutzler et al., 2017; Sinabell et al., 2018; Anderl et al., 2020).

Tabelle 3 zeigt die jährlichen Einsparungen durch die Beispielmaßnahme in einzelnen Teilbereichen. Die Einsparungen im Beispieljahr 2030 betragen 20 kt CO₂-Äq bei GWP100. Tabelle 4 vergleicht die Umrechnung von CH₄ und N₂O in CO₂-Äq bei verschiedenen Treibhauspotenzial-Metriken. Eine vermehrte Weidehaltung ist demnach bei einer langfristigen Klimaschutzperspektive kostengünstiger als bei einer kurzfristigen.

Tabelle 3: Angaben zur Wirkung der Maßnahme „Vermehrte Weidehaltung“, Δ bezeichnet den Unterschied mit Maßnahme für die Jahre 2030 und 2050 gegenüber dem Szenario WEM, Treibhausgase CH₄ und N₂O, anteilige CO₂-Äq aus Energieeinsatz/Vorleistungen. CO₂-Äq_{GWP 100}, IPCC 2013. Eigene Berechnung und Darstellung.

Wirkbereich	Position	2030 WEM kt a ⁻¹	Δ 2030 %	Δ 2030 kt a ⁻¹	Δ 2050 %
Bodenkohlenstoff Emissionen aus Böden Zukauffuttermittel				D=0 (vgl. Tabelle 2)	
Wirtschaftsdüngerlager	CH ₄	22,1	0,7 ± 0,5	-0,15 ± 0,07 kt (-5 kt CO ₂ -Äq)	2 % ± 1
	N ₂ O	1,11	1,3 ± 1,0	-0,015 ± 0,01 kt (-4 kt CO ₂ -Äq)	4 % ± 3
Direkte Energie	CO ₂ -Äq	329	1,3 ± 1,3	-4 ± 2 kt	4 % ± 2
Vorleistungen	CO ₂ -Äq	720	1,0 ± 0,7	-7 ± 5 kt	3 % ± 2
Landwirtschaft gesamt	CO ₂ -Äq	8.300	0,2 ± 0,1	-20 ± 12 kt	0,2 % ± 0,1

Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung.

Tabelle 4: Vermeidungskosten bei Variante mittleres Einsparungspotenzial und mittlere Einsparungskosten. Auswirkung unterschiedlicher Treibhauspotenzial-Metriken auf den Effekt der Maßnahme. Umsetzung verteilt auf die Jahre 2026 bis 2050.

Metrik	Faktor CH ₄	Faktor N ₂ O	Summe 2026-2050, mittlere Variante	Vermeidungskosten	Einheit
GWP 20, IPCC 2013 mit Feedback	86	268	1 300 kt	-48 € / t	CO ₂ -Äq _{GWP20}
GWP 100, IPCC 2013 mit Feedback	34	298	1 000 kt	-65 € / t	CO ₂ -Äq _{GWP100}
GWP 500, IPCC 2007	7,6	153	700 kt	-92 € / t	CO ₂ -Äq _{GWP500}

Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung.

