



Umweltbewertung ausgewählter Klimaschutzmassnahmen auf Landwirtschaftsbetrieben

Autorinnen und Autoren

Cédric Furrer, Martin Stüssi, Maria Bystricky

Partner

IP-SUISSE



Impressum

Herausgeber	Agroscope Reckenholzstrasse 191 8046 Zürich www.agroscope.ch
Auskünfte	Cédric Furrer, cedric.furrer@agroscope.admin.ch
Gestaltung	Johan Marmy
Titelbild	Agroforst-Anlage, Foto: Gabriela Brändle
Copyright	© Agroscope 2021
ISSN	2296-729X
DOI	10.34776/as121g

Inhalt

Zusammenfassung	4
Résumé	5
Abstract	6
1 Einleitung	7
2 Auswahl der Massnahmen	8
2.1 Ergänzende Massnahmen zum Punktesystem Klimaschutz	8
2.2 Berücksichtigte Klimaschutzmassnahmen	9
2.3 Nicht berücksichtigte Klimaschutzmassnahmen: Argumente	10
3 Berechnungsmethodik	11
3.1 Allgemein	11
3.2 Modellbetriebe	11
3.3 Systemgrenze, funktionelle Einheit und Inputgruppen	12
3.4 Datenquellen und Modelle	12
3.5 Analyse von Umweltwirkungen	12
3.6 Bewertung der Wirtschaftlichkeit	13
4 Resultate: Bewertung von Einzelmassnahmen	14
4.1 Frequenzumformer Melkanlage	14
4.2 Regelmässiger Ersatz von Mähklingen	18
4.3 Heizen mit Holzpellets	22
4.4 Wärmerückgewinnung Milchkühlung	26
4.5 Leinsamen als Futterzusatz	30
4.6 Gründüngung	34
4.7 Ausbringung von Pflanzenkohle auf das Feld	38
4.8 Agroforstsystem	43
4.9 Recycling von Silofolien	49
5 Einordnung der Massnahmen	53
6 Schlussfolgerungen	55
7 Danksagung	56
8 Abkürzungen	57
9 Verzeichnisse	58
9.1 Abbildungsverzeichnis	58
9.2 Tabellenverzeichnis	60
9.3 Literaturverzeichnis	61
10 Anhang	66
10.1 Verfügbare Studien zur Verfütterung von Pflanzenkohle	66

Zusammenfassung

Mit dem Punktesystem Klimaschutz sollen die Treibhausgasemissionen der IP-SUISSE-Labelbetriebe um 10% gegenüber dem Ist-Zustand gesenkt werden. In einer früheren Arbeit stellten Alig *et al.* (2015) bereits einen Katalog von Klimaschutzmassnahmen für Betriebe zusammen. Bisherige Analysen mit Pilotbetrieben haben gezeigt, dass das Reduktionsziel mit den zurzeit verfügbaren Klimaschutzmassnahmen aus Alig *et al.* (2015) schwierig zu erreichen ist. Eine Erweiterung des Massnahmenkatalogs ist nötig, damit den Landwirtinnen und Landwirten weitere Klimaschutzmassnahmen zur Verfügung stehen und das anvisierte Reduktionsziel erreicht werden kann.

Neun weitere potenziell wirkende Klimaschutzmassnahmen wurden für die Berechnung ausgewählt und die Wirkungen auf die Umwelt ermittelt. Dazu wurde jede Massnahme auf vier Modellbetrieben simuliert. Mittels Ökobilanzmethodik wurden für jede Massnahme die Treibhausgasemissionen auf den einzelnen Modellbetrieben berechnet und mit dem Betrieb ohne Massnahme verglichen. Daraus wurde die theoretische Treibhausgas-Einsparung der einzelnen Massnahmen abgeleitet. Zusätzlich wurden weitere Umweltwirkungen berechnet, um Trade-Offs aufzuzeigen.

Im Durchschnitt wurden mit den Klimaschutzmassnahmen Treibhausgas-Einsparungen von 113 kg bis 10'653 kg CO₂-äq. pro Betrieb erzielt, was 0.03% bis 23.05% der Treibhausgasemissionen eines Betriebs entsprach. Massnahmen im Bereich Pflanzenbau (Agroforstsystem, Ausbringung von Pflanzenkohle auf das Feld, Gründüngungen) erreichten die höchsten Treibhausgas-Einsparungen. Die Treibhausgas-Einsparungen durch Massnahmen im Bereich Energie (Frequenzumformer Melkanlage, Wärmerückgewinnung bei Milchkühlung, Heizen mit Holzpellets, regelmässiger Ersatz von Mähklingen) und im Bereich Tierhaltung (Leinsamen als Futterzusatz, Recycling von Silofolien) waren im Vergleich dazu mehrheitlich geringer.

Basierend auf der Analyse der Unsicherheiten und der Trade-Offs mit anderen Umweltwirkungen können fünf Massnahmen uneingeschränkt für eine Umsetzung auf Landwirtschaftsbetrieben empfohlen werden (Massnahmen im Bereich Energie sowie «Recycling von Silofolien»). Für die restlichen vier Massnahmen im Bereich Tierhaltung und Pflanzenbau existieren erhöhte Unsicherheiten bei den getroffenen Annahmen für die Berechnung und/oder es fanden sich grössere, ungünstige Auswirkungen auf andere Umweltbereiche (Trade-Offs). Diese Massnahmen können nur bedingt für eine Umsetzung in der Praxis empfohlen werden.

Résumé

Le système de points sur la protection du climat a pour but de réduire les émissions de gaz à effet de serre des exploitations labélisées IP-SUISSE de 10 % par rapport à la situation actuelle. Dans une précédente étude, Alig *et al.* (2015) avaient déjà dressé un catalogue de mesures de protection du climat pour les exploitations agricoles. Les analyses précédentes réalisées avec des exploitations pilotes ont montré que l'objectif de réduction est difficile à atteindre avec les mesures de protection du climat actuellement disponibles d'Alig *et al.* (2015). Un élargissement du catalogue de mesures est nécessaire pour que les agricultrices et les agriculteurs puissent disposer d'autres mesures de protection du climat et que l'objectif de réduction visé puisse être atteint.

Neuf autres mesures de protection du climat potentiellement efficaces ont été sélectionnées pour le calcul et leurs effets sur l'environnement ont été déterminés. Pour ce faire, chaque mesure a été simulée dans quatre exploitations modèles. En utilisant la méthode de l'analyse du cycle de vie, les émissions de gaz à effet de serre ont été calculées pour chaque mesure dans les exploitations modèles et comparées à celles de l'exploitation sans mesure. Cette technique a permis de déduire l'économie théorique de gaz à effet de serre obtenue grâce aux différentes mesures. En outre, d'autres impacts environnementaux ont été calculés pour mettre en évidence les compromis.

En moyenne, les mesures de protection du climat ont permis de réduire les émissions de gaz à effet de serre de 113 kg à 10 653 kg d'éq. CO₂ par exploitation, soit 0,03 % à 23,05 % des émissions de gaz à effet de serre d'une exploitation. Les mesures dans le domaine de la production végétale (système agro-forestier, application de biochar sur la parcelle, engrais verts) et la mesure «chauffage avec des granulés de bois» ont permis de réaliser les économies de gaz à effet de serre les plus importantes. Les économies de gaz à effet de serre obtenues grâce à des mesures concernant l'énergie (convertisseur de fréquence de l'installation de traite, récupération de la chaleur pour la réfrigération du lait, remplacement régulier des lames de la faucheuse) et l'élevage (graines de lin comme additif alimentaire, recyclage des films d'ensilage) étaient généralement moindres en comparaison.

Après analyse des incertitudes et des compromis avec d'autres impacts environnementaux, cinq mesures peuvent être recommandées sans restriction aux exploitations (mesures dans le domaine de l'énergie et «recyclage des films d'ensilage»). Pour les quatre mesures restantes, à savoir «application de biochar sur la parcelle», «système agro-forestier», «graines de lin comme additif alimentaire» et «engrais verts», il existe d'importantes incertitudes en ce qui concerne les hypothèses de calcul ou des impacts défavorables majeurs dans d'autres domaines environnementaux (compromis) ont été constatés. Ces mesures ne peuvent être recommandées que de manière limitée pour une utilisation dans la pratique. Les mesures «graines de lin comme additif alimentaire» et «engrais verts» ne peuvent pas être recommandées du point de vue environnemental.

Abstract

The climate protection points system seeks to reduce the greenhouse gas emissions of IP-SUISSE label farms by 10% compared to current levels. In a previous paper, Alig et al. (2015) compiled a catalogue of climate protection measures for farms. Analyses using pilot farms have shown that the reduction target is difficult to achieve with the current climate protection measures from that paper. An extended catalogue of measures is necessary in order to provide farmers with additional climate protection measures and to achieve the envisaged reduction target.

Nine further potentially effective climate protection measures were selected for the calculation and the effects on the environment were determined. To this end, each measure was simulated on four model farms. Using life cycle assessment methodology, the greenhouse gas emissions on the individual model farms were calculated for each measure and compared with the farm without the measure. The results were used to derive the theoretical greenhouse gas savings of each measure. In addition, further environmental impacts were calculated in order to show trade-offs.

On average, the climate protection measures led to greenhouse gas savings of 113 kg to 10,653 kg CO₂ eq. per farm, equivalent to 0.03% to 23.05% of a farm's greenhouse gas emissions. Measures in the area of crop production (agroforestry system, field application of biochar, green manures) and the measure wood pellet heating achieved the highest greenhouse gas savings. In comparison, the savings due to energy measures (milking system frequency converter, heat recovery during milk cooling, regular replacing of mower blades) and animal husbandry measures (linseed as a feed additive, recycling of silo plastic) were generally lower.

Based on the analysis of uncertainties and trade-offs with other environmental impacts, five measures can be recommended unconditionally for implementation on farms (energy measures and recycling of silo plastic). For the remaining four measures (field application of biochar, agroforestry system, linseed as a feed additive, green manures), there are greater uncertainties in the assumptions made for the calculation, or there were larger unfavourable effects on other environmental areas (trade-offs). The latter measures can be recommended only to a limited extent for implementation in practice.

The measures linseed as a feed additive and green manures cannot be recommended from an environmental point of view.

1 Einleitung

Im Rahmen des Projekts „Punktesystem Klimaschutz auf IP-SUISSE-Labelbetrieben – Massnahmen zur Senkung der Treibhausgasemissionen von Landwirtschaftsbetrieben“ entwickelt IP-SUISSE in Zusammenarbeit mit Agroscope ein Punktesystem für den Klimaschutz. Ziel des Punktesystems ist es, die Treibhausgasemissionen der IP-SUISSE-Betriebe mittels klimarelevanten Massnahmen um 10% gegenüber dem Ist-Zustand zu reduzieren.

In einem vorangehenden Projekt "Ökologische und ökonomische Bewertung von Klimaschutzmassnahmen zur Umsetzung auf landwirtschaftlichen Betrieben in der Schweiz" (Alig *et al.* 2015) hat Agroscope im Auftrag von IP-SUISSE die wissenschaftlichen Grundlagen zur Entwicklung dieses Punktesystems erarbeitet. Dazu wurden

- a) Relevante Klimaschutzmassnahmen mit hohem Potenzial bezüglich Treibhausgas-Reduktion und Umsetzbarkeit ausgewählt und detailliert definiert
- b) Das Treibhausgas-Reduktionspotenzial aller ausgewählten Massnahmen inklusive möglicher Synergien und Zielkonflikte zu anderen Umweltwirkungen mittels der Berechnung einer Ökobilanz ermittelt
- c) Für eine Auswahl von Massnahmen deren Wirtschaftlichkeit abgeschätzt.

Im vorliegenden Projekt wird die Praxistauglichkeit des Punktesystems anhand von 32 Pilotbetrieben geprüft. Dabei gaben die Pilotbetriebe an, welche Klimaschutzmassnahmen sie 2016 bereits auf ihrem Betrieb umsetzten und welche sie 2018 zusätzlich umsetzen würden. Es hat sich dabei gezeigt, dass ein Grossteil der Massnahmen aus Alig *et al.* (2015) bereits von den Betriebsleitern umgesetzt worden sind, so dass die Zielerreichung einer Reduktion der Treibhausgasemissionen um 10% auf der Gesamtheit der 10'000 Labelbetriebe mit dem IP-SUISSE Massnahmenkatalog aus Alig *et al.* (2015) ambitiös erschien. Die im Punktesystem bisher verfügbaren Massnahmen sind daher für das festgelegte Reduktionsziel von 10% vermutlich nicht ausreichend.