5 Fazit

Die dargestellte Methode der Vermeidungskostenrechnung basiert einerseits auf Daten zur zukünftigen Sektorentwicklung und andererseits auf der Erarbeitung geeigneter Einsparungsmaßnahmen. Am Beispiel der „vermehrten Weidehaltung“ wurde eine Erhöhung der Weidestunden (Futtermittelaufnahme und Ausscheidungen) um +1,5 beziehungsweise +5 %-Punkte bis zum Jahr 2050 definiert. Auf Grundlage von IPCC-Emissionsfaktoren, Daten aus Lebenszyklusanalysen und ökonomischen Studien wurden Treibhausgas-Reduktionspotenzial und Kosteneinsparung abgeschätzt. Unter den dargestellten Annahmen zeigen die Berechnungen für das Beispieljahr 2030 ein Reduktionspotenzial von 20 ± 12 ktCO₂-Äq und einen Kostenvorteil in der Höhe von ca. € 2 Mio. auf österreichischen Betrieben. Die Spannweite in Tabelle 4 resultiert bei einer mittleren Variante an Berechnungsparametern aufgrund unterschiedlicher Treibhauspotenzialmetriken. Die Ergebnisse sollen die Methode veranschaulichen, für die Interpretation ist letztlich die Streuung in allen Berechnungsparametern zu bedenken und es sind detailliertere Analysen erforderlich. Dies betrifft beispielsweise die zukünftige Entwicklung der Anteile der Wirtschaftsdüngersysteme, die Emissions- und Konversionsfaktoren, die Annahmen zur konstanten Rationszusammensetzung und die fossilen Energieeinsparungen bei der praktischen Änderung eines Haltungssystems im Bereich der Futterbergung. Ausgehend von einer mittleren Einsparungs-, Kosten- und Klimapolitikvariante könnten in den Jahren 2026 bis 2050 ca. 1 000 kt CO₂-Äq zu Kosten von -65 € / t eingespart werden.

Analog zum dargestellten Beispiel können mit der Methode auch andere Maßnahmen hinsichtlich ihrer Reduktionspotenziale und -kosten bewertet werden, um schließlich eine Vermeidungs-Grenzkostenkurve zu bilden. Neben der Variation von produktionstechnischen Voraussetzungen, Emissionsfaktoren und Vorleistungsdaten beeinflusst auch die verwendete Treibhauspotenzialmetrik das Gesamtergebnis. Zusätzlich zur breiten Faktorvariation bleiben Fragen offen, beispielsweise ob das geplante Umsetzungsausmaß bereits 2030 erreicht werden kann und welche Anreizsysteme zu welchen Kosten für eine nachhaltige Umsetzung bis 2050 geschaffen werden können. Ein Blick auf die dargestellte Kostenwirkung und die landwirtschaftliche Praxis der Weidehaltung zeigt, dass diese ungeachtet ihres potenziellen Kostenvorteils nur mäßig attraktiv ist. Dies dürfte daran liegen, dass Betriebe ihr Augenmerk neben den Produktionskosten auch auf andere Aspekte legen und ein Weidemanagement bei hohen Produktionsleistungen komplexe Anforderungen mit sich bringt. Andererseits könnte die Maßnahme gerade auch vor dem Hintergrund anderer Umweltschutzaufgaben und gesellschaftlicher Erwartungen gezielte Anstrengungen rechtfertigen.