Unter Berücksichtigung zahlreicher Quellen erstellte das Projektteam als Ergänzung zum Massnahmenkatalog in Alig *et al.* (2015) eine Liste mit weiteren möglichen Klimaschutzmassnahmen. Diese möglichen zusätzlichen Massnahmen wurden basierend auf den Besprechungen und den Inputs eines Expertenworkshops im Jahr 2019 sortiert und priorisiert. Neun zusätzliche Massnahmen wurden zur Berechnung ausgewählt. Ziel des vorliegenden Berichts ist die Ermittlung des Treibhausgas-Reduktionspotenzials dieser neun Massnahmen bei einer Umsetzung auf Landwirtschaftsbetrieben sowie der sich ergebenden Synergien oder Trade-Offs mit anderen Umweltwirkungen. Wie in Alig *et al.* (2015) erfolgte zudem eine Analyse der Wirtschaftlichkeit für einzelne ausgewählte Massnahmen.

2 Auswahl der Massnahmen

2.1 Ergänzende Massnahmen zum Punktesystem Klimaschutz

Zur Ergänzung des Massnahmenkatalogs des Punktesystems Klimaschutz wurden zusätzliche Ideen für Klimaschutzmassnahmen über diverse Kanäle gesammelt. Die Ideensammlung aus Alig *et al.* (2015), Austausch mit verschiedenen Organisationen und anderen Klimaschutzprojekten (u.a. AgroCleanTech, AgroCO₂ncept, Aaremilch), sowie Rückmeldungen der 32 Pilotbetriebe sind alle in die Sammlung weiterer Klimaschutzmassnahmen eingeflossen.

Die gesammelten Ideen wurden im Rahmen eines Expertenworkshops¹ nach den Kriterien geschätztes Reduktionspotenzial sowie praktische, zeitliche und finanzielle Umsetzbarkeit beurteilt. Die Experten gaben zudem an, welche Massnahmen sie weiterverfolgen würden, um den Massnahmenkatalog zu ergänzen. Daraus leitete IP-SUISSE in Zusammenarbeit mit Agroscope eine Priorisierung ab (Tabelle 1).

Tabelle 1: Liste möglicher Klimaschutzmassnahmen und Priorisierung für die weitere Analyse.

Themenbereich	Name der Klimaschutzmassnahme	Priorität
Energie	Wärmerückgewinnung aus Milchkühlung	1
Energie	Einsatz von Schweizer Holz anstatt Beton beim Bauen	1
Energie	Sonnendach zur Dürrfutterbelüftung	2
Energie	Frequenzumformer bei Melkmaschinen, Heubelüftungen, Stalllüftungsventilatoren	2
Energie	Einsatz von elektrischen Fahrzeugen in Kombination mit Strom aus erneuerbaren Energiequellen	3
Energie	Reifendruckregulierung auf Feld und Strasse	3
Energie	Regelmässiges Reinigen von Kühler und Luftfilter der Maschinen	3
Energie	Regelmässiger Ersatz der Klingen des Mähwerks	3
Energie	Regelmässiges Warten von Traktoren oder selbstfahrenden Maschinen (z.B. alle 2 Jahre)	3
Pflanzenbau	Ausbringung von Pflanzenkohle (Fütterung, Stall, Feld)	1
Pflanzenbau	Agroforstsysteme (verschiedene Systeme)	1
Pflanzenbau	Anbau von Gründüngungen	1
Pflanzenbau	Anbau von Zwischenfutter	1
Pflanzenbau	Einsatz von Gülle- und Mistzusätze	2

¹ Expertinnen und Experten von IP-SUISSE, Agroscope, ETHZ, BLW, HAFL, Inforama Rütli Zollikofen, Ökostrom Schweiz und BBZ Arenenberg

Pflanzenbau	Humusaufbau und Kohlenstoff-Speicherung durch Kompost	2
Pflanzenbau	Anbau von Untersaat	3
Pflanzenbau	Anbau von Kunstwiese	3
Tierhaltung	Einsatz von Leinsamen als Futterzusatz	1
Tierhaltung	Sauberhalten der Laufflächen alle 2 Stunden mittels 3% Gefälle, Harnrinne und durch einen Schieber	2
Tierhaltung	Saubere Laufflächen: weitere (z.B. Dusche beim Auslauf, welche alle 30 Minuten für 3 Minuten läuft)	2
Tierhaltung	Folienrecycling	2
Tierhaltung	Weidehaltung	3

2.2 Berücksichtigte Klimaschutzmassnahmen

Aus den Massnahmen erster Priorität (Tabelle 1) wurden, bis auf die Massnahme «Einsatz von Schweizer Holz anstatt Beton beim Bauen», alle Massnahmen für die weitere Analyse ausgewählt.

Alig *et al.* (2015) haben die Massnahmen **Pflanzenkohle**, **Agroforstsystem** und **Gründüngung** bereits berechnet. Diese wurden für die neue Berechnungsrunde aber erneut aufgeführt, weil im Fall der Pflanzenkohle neue Daten für das Pyrolyseinventar zur Verfügung standen und die Massnahme in Alig *et al.* (2015) nur exemplarisch auf einem der vier Modellbetriebe berechnet wurde. Für das Agroforstsystem sollte ein zweites System berechnet werden, neben der Kombination von Obst und Ackerbau. Bei der Gründüngung wurde die Konkurrenz zur Futterproduktion überprüft. Da Zwischenfrüchte entweder als Gründüngungen oder als Zwischenfutter genutzt werden, wurden der Anbau von Zwischenfutter und von Gründüngungen direkt miteinander verglichen.

Aus den Massnahmen zweiter und dritter Priorität wurden folgende Massnahmen für die weitere Analyse ausgewählt:

- **Frequenzumformer Melkanlage:** Eine Massnahme mit guter Umsetzbarkeit. Da es eine technische Massnahme ist, wurden die zu erwartenden Unsicherheiten der Berechnungen als tief eingeschätzt.
- **Recycling von Silofolien:** Eine Technologie, welche verfügbar ist und eingesetzt wird, aber noch nicht weit verbreitet ist.
- **Regelmässiger Ersatz von Mähklingen:** Eine Massnahme, die sehr breit auf vielen Betrieben eingesetzt werden kann und in der Umsetzung verhältnismässig einfach und kostengünstig ist. Da es ebenfalls eine technische Massnahme ist, wurden die zu erwartenden Unsicherheiten auch hier als tief eingeschätzt.

Im Verlauf des Projekts zeigte sich aufgrund der Rückmeldung von Pilotbetrieben weiterer Bedarf im Bereich Heizen mit Holz. Stückholz und Hackschnitzel waren bereits als Massnahme im Punktesystem Klimaschutz integriert. Dies sollte um Holzpellets ergänzt werden, weshalb **Heizen mit Holzpellets** ebenfalls in den vorliegenden Bericht aufgenommen wurde (Kapitel 4.3).

2.3 Nicht berücksichtigte Klimaschutzmassnahmen: Argumente

Folgende Massnahmen wurden aus unterschiedlichen Gründen nicht weiterverfolgt:

- **Einsatz von Schweizer Holz anstatt Beton beim Bauen:** Es hat sich gezeigt, dass für die Berechnung eine Reihe neuer Ökoinventare für die Gebäude notwendig wären. Dies hätte viele detaillierte Daten über Gebäude benötigt. Schliesslich wurde die Massnahme zurückgestellt, weil der Erhebungsaufwand in der Umsetzung als nicht praktikabel beurteilt wurde.
- **Einsatz von elektrischen Fahrzeugen in Kombination mit Strom aus erneuerbaren Energiequellen:** Aufgrund der Ähnlichkeit mit bereits untersuchten Massnahmen (Bezug von Ökostrom, Verminderung des Treibstoffbedarfs) wurde diese Massnahme nicht ausgewählt, auch wenn eine Berechnung als gut machbar beurteilt wurde.
- **Einsatz von Gülle- und Mistzusätzen:** Eine Vielzahl von Zusätzen stehen zur Debatte (z.B. Gesteinsmehle oder Zusätze auf Basis von Mikroorganismen), ihre Wirksamkeit bezüglich Treibhausgasreduktion liess sich aber oftmals wissenschaftlich nicht oder nicht genügend bestätigen (Honisch 2009). Bei wirksamen Methoden wie der Gülleansäuerung (Stierli 2016; Kupper 2017) oder Gips als Güllezusatz (Model et al. 2006; Verges et al. 2013) bestehen Unsicherheiten und Bedenken in Bezug auf deren Umsetzbarkeit.
- Neben dem Einsatz von Frequenzumformern in der Melktechnik werden **Frequenzumformer ebenfalls für die Regelung der Belüftungstechnik** auf Landwirtschaftsbetrieben, insbesondere bei Ventilatoren für die Stallklimatisierung und bei der Heubelüftung, verwendet (Henzen et al. 2012). Mangels wissenschaftlich abgesicherter Studien über die eingesparte Energie wurde diese Massnahme nicht weiterverfolgt.
- **Humusaufbau und Kohlenstoff-Speicherung durch Kompost:** Es existieren Unsicherheiten in Bezug auf die Emissionen bei der Kompostierung und darüber, ob die Kohlenstoff-Speicherung im Boden wirklich langfristig wäre.
- **Saubere Laufflächen:** Diese Massnahme wurde in Alig *et al.* (2015) bereits berechnet, mit dem Ergebnis, dass sich das Treibhauspotenzial insgesamt erhöhte statt sich zu reduzieren. Dies war eine Folge davon, dass durch den höheren Stickstoffgehalt im Hofdünger die Lachgasemissionen bei der Ausbringung der Hofdünger überproportional zunahm. Die Erwartungen, bei einer Neuberechnung ein anderes Ergebnis mit einem guten Reduktionspotenzial zu erhalten, wenn weitere Bedingungen miteinbezogen werden, wie beispielsweise die Anpassung der Hofdüngermengen an die durch die Massnahme veränderten Stickstoff (N)-Gehalte (Alig *et al.* 2015), wurden als unsicher beurteilt.
- **Sonnendach zur Dürrfutterbelüftung:** Diese Massnahme wurde in diesem Projekt berechnet, auf Modellbetrieben fielen die Treibhausgaseinsparungen jedoch geringer aus als der Aufwand zur Herstellung eines Sonnendachs, sodass insgesamt keine Reduktion erzielt wurde. Die Massnahme wurde folglich nicht weiterverfolgt.

3 Berechnungsmethodik

3.1 Allgemein

Die Berechnungen und die Analyse von Umweltwirkungen der zusätzlichen Massnahmen erfolgte analog zu den bereits berechneten Massnahmen aus Alig *et al.* (2015) mit der SALCA-Methodik (Swiss Agricultural Life Cycle Assessment) und den dazugehörigen Tools. Die Detailinformationen sind im Bericht Alig *et al.* (2015) aufgeführt. In diesem Kapitel werden die grundlegenden Aspekte der Berechnungsmethodik kurz erläutert. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf den inhaltlichen Änderungen zwischen der Berechnungsmethodik aus Alig *et al.* (2015) und dieser Studie.

3.2 Modellbetriebe

Für die Berechnung der Massnahmen wurden analog zu Alig *et al.* (2015) theoretische Modellbetriebe aus dem Projekt ZA-ÖB verwendet (Hersener *et al.* 2011). Diese Modellbetriebe repräsentieren jeweils einen Betriebstyp, welcher sich aus dem Durchschnitt von verfügbaren Betriebsdaten ergibt (Hersener *et al.* 2011). Vier von insgesamt 37 Modellbetrieben wurden aufgrund ihrer unterschiedlichen Produktionsausrichtung zur Berechnung der Klimaschutzmassnahmen ausgewählt: Ackerbau ÖLN (Ackbau), Verkehrsmilch Tal ÖLN (VrkMilch), Anderes Rindvieh Tal ÖLN (AndRind) und Schweine ÖLN (Schwein). Alle vier ausgewählten Betriebe verfügen über landwirtschaftliche Nutzfläche, welche sich zu unterschiedlichen Anteilen in Ackerfläche, Kunstwiese und Dauergrünland unterteilt. Ebenso werden auf allen ausgewählten Modellbetrieben Tiere gehalten. Detaillierte Beschreibungen sowie ermittelte Treibhauspotenziale (Referenzwerte ohne Umsetzung einer Klimaschutzmassnahme) zu den vier verwendeten Modellbetrieben sind in Alig *et al.* (2015) aufgeführt und werden hier nicht genauer erläutert.