Literatur

- Alig, M., Prechsl, U., Schwitter, K., Waldvogel, T., Wolff, V., Wunderlich, A., Zorn, A. und Gaillard, G. (2015a) Ökologische und ökonomische Bewertung von Klimaschutzmassnahmen zur Umsetzung auf landwirtschaftlichen Betrieben in der Schweiz. *Agroscope Science* 29, Agroscope, Zürich.
- Alig, M., Sutter, M. und Nemecek, T. (2015b) Eco-efficiency of grass-based dairy systems in Switzerland. *Grassland Science in Europe*, 2015, 20, 380-385.
- Anderl, M., Friedrich, A., Gangl, M., Haider, S., Köther, T., Kriech, M., Lampert, C., Mandl, N., Matthews, B., Pazdernik, K., Pfaff, G., Pinterits, M., Poupa, S., Purzner, M., Schieder, W., Schmid, C., Schmidt, G., Schodl, B., Schwaiger, E., Schwarzl, B., Titz, M., Weiss, P., Wieser, M. und Zechmeister, A. (2020) Austria's National Inventory Report 2020. Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol. REP-0724, Umweltbundesamt, Wien.
- BAB (Bundesanstalt für Agrarwirtschaft und Bergbauernfragen) (2020) Internet-Deckungsbeitragsrechner. Bundesanstalt für Agrarwirtschaft und Bergbauernfragen. URL: <https://idb.awi.bmlfuw.gv.at/default.html> (20.04.2021).
- BMNT (Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus) (2019) Integrierter nationaler Energie- und Klimaplan für Österreich. Periode 2021-2030. Gemäß Verordnung (EU) 2018/1999 des Europäischen Parlaments und des Rates über das Governance-System für die Energieunion und den Klimaschutz. BMNT, Wien.
- Eory, V., Pellerin, S., Garcia, G. C., Lehtonen, H., Licite, I., Mattila, H., Lund-Sørensen, T., Muldowney, J., Popluga, D., Strandmark, L. und Schulte, R. (2018). Marginal abatement cost curves for agricultural climate policy: state-of-the art, lessons learnt and future potential. *Journal of Cleaner Production*, 182, 705-716. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.252>
- Flessa, H., Müller, D., Plassmann, K., Osterburg, B., Tetschen, A.-K., Nitsch, H., Nieberg, H., Sanders, J., Meyer zu Hirtlage, O. und Beckmann, E. (2012) Studie zur Vorbereitung einer effizienten und gut abgestimmten Klimaschutzpolitik für den Agrarsektor. Sonderheft 361, Thünen-Institut, Braunschweig.
- Hergoualc'h, K., Akiyama, H., Bernoux, M., Chirinda, N., del Prado, A., Kasimir, Å., MacDonald, J. D., Ogle, S. M., Regina, K. und van der Weerden, T. J. (2019) N₂O emissions from managed soils, and CO₂ emissions from lime and urea application. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Chapter 11 Volume 4: Agriculture. IPCC.
- Hülsbergen, K.-J. und Rahmann, G. (2015) Klimawirkungen und Nachhaltigkeit ökologischer und konventioneller Betriebssysteme: Untersuchungen in einem Netzwerk von Pilotbetrieben. Thünen Report 8, Thünen-Institut, Braunschweig.