Tabelle 2: Kennzahlen zu den vier verwendeten Modellbetrieben

	Ackerbau	Verkehrsmilch	Anderes Rindvieh	Schweine
LN [ha]	24.4	20.2	14.6	16.0
davon % Ackerfläche	82	12	20	10
davon % Kunstwiese	5	19	15	18
davon % Dauergrünland	13	68	65	72
Viehbesatz [GVE/ha]	0.3	1.6	0.7	3.1
Anzahl Milchkühe	1.9	26.5	3.9	12.9
Anzahl Mastschweine	3.7	4.3	0.0	121.4
Ausbringung von Stickstoff [kg/ha]	125	159	114	156
Zufuhr von Kraftfutter [kg FS/ha]	378	1'374	489	7'258
Output verdaulicher Energie [MJ]	1'092'970	572'234	146'199	859'528

3.3 Systemgrenze, funktionelle Einheit und Inputgruppen

Analog zu Alig *et al.* (2015) wurden «sämtliche auf dem Betrieb durchgeführte landwirtschaftliche Tätigkeiten sowie die eingesetzten Produktionsmittel (z. B. Diesel, Mineraldünger, Pestizide) bilanziert». Für die Bilanzierung wurde ein Zeitrahmen von 1 Kalenderjahr festgelegt.

Als funktionelle Einheit diente die «gesamte durch den Betrieb produzierte Menge an verdaulicher Energie (vE) für die menschliche Ernährung in Megajoule (MJ)» (Alig *et al.* 2015) mit dem Ziel, «die gesamte landwirtschaftliche Produktion (pflanzliche und tierische Produkte sowie produzierte Futtermittel) in einer Grösse auszudrücken» (Alig *et al.* 2015). Dies ermöglichte es, die berechneten Massnahmen innerhalb der vier ausgewählten und unterschiedlich grossen Modellbetriebe miteinander zu vergleichen.

Zur besseren Übersicht und Interpretation der Umweltwirkungen wurden die Produktionsmittel und -prozesse in «Inputgruppen» zusammengefasst. Diese Inputgruppen zeigen auf, welche Produktionsmittel und -prozesse einen Einfluss auf Umweltwirkungen haben.

3.4 Datenquellen und Modelle

Die direkten Emissionen der Modellbetriebe wurden mit den SALCA-Modellen berechnet (Gaillard und Nemecek 2009). Ökoinventare zur Bestimmung von Emissionen aus vorgelagerten Stufen wurden der SALCA-Datenbank (Nemecek *et al.* 2010) sowie der Datenbank ecoinvent V3.5 (Wernet *et al.* 2016) entnommen. Für die Massnahme Agroforstsystem wurden zudem Inventare von AGRIBALYSE V1.1 (Koch und Salou 2014) verwendet und angepasst. Das Ökoinventar für einen Frequenzumformer an der Melkanlage wurde neu erstellt. Die Daten dafür sind aus einem Bericht des Bundesamtes für Energie entnommen (Bundesamt für Energie 2013). Für die Produktion von Pflanzenkohle wurde ein neues Ökoinventar basierend auf der Literatur aus Bergman *et al.* (2016) erstellt. Für die Ausgestaltung und Berechnung der Massnahmen wurden zahlreiche weitere Zahlen und Informationen verwendet und/oder Annahmen getroffen, welche in den jeweiligen Unterkapiteln von Kapitel 4 angegeben und erläutert sind.

3.5 Analyse von Umweltwirkungen

Für die Analyse der Umweltwirkungen der Massnahmen wurden die gleichen Wirkungskategorien wie in Alig *et al.* (2015) verwendet (Tabelle 3). Die Umweltwirkungen werden dabei in ressourcenbezogene, nährstoffbezogene und schadstoffbezogene Umweltwirkungen kategorisiert (Rossier und Gaillard 2004; Nemecek *et al.* 2005; Nemecek und Gaillard 2007). Detaillierte Informationen zu den betrachteten Wirkungskategorien finden sich in Alig *et al.* (2015).

Tabelle 3: Betrachtete Wirkungskategorien

Ressourcenbezogene Umweltwirkungen	Nährstoffbezogene Umweltwirkungen	Schadstoffbezogene Umweltwirkungen
Bedarf an nicht erneuerbaren Energieressourcen (MJ-Äq.)	Terrestrisches Eutrophierungspotenzial (m ²)	Aquatische und Terrestrische Ökotoxizität (kg 1,4-DB-Äq.)
Treibhauspotenzial über 100 Jahre (kg CO ₂ -Äq.)	Aquatisches Eutrophierungspotenzial N (kg N)	Humantoxizität (kg 1,4-DB-Äq.):
Ressourcenbedarf Phosphor (kg P)	Aquatisches Eutrophierungspotenzial P (kg P)	
Ressourcenbedarf Kalium (kg K)	Versauerungspotenzial (m ²):	
Flächenbedarf (m ² a)		
Abholzung (m ²)		
Wasserbedarf (m ³)		

Das Ziel des Projekts liegt auf der Einsparung von Treibhausgasemissionen, darum wurde speziell ein Fokus auf die Wirkungskategorie Treibhauspotenzial (IPCC GWP 100a) gelegt (gemessen in kg CO₂-Äq.). Zur Berechnung der Umweltwirkungen wurde die Methode SALCA V1.12 verwendet.

Die Berechnung der Wirkung einer Massnahme erfolgte analog der Methodik aus Alig *et al.* (2015). Auf vier Modellbetrieben wurden pro Massnahme jeweils zwei Ökobilanzen erstellt. Die erste Ökobilanz bildete den Modellbetrieb ab, welcher die Massnahme umsetzt. Die zweite Ökobilanz bildete den Modellbetrieb ab, welcher die Massnahme nicht umsetzt. Die Wirkung einer Massnahme wurde dann aus der Differenz der beiden Ökobilanzergebnisse abgeleitet.

3.6 Bewertung der Wirtschaftlichkeit

Eine Bewertung der Wirtschaftlichkeit wurde punktuell für die beiden Massnahmen «Frequenzumformer Melkanlage» und «Regelmässiger Ersatz von Mähklingen» durchgeführt. Wie in Alig *et al.* (2015) war das Ziel der ökonomischen Untersuchung, «*die Kosten der Umsetzung von Klimaschutzmassnahmen zu ermitteln*». Die Bewertung folgt der Methodik aus Alig *et al.* (2015). In beiden Fällen wurden die Massnahmen anhand eines Vergleichs bewertet, welcher «*alle relevanten pagatorischen und kalkulatorischen Kosten*» in die Berechnung miteinbezieht (Alig *et al.* 2015). Als Ausgangspunkt für die Analyse der Wirtschaftlichkeit wurden «*die von der Ökobilanz getroffenen Annahmen bzw. Festlegungen verwendet*» (Alig *et al.* 2015).

Für die Massnahme «Frequenzumformer Melkanlage» wurden die Kosten aus dem eingesparten Strom der Anschaffung bzw. Investition eines Frequenzumformers gegenübergestellt und so die Amortisation berechnet. Für die Massnahme «Regelmässiger Ersatz von Mähklingen» wurden die Kosten aus der Dieseleinsparung mit den Kosten des Kaufs neuer Klingen verglichen.

4 Resultate: Bewertung von Einzelmassnahmen

In diesem Kapitel werden die Resultate aus den Berechnungen der neun ausgewählten Massnahmen präsentiert. Die Ausgestaltung und die Informationen zu den getroffenen Annahmen für die Berechnungen jeder Massnahme sind jeweils im Unterkapitel «Beschreibung der Massnahme» beschrieben. Die Unterkapitel «Erzielte Reduktion des Treibhauspotenzials und weitere Umweltwirkungen» geben die Resultate aus der Wirkungsabschätzung der Massnahmen wieder. Für jeden Modellbetrieb ist die Reduktion der Treibhausgasemissionen in einem Graphen auf Betriebsebene und einem Graphen pro Einheit Megajoule verdaulicher Energie (MJ VE) aufgeführt. Ein weiterer Graph zeigt die durch die umgesetzten Massnahmen verursachte prozentuale Veränderung aller betrachteten Wirkungskategorien resp. weiteren Umweltwirkungen. Im Unterkapitel «Diskussion» werden die getroffenen Annahmen sowie die erzielten Resultate für jede zusätzliche Massnahme in einen grösseren Kontext gestellt. Für die Massnahmen «Frequenzumformer Melkanlage» und «Regelmässiger Ersatz von Mähklingen» wird ausserdem eine Aussage zur Wirtschaftlichkeit abgegeben.

4.1 Frequenzumformer Melkanlage

4.1.1 Beschreibung der Massnahme

Ohne Drehzahlregelung an der Vakuumpumpe liefert diese während des Melkvorgangs ständig das Maximum ihrer Leistung. Es wird also auch dann ein hohes künstliches Vakuumniveau erzeugt, wenn dieses nicht unbedingt benötigt wird (z.B., wenn die Melkbecher zwecks Reinigung des Kuheuters oder beim Anrüsten des nächsten Kuheuters abgehängt werden).

Mit einer Drehzahlregelung über einen Frequenzumformer erkennt ein installierter Sensor zwischen der Vakuumpumpe und dem Melkbecher jeweils das wirklich benötigte Vakuumniveau und meldet diese Information an den Frequenzumformer zurück. Je nach Information steuert der Frequenzumformer das Vakuumniveau durch eine Variierung der Drehzahl der Pumpe. Dadurch wird die Leistung der Vakuumpumpe optimiert. Versuche haben gezeigt, dass im Vergleich zu einer Vakuumpumpe ohne installierten Frequenzumformer je nach Hersteller und Typ der Vakuumpumpe sowie des Frequenzumformers zwischen 50% und 80% Energie eingespart werden können (Hubal 2012).

Die Treibhausgasreduktion dieser Massnahme beruht auf der Einsparung von Strom (Schweizer Strommix) mittels einer Leistungsoptimierung der Vakuumpumpe durch die Installation eines Frequenzumformers.

Für jeden Modellbetrieb wurde basierend auf der Anzahl Milchkühe die Zeit für den Melkvorgang berechnet (Schick 2000). Der Energieverbrauch der Vakuumpumpe (in Kilowattstunden/kWh) wurde aus der Melkdauer (in Stunden/h) und der Leistung der Vakuumpumpe (in Kilowatt/kW, Hubal 2012) berechnet. Für das Energieeinsparungspotenzial wurde der Mittelwert von 61.5% aus der minimal (53%) und maximal (74%) gemessenen Energieeinsparung aus dem Versuch von Hubal (2012) verwendet.

Um das Ökoinventar für den Frequenzumformer zu erstellen, wurden Daten eines Frequenzumformers bei E-Bikes verwendet (Schweizerische Agentur für Energieeffizienz 2014). Die Lebensdauer des Frequenzumformers wurde auf 16 Jahre festgelegt. Die entsprechenden Kennzahlen zur Berechnung der Massnahme sind in Tabelle 4 gegeben.

Tabelle 4: Kennzahlen der Massnahme «Frequenzumformer Melkanlage»

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schwein
Anzahl Milchkühe	1.9	26.5	3.9	12.9
Melkdauer [min/GVE ² und Tag]	11.0	9.7	10.9	10.5
Leistung Vakuumpumpe [kW]	4.5	4.5	4.5	4.5
Reduktion Strombedarf [kWh/Jahr]	214.3	2'641.9	437.7	1'387.2

4.1.2 Erzielte Reduktion des Treibhauspotenzials und weitere Umweltwirkungen

Mit der Installation eines Frequenzumformers erzielten die Modellbetriebe Treibhausgasreduktionen von 34.8 kg CO₂-Äq bis 444.6 kg CO₂-Äq (Tabelle 5), abhängig von der Anzahl gemolkener Kühe und der daraus folgenden Dauer des Einsatzes der Vakuumpumpe. Der Referenzwert, also das von einem Modellbetrieb ermittelte Treibhausgaspotenzial ohne Umsetzung einer Klimaschutzmassnahme, ist in Alig *et al.* (2015) dargestellt und wird in diesem Bericht nicht erneut aufgeführt. Der Verkehrsmilchbetrieb erreichte mit 0.17% die grösste Reduktion seines betrieblichen Treibhauspotenzials (THP) (Abbildung 1). Die Änderung des Treibhauspotenzials setzt sich aus einer Abnahme des Stromverbrauchs (Kategorie «Energieträger auf Hof) und der Herstellung eines Frequenzumformers (Kategorie «Gebäude und Einrichtungen») zusammen. Die Treibhausgasemissionen bei der Herstellung des Frequenzumformers sind relativ zu der Einsparung durch die Abnahme des Stromverbrauchs gering.

Bezogen auf die vom Betrieb erzeugten Megajoule verdaulicher Energie (MJ VE) betragen die Einsparungen 0.03 bis 0.8 g CO₂-Äq/MJ VE resp. 0.03% bis 0.17% (Tabelle 5).

Neben dem Treibhauspotenzial senkte die Massnahme weitere Umweltwirkungen wie den gesamtbetrieblichen Energiebedarf. Da mit der Massnahme weniger Strom aus Wasserkraft produziert wird, reduzierte dies ausserdem den Wasserbedarf. Ein Rückgang der bei der Braunkohleproduktion anfallenden Abfallstoffe führte zu geringeren Phosphoreinträgen in die Umwelt (aquatische Eutrophierung P) und einer tieferen aquatischen Ökotoxizität (Abbildung 3). Einflüsse auf weitere Umweltwirkungen waren klein und vernachlässigbar.

Tabelle 5: Treibhausgasreduktion der Massnahme «Frequenzumformer Melkanlage»

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schwein
Eingesparte Treibhausgase, Gesamtbetrieb [kg CO ₂ -Äq.]	-34.8	-444.6	-72.5	-232.8
Eingesparte Treibhausgase pro erzeugte Megajoule verdaulicher Energie [g CO ₂ -Äq./MJ VE]	-0.03	-0.8	-0.6	-0.5

² Grossvieheinheit

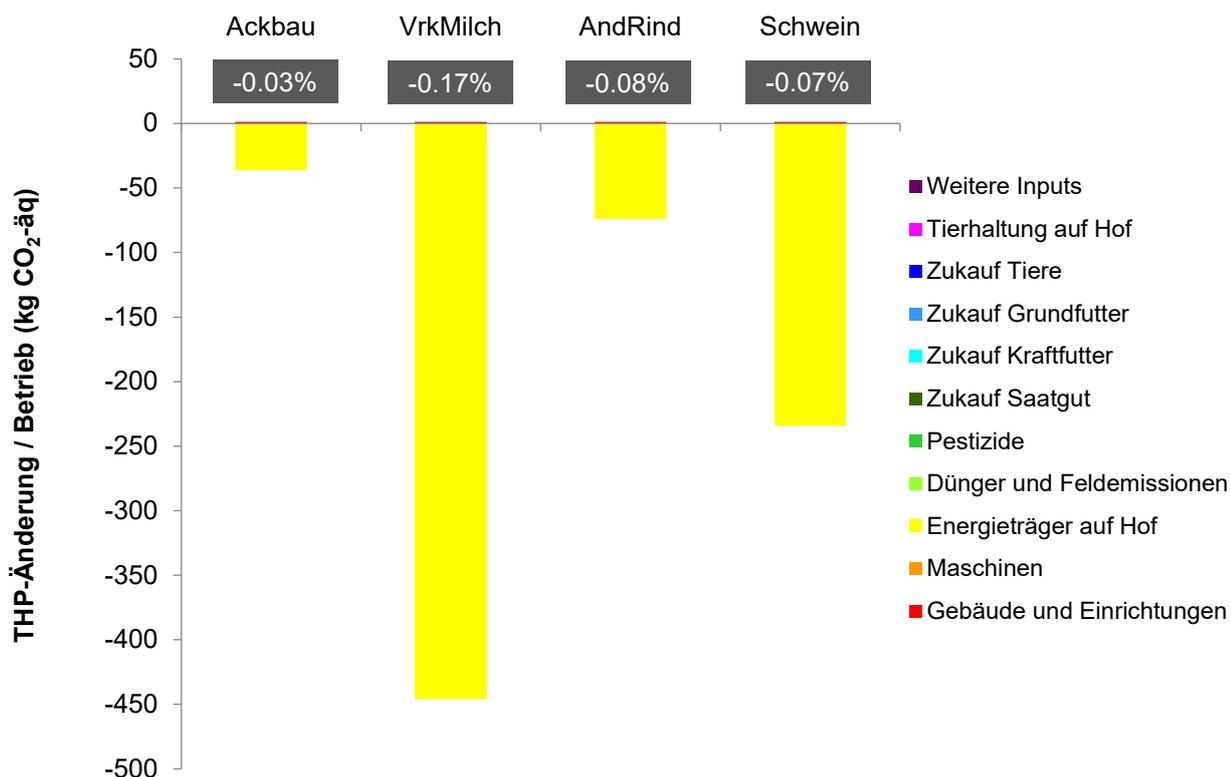


Abbildung 1: Änderung des Treibhauspotenzials der Modellbetriebe bei Umsetzung der Massnahme «Frequenzumformer Melkanlage».

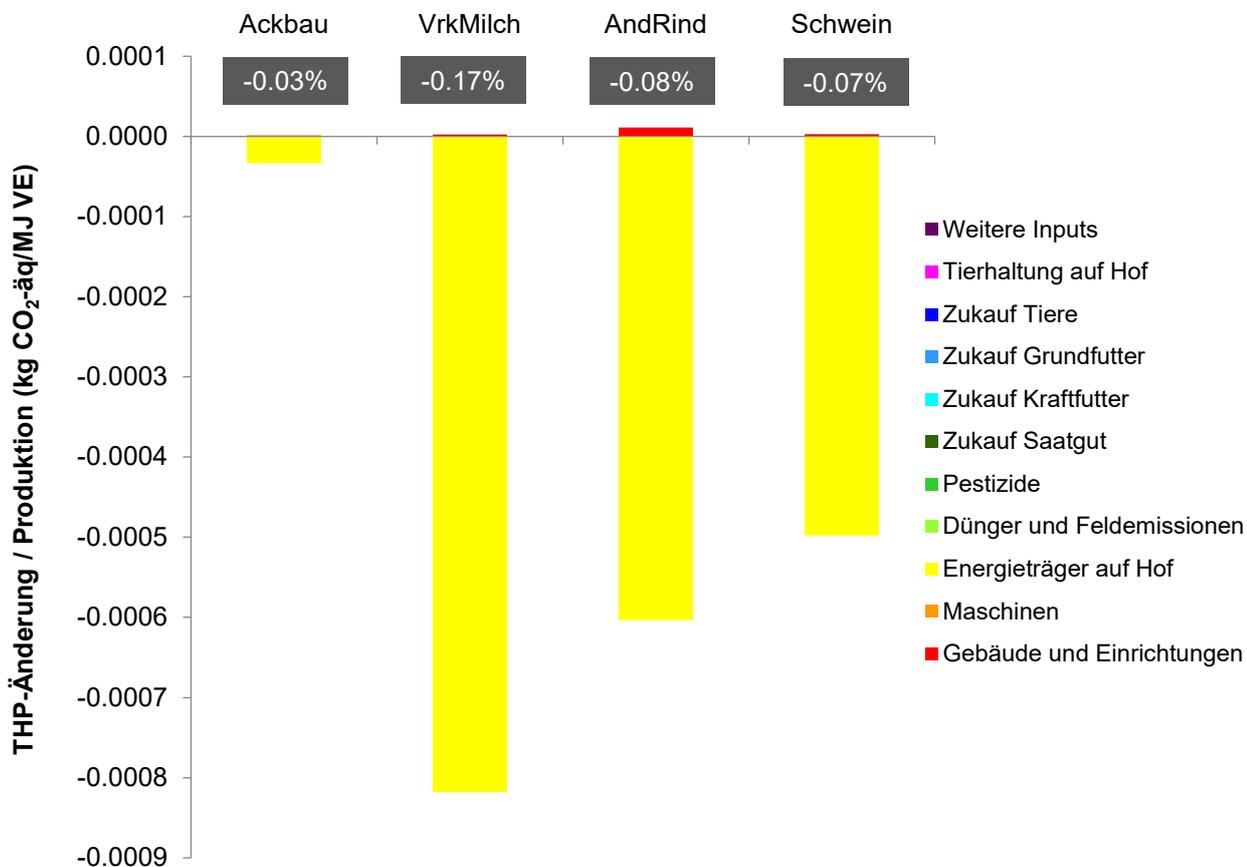


Abbildung 2: Änderung des Treibhauspotenzials pro MJ VE der Modellbetriebe bei Umsetzung der Massnahme «Frequenzumformer Melkanlage».

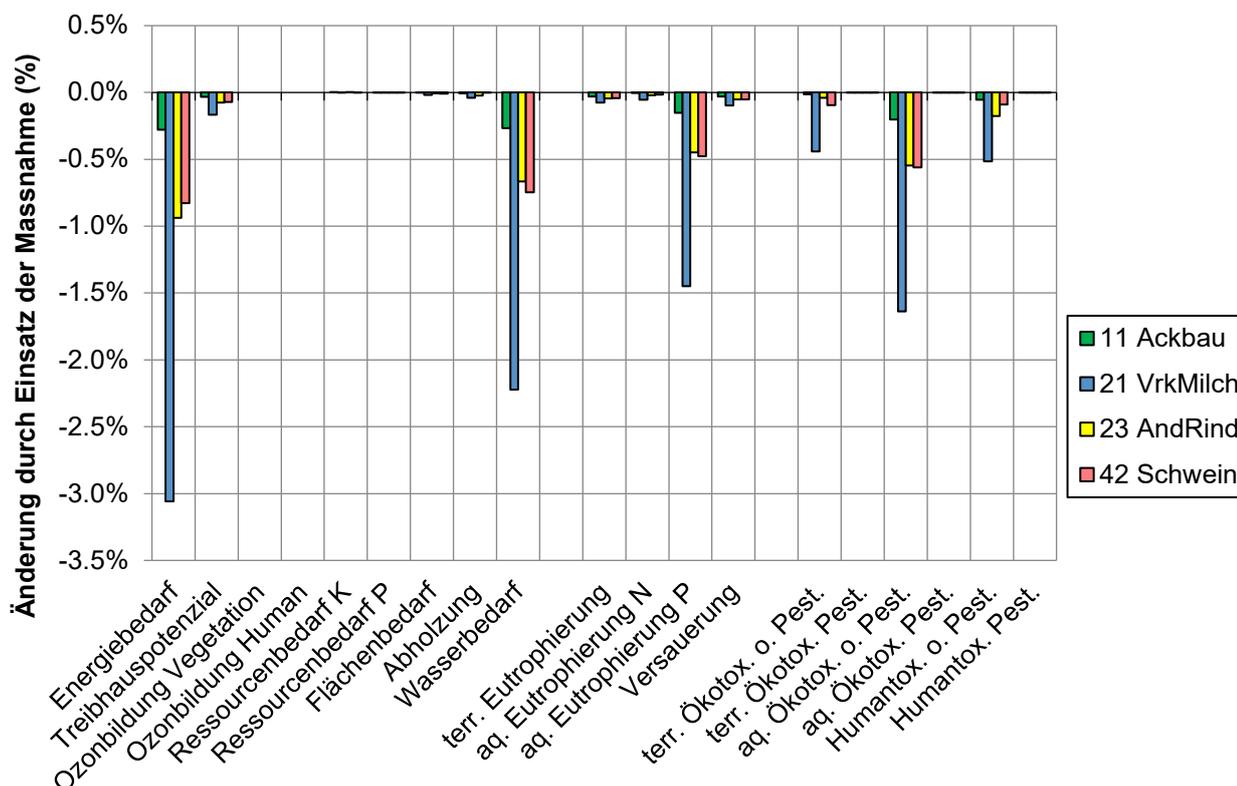


Abbildung 3: Einfluss der Massnahme «Frequenzumformer Melkanlage» auf weitere Umweltwirkungen. Abweichung der Ergebnisse mit umgesetzter Massnahme von den Ergebnissen der Betriebe ohne umgesetzte Massnahme.