- Kirchengast, G., Kromp-Kolb, H., Steininger, K., Stagl, S., Kirchner, M., Ambach, C., Grohs, J., Gutsohn, A., Peisker, J. und Strunk, B. (2019) Referenzplan als Grundlage für einen wissenschaftlich fundierten und mit den Pariser Klimazielen in Einklang stehenden Nationalen Energie- und Klimaplan für Österreich (Ref-NEKP) – Gesamtband. CCCA Wien–Graz, Verlag der ÖAW, Wien.
- Kirner, L. (2012) Wettbewerbsfähigkeit von Vollweidesystemen in der Milchproduktion im alpinen Grünland Österreichs. *Die Bodenkultur* 17, Heft 2-3, 17-27.
- Kolstad, C., Urama, K., Broome, J., Bruvoll, A., Cariño-Olvera, M., Fullerton, D., Gollier, C., Hanemann, W. M., Hassan, R., Jotzo, F., Khan, M. R., Meyer, L. und Mundaca, L. (2014). Social, Economic and Ethical Concepts and Methods. In Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Farahani, E., Kadner, S., Seyboth, K., Adler, A., Baum, I., und Minx, J. C. (Hrsg.), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Cambridge: University Press, 173-248.
- Krutzler, T., Zechmeister, A., Stranner, G., Wiesenberger, H., Gallauner, T., Gössl, M. und Heller, C. (2017) Energie- und Treibhausgas-Szenarien im Hinblick auf 2030 und 2050. Umweltbundesamt, Wien.
- Lorenz, H., Reinsch, T., Hess, S. und Taube, F. (2019) Is low-input dairy farming more climate friendly? A meta-analysis of the carbon footprints of different production systems. *Journal of cleaner production* 211, 161-170. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.113>.
- O'Brien, D., Shalloo, L., Crosson, P., Donnellan, T., Farrelly, N., Finnan, J., Hanrahan, K., Lalor, S., Lanigan, G. und Thorne, F. (2014) An evaluation of the effect of greenhouse gas accounting methods on a marginal abatement cost curve for Irish agricultural greenhouse gas emissions. *Environmental Science & Policy* 39, 107-118. <https://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2013.09.001>.
- O'Brien, D., Shalloo, L., Patton, J., Buckley, F., Grainger, C. und Wallace, M. (2012) A life cycle assessment of seasonal grass-based and confinement dairy farms. *Agricultural Systems* 107, 33-46. <https://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2011.11.004>.
- Pellerin, S., Bamière, L., Angers, D., Béline, F., Benoit, M., Butault, J.-P., Chenu, C., Colnenne-David, C., De Cara, S. und Delame, N. (2017) Identifying cost-competitive greenhouse gas mitigation potential of French agriculture. *Environmental Science & Policy* 77, 130-139. <https://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2017.08.003>.
- Pierer, M., Amon, B. und Winiwarter, W. (2016) Adapting feeding methods for less nitrogen pollution from pig and dairy cattle farming: abatement costs and uncertainties. *Nutrient cycling in agroecosystems* 104, 201-220. <https://dx.doi.org/10.1007/s10705-016-9767-0>.
- Pöllinger, A., Zentner, A., Brettschuh, S., Lackner, L., Amon, B. und Stickler, Y. (2018) Abschlussbericht TIHALO II. Erhebung zum Wirtschaftsdüngermanagement aus der landwirtschaftlichen Tierhaltung in Österreich. BMNT–Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt Raumberg-Gumpenstein, Wien–Irdning-Donnersbachtal.
- Reisinger, A., Ledgard, S. F. und Falconer, S. J. (2017) Sensitivity of the carbon footprint of New Zealand milk to greenhouse gas metrics. *Ecological Indicators* 81, 74-82. <https://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.04.026>
- Schwarz, M., Schmidthaler, M., Goers, S. und Tichler, R. (2013) Measuring greenhouse gas abatement costs in Upper Austria. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 5, 3, 246-266. <https://dx.doi.org/10.1108/IJCCSM-06-2012-0030>
- Sinabell, F., Schönhart, M. und Schmid, E. (2018) Austrian Agriculture 2020-2050. Scenarios and Sensitivity Analyses on Land Use, Production, Livestock and Production Systems. WIFO (Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung), Wien. URL: <https://www.wifo.ac.at/www/pubid/61571> (20.04.2021)
- Steininger, K.W., Munoz, P., Karstensen, J., Peters, G.P., Strohmaier, R. und Velázquez, E. (2018) Austria's consumption-based greenhouse gas emissions: Identifying sectoral sources and destinations. *Global environmental change* 48, 226-242. <https://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.11.011>.
- Steinwider, A., Starz, W., Rohrer, H. und Pfister, R. (2017) Systemvergleich - Einfluss von Vollweide- oder Stallfütterung auf die Milchproduktion im Berggebiet Österreichs. Österreichische Fachtagung für Biologische Landwirtschaft 2017, Raumberg-Gumpenstein, 15-44.
- Stocker, F. (2005) Grenzen der Vollweidehaltung von Milchkühen in Bezug auf Ökonomie und Mensch. Österreichische Fachtagung für biologische Landwirtschaft, 9. und 10. November 2005, Grenzen und Möglichkeiten der Milchproduktion bei Vollweidehaltung. Österreichische Fachtagung für Biologische Landwirtschaft 2005, Raumberg-Gumpenstein, 2633.
- Wächter, P. (2013) The usefulness of marginal CO₂-e abatement cost curves in Austria. *Energy Policy* 61, 1116-1126. <https://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.06.125>
- Wolfthaler, J., Steinwider, A., Frey, H., Hofstetter, P., Gazzarin, C., Kirchwegger, S. und Kantelhardt, J. (2017) Stall- und weidebasierte Milchproduktionssysteme. Modellbetriebsanalysen zur Wirtschaftlichkeit unter österreichischen Produktionsbedingungen. 60. Jahrestagung, Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e. V., Luxemburg, 59-62.