4.1.3 Diskussion

Die Massnahme «Frequenzumformer Melkanlage» erreicht auf allen Modellbetrieben eine Reduktion des Treibhauspotenzials. Die Höhe dieser Reduktion hängt von der Einsparung des Stromverbrauchs ab. Bei einem Landwirtschaftsbetrieb mit einer hohen Anzahl Milchkühe ist die Vakuumpumpe länger im Einsatz und folglich ihr Energieverbrauch höher. Der Verkehrsmilchbetrieb spart mit einem installierten Frequenzumformer also am meisten Energie in Form von Strom ein. Aus diesem Grund ist die Massnahme für Betriebe mit einer hohen Anzahl Milchkühe von Interesse. Die Massnahme verursacht keine ungünstigen Auswirkungen auf andere Umweltbereiche.

Der Wirkungsgrad des Frequenzumformers ist in dieser Massnahme entscheidend. Im Bericht von Hubal (2012) beträgt der theoretische Wirkungsgrad gemäss Herstellerangaben bis zu 80%. Mit einem minimalen und maximalen Wert von 53% und 74% wurde dieser theoretische Wirkungsgrad in einem Praxistest von Hubal (2012) aber nicht erreicht. Gemäss DeLaval liegt das Einsparungspotenzial für Strom bei 60% (DeLaval 2016). Der für die Berechnung dieser Massnahme verwendete durchschnittliche Wirkungsgrad von 61.5% aus den Daten von Hubal (2012) liegt somit nahe bei dem von DeLaval angegebenen Wert. Bis dato existieren ausser der Studie von Hubal (2012) keine weiteren Studien zur Energieeinsparung mittels Frequenzumformer bei Vakuumpumpen.

Aus ökonomischer Perspektive zeigt sich, dass mit einem Strompreis von 0.201 Schweizer Franken (CHF) ein Frequenzumformer (Preis 3'500 CHF) im besten Fall nach 4 Jahren amortisiert wird (Tabelle 6, abhängig vom Modellbetrieb) (AgroCleanTech 2018; Energiewerke Zürich (EWZ) 2020).

Tabelle 6: Für die Modellbetriebe berechnete Amortisationsdauer eines Frequenzumformers

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schwein
Amortisationsdauer [Jahre]	48.8	4.0	23.9	7.5

4.2 Regelmässiger Ersatz von Mähklingen

4.2.1 Beschreibung der Massnahme

Die Klingen eines Mähwerks werden nach einer gewissen Zeit aufgrund der Materialabnutzung stumpf. Es wurde herausgefunden, dass das Mähwerk für eine gleiche Menge geschnittenes Gras mit stumpfen Klingen eine höhere Leistung bereitstellen muss als mit scharfen Klingen (Sauter und Dürr 2005).

Das Auswechseln oder Nachschleifen von Mähklingen kann sich aus diesen Gründen positiv auf den Energieverbrauch des Mähwerks auswirken. In einem Praxisversuch bei Agroscope wurde festgestellt, dass der Leistungsbedarf bei Mähwerken mit stumpfen Klingen ca. 3 kW höher ist als bei jenen mit scharfen Klingen (Sauter und Dürr 2005). Die Ergebnisse zeigten, dass sich bei gleichbleibendem Durchsatz mit dem Auswechseln von stumpfen mit scharfen Klingen ca. ein Liter Diesel pro Stunde einsparen lässt (Sauter und Dürr 2005). Die Treibstoffeinsparung durch das regelmässige Auswechseln stumpfer Klingen beim Mähwerk ist daher klimarelevant. Die Klimaschutzmassnahme umfasst einen Klingenwechsel alle 72 Hektar (gemäss Befragungen von Landwirten) und ein Klingenschärfen alle 20 ha gemähter Wiesenfläche (top agrar 2002). Die Dauer für das Mähen (Mähdauer) wurde für jeden Modellbetrieb basierend auf den angegebenen Natur- und Kunstwiesenflächen, deren Erträgen (abhängig von Art und Typ der Wiese) und dem im Sauter und Dürr (2005) festgelegten Durchsatz von 1'200 Dezitonnen (dt) Frischgras pro Stunde individuell berechnet (Tabelle 7). Die Leistung des Mähwerks (in kW) wurde basierend auf der Regression von Sauter und Dürr (2005) für stumpfe und scharfe Klingen separat bestimmt. Der totale Energieverbrauch des Mähwerks (in kWh) wurde aus der Leistung des Mähwerks (in kW) und der Mähdauer (Stunde/h) berechnet. Die Umrechnung von Kilowattstunden in Liter verbrauchtem Diesel wurde basierend auf der Leistung des Traktors und dessen Dieserverbrauch berechnet und beträgt für alle Modellbetriebe 0.34 Liter (L) Diesel pro Kilowattstunde (Sauter und Dürr 2005) (Tabelle 7). Art und Typ der Wiese bestimmen die Anzahl Schnitte pro Jahr und folglich die totale Wiesenfläche, welche gemäht wird. Basierend auf der gemähten Wiesenfläche wird die Anzahl auszutauschender Klingen bestimmt.

Tabelle 7: Kennzahlen der Massnahme «Regelmässiger Ersatz von Mähklingen»

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schwein
Naturwiese [ha landwirtschaftliche Nutzfläche (LN)]	2.5	12.8	8.9	10.5
Kunstwiese [ha LN]	1.1	3.9	2.2	2.8
Gemähte Wiesen [ha LN/Jahr]	11.2	64.3	38.9	48.8
Mähdauer [h/Jahr]	8.7	55.2	33.5	42.0
Dieseleinsparung [L/Jahr]	10.1	63.9	38.8	48.6
Auszutauschende Klingen [Anzahl/Jahr]	1.6	8.9	5.4	6.8

4.2.2 Erzielte Reduktion des Treibhauspotenzials und weitere Umweltwirkungen

Der Ersatz von Mähklingen erzielte für die betrachteten Modellbetriebe eine Treibhausgasreduktion von 28.0 kg CO₂-Äq bis 135.4 kg CO₂-Äq (Tabelle 8). Die Verwendung von scharfen Klingen führte zu einer Reduktion des Treibstoffbedarfs in der Inputgruppe «Energieträger auf Hof». Die bei der Produktion der Mähklingen entstehenden Emissionen fielen im Verhältnis zu jenen aus dem Dieserverbrauch klein aus (Abbildung 4). Die Höhe dieser Einsparung war proportional zur gemähten Wiesenfläche. Daher erreichte der Verkehrsmilchbetrieb mit 0.07% des betrieblichen Treibhauspotenzials die höchste Reduktion.

Bezogen auf die vom Betrieb produzierten MJ VE betragen die Einsparungen 0.03 bis 0.9 g CO₂-Äq/MJ VE (Tabelle 8) resp. 0.03% bis 0.12% (Abbildung 5).

Neben dem Treibhauspotenzial wirkte sich der Ersatz von Mähklingen vor allem auf den Energiebedarf der Betriebe leicht günstig aus (Abbildung 6). Weiter verzeichnete die Massnahme aufgrund des reduzierten Dieserverbrauchs in geringem Masse einen günstigen Effekt auf die Abholzung, Eutrophierung und Versauerung. Es konnten keine ungünstigen Effekte auf andere Umweltwirkungen festgestellt werden.

Tabelle 8: Treibhausgasreduktion der Massnahme «Regelmässiger Ersatz von Mähklingen»

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schwein
Eingesparte Treibhausgase, Gesamtbetrieb [kg CO ₂ -Äq.]	-28.0	-177.8	-108.3	-135.4
Eingesparte Treibhausgase pro erzeugte Megajoule verdaulicher Energie [g CO ₂ -Äq./MJ VE]	-0.03	-0.3	-0.9	-0.3

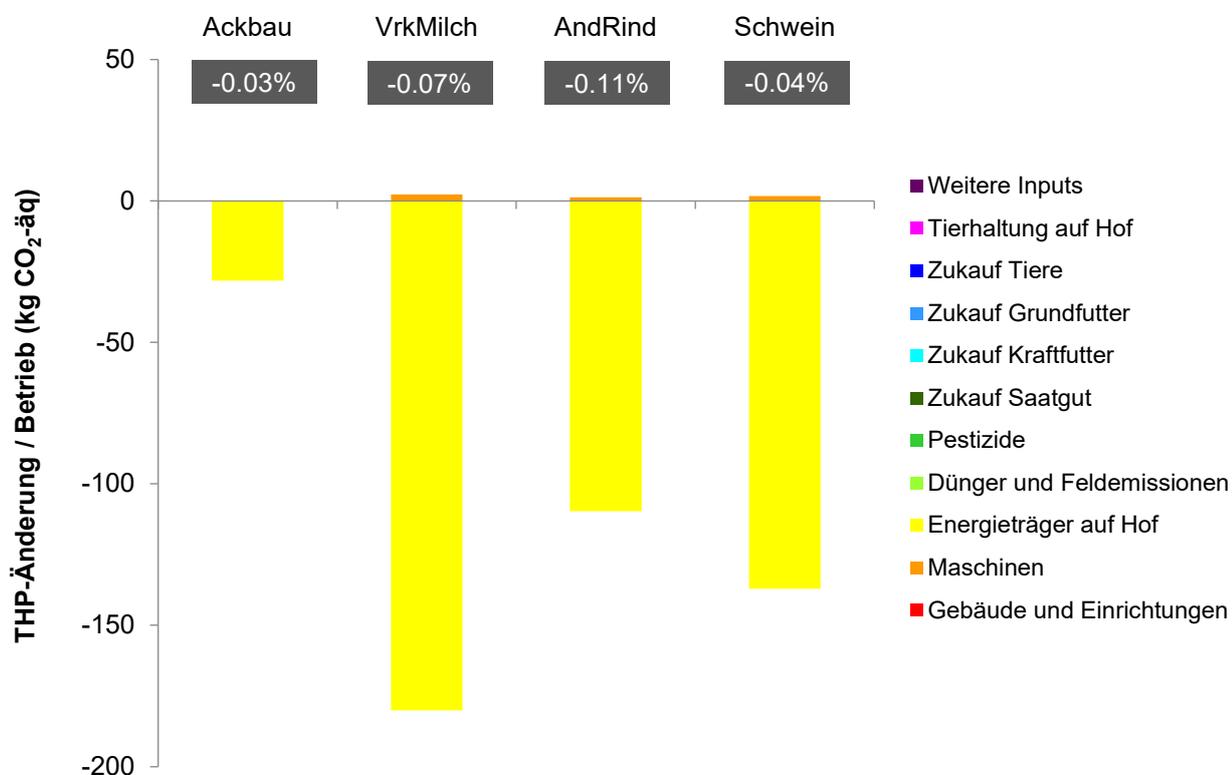


Abbildung 4: Änderung des Treibhauspotenzials (THP) der Modellbetriebe bei Umsetzung der Massnahme «Regelmässiger Ersatz von Mähklingen».

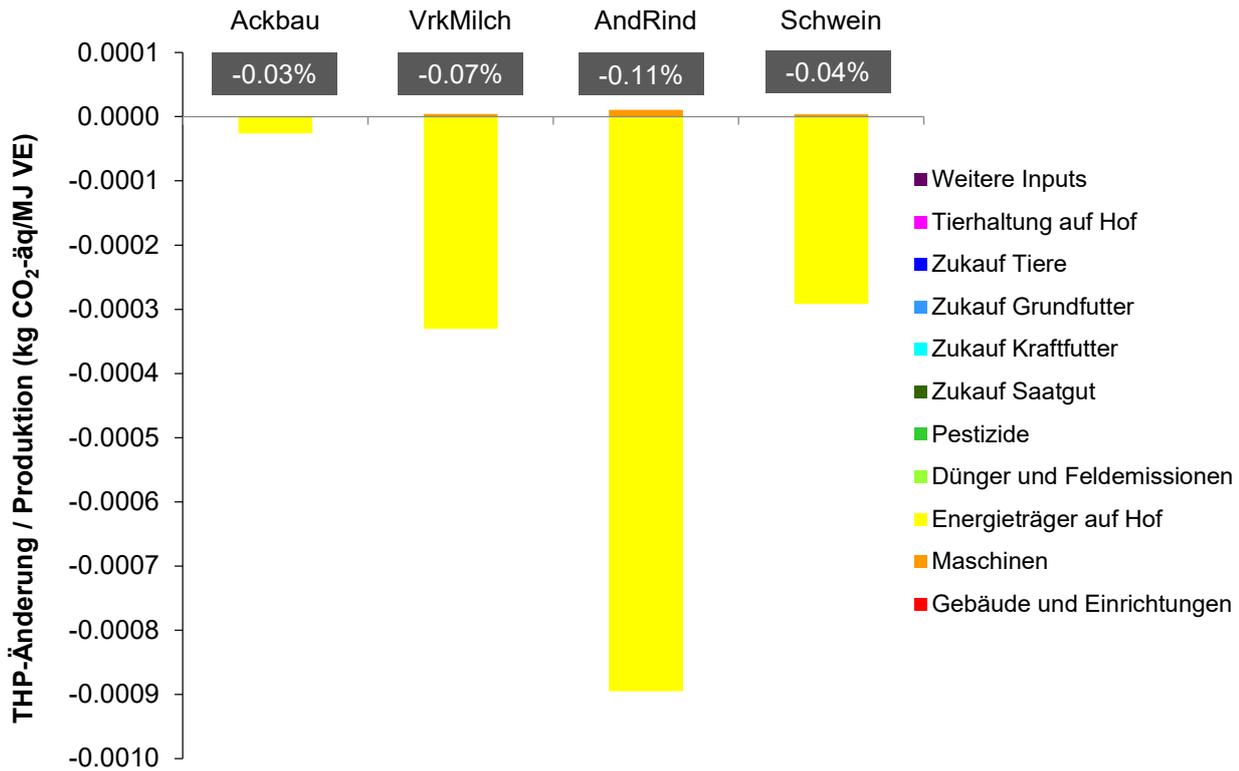


Abbildung 5: Änderung des Treibhauspotenzials pro MJ verdaulicher Energie (VE) der Modellbetriebe bei Umsetzung der Massnahme «Regelmässiger Ersatz von Mähklingen».

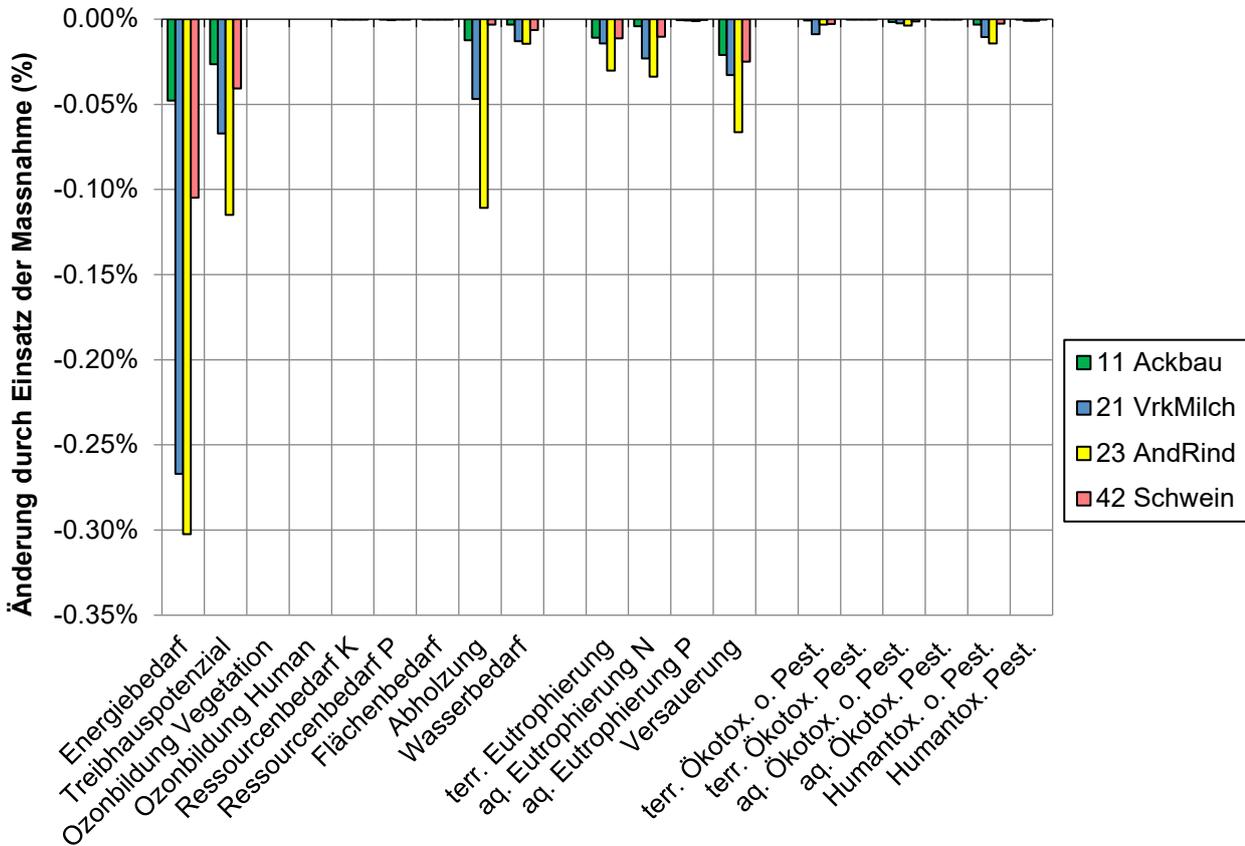


Abbildung 6: Einfluss der Massnahme «Regelmässiger Ersatz von Mähklingen» auf weitere Umweltwirkungen. Abweichung der Ergebnisse mit umgesetzter Massnahme von den Ergebnissen der Betriebe ohne umgesetzte Massnahme.

4.2.3 Diskussion

Die Resultate zeigen, dass die Massnahme «Regelmässiger Ersatz von Mähklingen» die Treibhausgasemissionen auf Landwirtschaftsbetrieben reduziert. Die Höhe der Reduktion fiel im Vergleich zu den anderen im «Punktesystem Klimaschutz» betrachteten Massnahmen geringer aus. Der Ersatz von Mähklingen aus Sicht des Klimaschutzes ist dennoch sinnvoll, gerade deshalb, weil die Massnahme von einer Mehrheit der Landwirte mit relativ wenig Aufwand umgesetzt werden kann (und wahrscheinlich sogar bereits umgesetzt wird).

Gemäss Sauter und Dürr (2005) gehen «*die Meinungen bezüglich der Häufigkeit des Wechsels bzw. Wendens der Klingen in der Praxis stark auseinander*». Dies liegt daran, dass es nicht einfach ist, eindeutige, allgemein gültige Kriterien für eine optimale Klingenschärfe zu bestimmen. Wie oft die Klingen ausgewechselt werden sollen, hängt u.a. von der Leistung, Grösse und dem Einsatz des Mähwerks ab. Bei kleineren Mähwerken können sich die Klingen im Vergleich zu grösseren Mähwerken schneller abnutzen, da der Durchsatz an geschnittenem Gras proportional zu der Anzahl verwendeter Klingen abnimmt. Die hohe Belastung und die schnellere Abnutzung der Klingen bedingen somit ein häufigeres Auswechseln.

Basierend auf Befragungen von Landwirten werden die Klingen im Durchschnitt alle 72 ha ausgewechselt (top agrar 2002). Dieser Wert wurde für die Berechnung dieser Massnahme verwendet, kann aber in der Praxis abweichen. Aus ökologischer Sicht sollte sich an der Reduktionswirkung bei einem häufigeren Klingenwechsel als alle 72 ha (z.B. alle 30 ha) wenig ändern, da die Treibhausgasemissionen bei der Produktion von neuen Klingen im Gegensatz zu der Treibhausgaseinsparung aus dem reduzierten Dieserverbrauch verhältnismässig klein ausfallen (Abbildung 4).

Aus ökonomischer Sicht (Tabelle 9) lässt sich feststellen, dass sich ein Wechsel des Klingensatzes alle 72 ha aufgrund der eingesparten Kosten aus dem reduzierten Dieserverbrauch lohnt (Dieselpreis, Februar 2020: 1.67 CHF/L (Statista 2020), Preis eines 25-teiligen Klingensatzes: 29.40 CHF (FZ Agritechnik 2020)). Bei allen betrachteten Modellbetrieben lassen sich so Kosten sparen (Tabelle 9).

Tabelle 9: Finanzielle Auswirkungen eines Klingenwechsels alle 72 ha gemähter Wiesenfläche (negative Werte stellen Einsparungen dar).

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schwein
Einsparung durch die Massnahme Klingenwechsel [CHF/Jahr]	-15.0	-96.2	-58.5	-73.2

4.3 Heizen mit Holzpellets

4.3.1 Beschreibung der Massnahme

Holzpellets bestehen aus Holz oder Sägenebenprodukten (wie z.B. Sägemehl), welche meist ohne zusätzliche Bindemittel (ausser eventuell Stärke) zusammengepresst werden³. Sie besitzen einen Heizwert von rund 17 bis 18 MJ pro kg Holzpellets (Ammann *et al.* 2009).

Heizen mit Holz stellt eine alternative Lösung zu Heizen mit Heizöl dar. Holz speichert CO₂ aus der Luft, das beim Verbrennen von Holz wieder freigesetzt wird. Somit wird insgesamt kein zusätzliches Kohlenstoffdioxid ausgestossen, wie dies beim Heizen mit Erdöl der Fall ist. Aus Sicht des Klimaschutzes ist es daher sinnvoll, Holz anstelle von Erdöl als erneuerbare Ressource zum Heizen zu verwenden. In dieser Massnahme werden zum Heizen Holzpellets verwendet und Heizöl wird substituiert, wobei Treibhausgasemissionen eingespart werden können.

Für die Wärmegewinnung aus Holzpellets muss ein Holzpellet-Ofen installiert werden. Räumlichkeiten für die Lagerung von Holzpellets oder Erdöl werden in dieser Berechnung nicht berücksichtigt, da diese Aspekte für die Ermittlung der Treibhausgaseinsparung irrelevant sind. Für die Öfen (Heizöl wie Holzpellets) wurde mit einer Heizleistung von 20 kW gerechnet (Ammann *et al.* 2009).

Zwecks Vergleichbarkeit wurden die bestehenden Ökoinventare zu der Wärmegewinnung aus Heizöl und Holzpellets angepasst, damit der Ofen in beiden Fällen eine Heizleistung von 20 kW aufweist. Die Daten dazu wurden mittels einer linearen Regression aus den bestehenden Ökoinventardaten angenähert. Der so berechnete Heizwert von Holzpellets beträgt 13.7 MJ/kg bei einem Wassergehalt der Pellets von 10%. Der Heizwert von Erdöl beträgt 40.4 MJ/kg.

70% der in der Schweiz verkauften Pellets stammen aus Schweizer Holz, die restlichen 30% werden von Europa importiert⁴ (hauptsächlich aus den Nachbarländern der Schweiz). Die Herkunft der Pellets wurde im Ökoinventar gemäss diesen Informationen geändert, sodass die Massnahme den Schweizer Holzpelletmarkt abbildet.

Tabelle 10: Wichtigste Kennzahlen der Massnahme «Heizen mit Holzpellets»

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schwein
Heizölbedarf [L/Jahr]	1'653	475	1'194	1'742
Wärmebedarf [kWh/Jahr]	66'815	19'190	48'241	70'374
Pelletbedarf [kg/Jahr]	4'884	1'403	3'526	5'144

³ Website ProPellets, So werden Pellets hergestellt, geliefert und verbrannt. <https://www.propellets.ch/heizen-mit-pellets/vorteile-der-pellets/nachhaltige-herstellung.html>, 24.08.2020

⁴ Website Heitzmann AG, Woher stammen die in der Schweiz verkauften Pellets?, <https://www.heitzmann.ch/de/holzenergie/holzenergie-news/holzenergie-news-detail/woher-stammen-die-in-der-schweiz-verkauften-pellets/>, 24.08.2020

4.3.2 Erzielte Reduktion des Treibhauspotenzials und weitere Umweltwirkungen

Mit der Massnahme «Heizen mit Holzpellets» erzielten die Modellbetriebe Treibhausgasreduktionen von 1'671 kg CO₂-Äq bis 6'129 kg CO₂-Äq (Tabelle 11), abhängig vom benötigten Wärmebedarf des Modellbetriebs beziehungsweise der Menge verfeuerter Holzpellets. Der Ackerbaubetrieb erreichte mit 5.5% die grösste Reduktion seines betrieblichen Treibhauspotenzials (Abbildung 7). Die Reduktion beruht zu 100% aus der Einsparung von Heizöl und wird der Inputgruppe «Energieträger auf Hof» zugeschrieben (Abbildung 7). Das berechnete Treibhauspotenzial für die Installation des Holzpellet-Ofens machte dabei im Verhältnis zu der Treibhausgaseinsparung aus dem reduzierten Verbrauch von Heizöl nur einen sehr kleinen Anteil aus (Abbildung 7).

Bezogen auf die vom Betrieb produzierten MJ VE betrug die Einsparung 3.1 bis 34.3 g CO₂-Äq/MJ VE (Tabelle 11) resp. 0.6% bis 5.5% (Abbildung 8).

Aufgrund der Reduktion des Heizölbedarfs reduzierte die Massnahme den Bedarf an nicht erneuerbaren Energieressourcen mit bis zu 12% relativ zum Ursprungswert (Abbildung 9). Gleichzeitig nahm die durch die Erdölförderung verursachte Abholzung ab. Auf der anderen Seite führte die Produktion von Holz (bzw. Holzpellets) zu einem höheren Flächenbedarf (Abbildung 9). Die Zunahme der Humantoxizität beruhte auf der höheren Feinstaubbelastung durch die Verbrennung von Holzpellets im Ofen.

Tabelle 11: Treibhausgasreduktion der Massnahme «Heizen mit Holzpellets»

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schwein
Eingesparte CO ₂ -Äquivalente [kg]	-5'819	-1'671	-4'202	-6'129
Eingesparte CO ₂ -Äquivalente pro erzeugte Megajoule verdaulicher Energie [g/MJ VE]	-5.4	-3.1	-34.3	-13.0

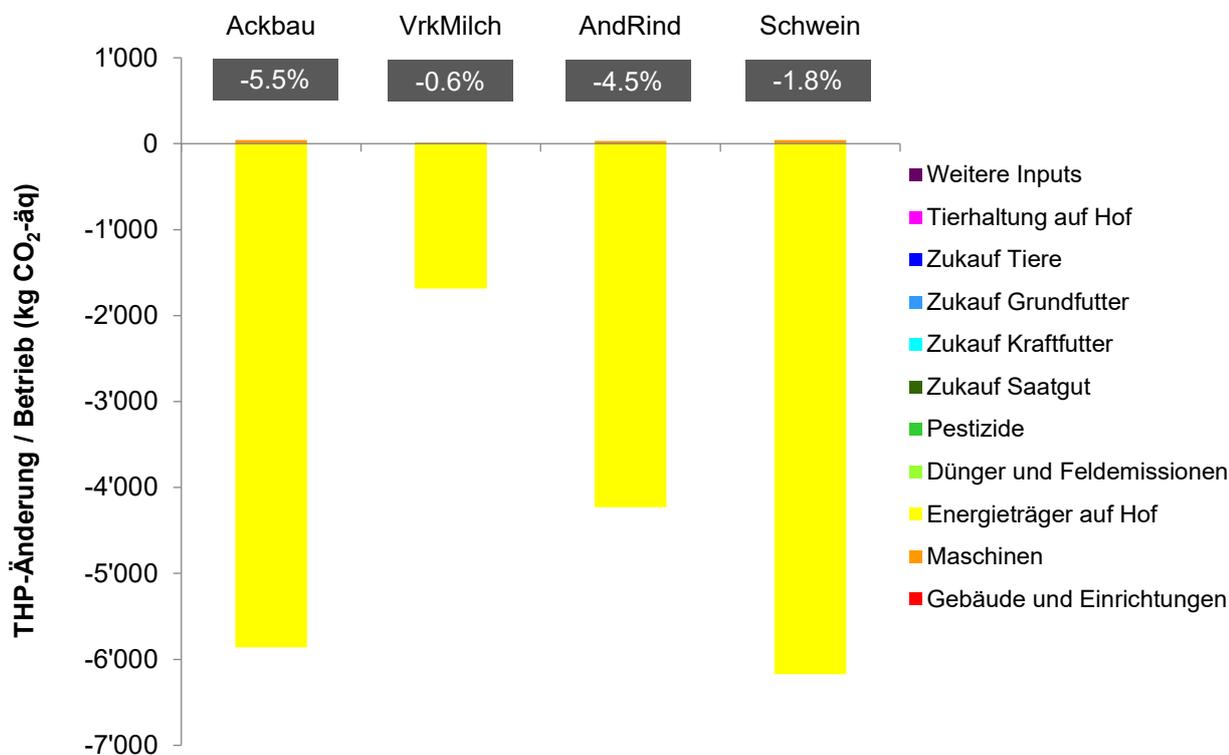


Abbildung 7: Änderung des Treibhauspotenzials der Modellbetriebe bei Umsetzung der Massnahme «Heizen mit Holzpellets».

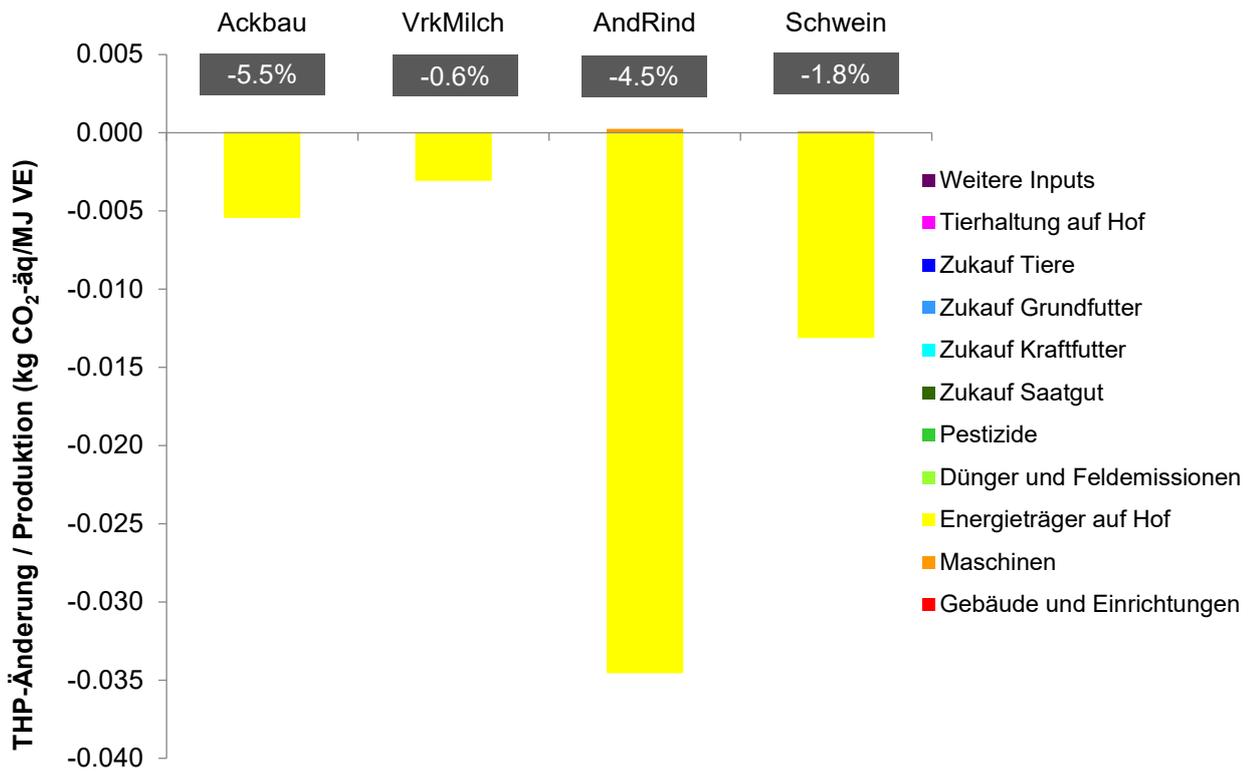


Abbildung 8: Änderung des Treibhauspotenzials pro MJ VE der Modellbetriebe bei Umsetzung der Massnahme «Heizen mit Holzpellets».

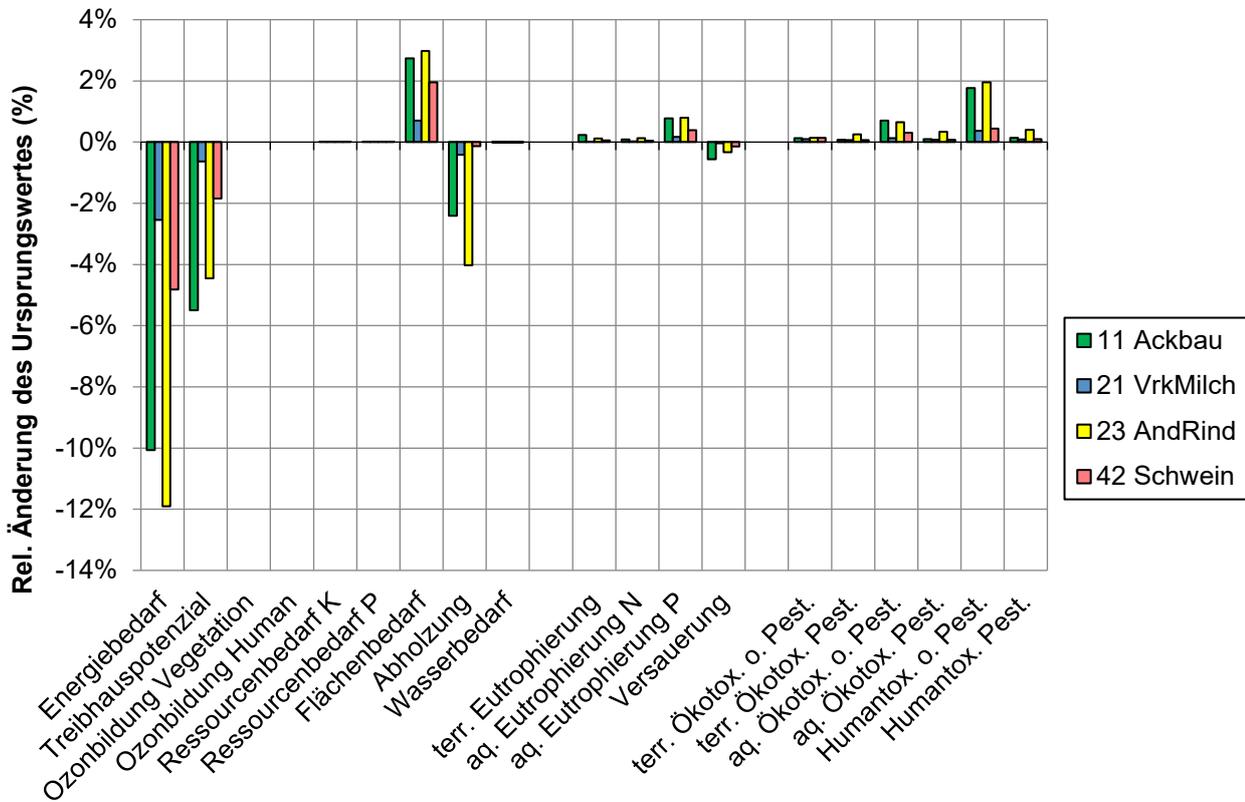


Abbildung 9: Einfluss der Massnahme «Heizen mit Holzpellets» auf weitere Umweltwirkungen. Abweichung der Ergebnisse mit umgesetzter Massnahme von den Ergebnissen der Betriebe ohne umgesetzte Massnahme.

4.3.3 Diskussion

Im Vergleich zu der Massnahme «Waldbewirtschaftung zur Erzeugung erneuerbarer Energien» aus Alig *et al.* (2015) führte die Massnahme Heizen mit Holzpellets zu einer verhältnismässig hohen Reduktion von Treibhausgasemissionen. Für die Einsparung von 1 t CO₂-Äq müssen im Vergleich zu der Massnahme Heizen mit Hackschnitzeln etwas weniger Holzpellets verfeuert werden. Grund dafür ist die höhere Energiedichte bei Holzpellets mit rund 17 bis 18 MJ/kg Pellets im Vergleich zu Hackschnitzeln mit rund 13 MJ/kg Hackschnitzel⁵ (Ammann *et al.* 2009).

Der vom Inventar angegebene Heizwert von Heizöl von 40.4 MJ/kg ist im Vergleich zu dem in der Literatur angegebenen Richtwert von 41.0 MJ/kg eine gute Annäherung⁶ (Agrarplus 2020). Der berechnete Wärmebedarf der Modellbetriebe auf Basis dieses Heizwerts und des Erdölbedarfs aus dem Produktionsinventar der Modellbetriebe scheint plausibel.

⁵ Website Jenni Energietechnik, https://www.jenni.ch/holzheizung.html?file=files/jenni/inhalte/pdf/Publikationen/Brennstoff_Vergleich.pdf, 24.08.2020

⁶ Website Agrarplus, Heizwerte/-äquivalente, <https://www.agrarplus.at/heizwerte-aequivalente.html>, 24.08.2020

4.4 Wärmerückgewinnung Milchkühlung

4.4.1 Beschreibung der Massnahme

Bei der Milchkühlung wird die der Milch entzogene Wärmeenergie meist über das Kühlaggregat an die Aussenluft abgegeben und bleibt ungenutzt. Da bei der Milchproduktion aber auch täglich Heisswasser zur Reinigung benötigt wird, bietet es sich an, über eine Wärmerückgewinnung die beiden Kreisläufe zu koppeln und so die Abwärme aus der Milchkühlung für die Warmwasserbereitung zu nutzen.

Dazu wird in der Regel ein Warmwasserspeicher vor den Boiler eingebaut und der Kühlmittelkreislauf der Milchkühlung durch einen Wärmetauscher geleitet, der die Wärme an den Warmwasserspeicher abgibt (Messin 2009). Da der Boiler das vorgewärmte Wasser bis zur Endtemperatur weniger lang aufheizen muss, kann so Energie eingespart werden.

Bei der Berechnung der Massnahme «Installation von Sonnenkollektoren» (Alig *et al.* 2015) wurde als Referenz von der Wärmeerzeugung durch Heizöl ausgegangen, da dies gemäss Henzen *et al.* (2012) der zweitwichtigste Energieträger zur Wärmeerzeugung nach Holz ist und es aus Klimasicht wenig Sinn macht, mit der Massnahme eine Holzheizung zu ersetzen. Diese Massnahme folgt dieser Argumentation weiter.

Gegenüber dem IST-Zustand auf den Modellbetrieben wurde für die Massnahme der Einbau eines Warmwasserspeichers mit Wärmetauscher berücksichtigt, unter Annahme einer Lebensdauer von 25 Jahren. Die Grösse der installierten Anlage wurde an die zur Reinigung benötigten Heisswassermenge angepasst. Diese wird durch die Anzahl Milchkühe definiert, wobei pro Kuh ein Wasserbedarf von 8 L pro Tag angenommen wurde (M. Zähler, Agroscope, persönliche Mitteilung April 2015). Damit der Wasserspeicher nicht zu knapp dimensioniert ist, wurde dieser um 15% grösser gewählt, als durch den Heisswasserbedarf errechnet.

Die zur Warmwasserbereitung nutzbare Wärmeenergie errechnet sich aus der zu kühlenden Milchmenge, der spezifischen Wärmekapazität der Milch, sowie der Temperaturdifferenz, um welche die Milch heruntergekühlt werden muss (Sax 2015) (Annahme: 30°C: von 34°C auf 4°C), multipliziert mit einem angenommenen Wirkungsgrad des Wärmetauschers von 60% (abgeleitet von Latsch *et al.* 2016). Über den Heizwert von Heizöl ergibt sich daraus die eingesparte Heizölmenge. Die entsprechenden Kennzahlen zur Berechnung der Massnahme sind in Tabelle 12 gegeben.

Tabelle 12: Kennzahlen der Massnahme «Wärmerückgewinnung Milchkühlung»

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schwein
Ertrag Wärmeenergie [kWh/Jahr]	241.9	3'254.7	491.4	1'504.2
Reduktion Heizölbedarf [L/Jahr]	24.2	325.5	49.1	150.4
Grösse Warmwasserspeicher [L]	18.4	239.2	36.8	119.6
Jahresmilchmenge [kg]	12'296	165'433	24'976	76'457

4.4.2 Erzielte Reduktion des Treibhauspotenzials und weitere Umweltwirkungen

Durch die Wärmerückgewinnung bei der Milchkühlung erzielten die Modellbetriebe Treibhausgasreduktionen von 94.3 kg CO₂-Äq bis 1'269.3 kg CO₂-Äq (Tabelle 13), abhängig von der Anzahl gehaltener Milchkühe resp. produzierter Jahresmilchmenge. Die grösste Reduktion erreichte entsprechend der Verkehrsmilchbetrieb mit 0.5% seines betrieblichen Treibhauspotenzials. Die Reduktion ist vollständig der Inputgruppe «Energieträger auf dem Hof» anzurechnen (Abbildung 10), der Aufwand für den eingebauten Wasserspeicher («Gebäude und Einrichtungen») ist im Verhältnis dazu verschwindend gering.

Bezogen auf vom Betrieb produzierten MJ VE betragen die Einsparungen 0.1 bis 0.8 g CO₂-Äq/MJ VE (Tabelle 13) resp. 0.1% bis 0.5% (Abbildung 11).

Neben dem Treibhauspotenzial sank durch die Massnahme in erster Linie der Energiebedarf (Abbildung 12). Die weiteren Umweltwirkungen wurden in geringem Masse ebenfalls reduziert. Die Abholzung wurde reduziert, da der

Flächenbedarf für die Erdölproduktion sank. Die Öko- und Humantoxizität sanken, da weniger Heizöl verbrannt wurde. Erhöhte unerwünschte Umweltwirkungen gab es durch die Massnahme keine.

Tabelle 13: Treibhausgasreduktion der Massnahme «Wärmerückgewinnung Milchkühlung»

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schwein
Eingesparte Treibhausgase, Gesamtbetrieb [kg CO ₂ -Äq.]	-94.3	-1'269.3	-191.5	-586.0
Eingesparte Treibhausgase pro erzeugte Megajoule verdaulicher Energie [g CO ₂ -Äq./MJ VE]	-0.1	-0.5	-0.8	-0.7

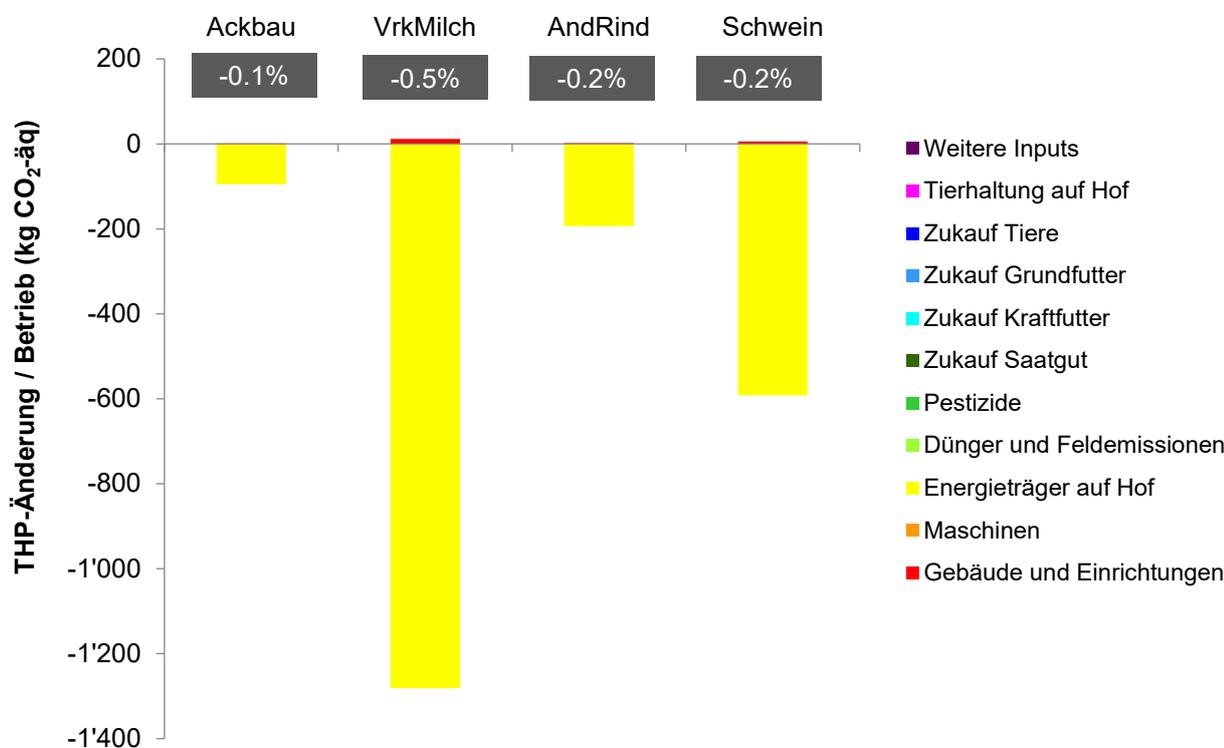


Abbildung 10: Änderung des Treibhauspotenzials der Modellbetriebe bei Umsetzung der Massnahme «Wärmerückgewinnung Milchkühlung».

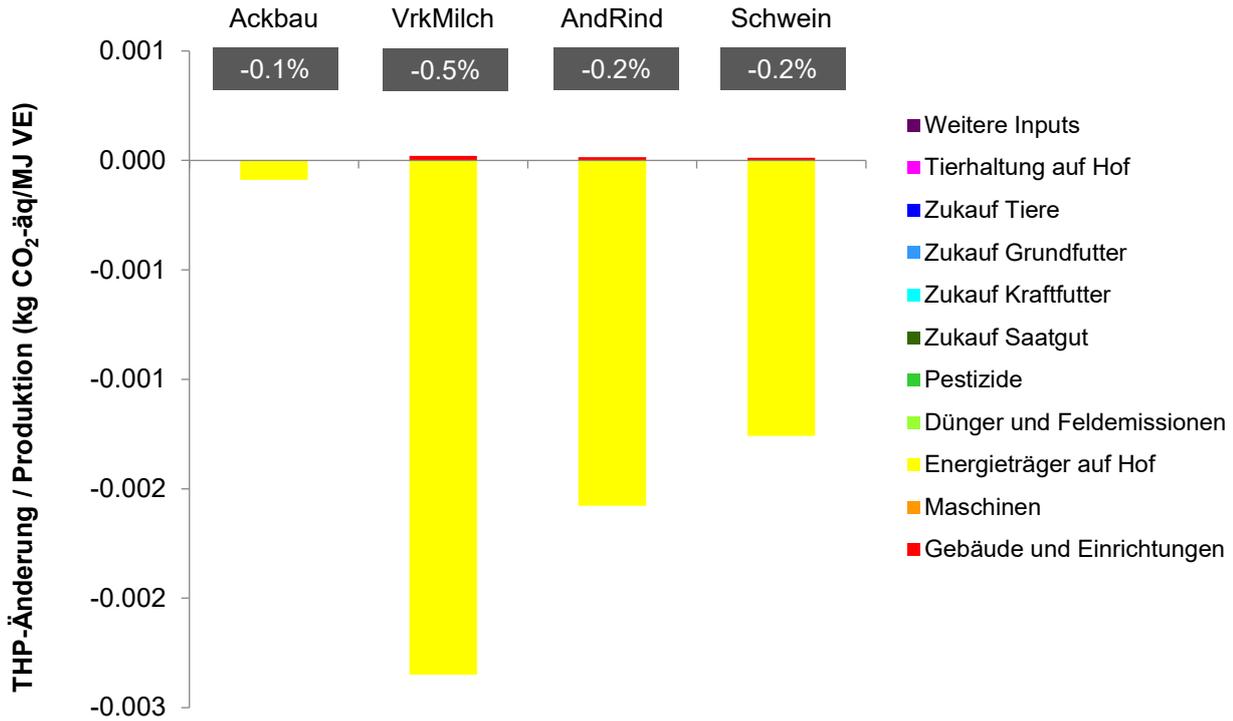


Abbildung 11: Änderung des Treibhauspotenzials pro MJ VE der Modellbetriebe bei Umsetzung der Massnahme «Wärmerückgewinnung Milchkühlung».

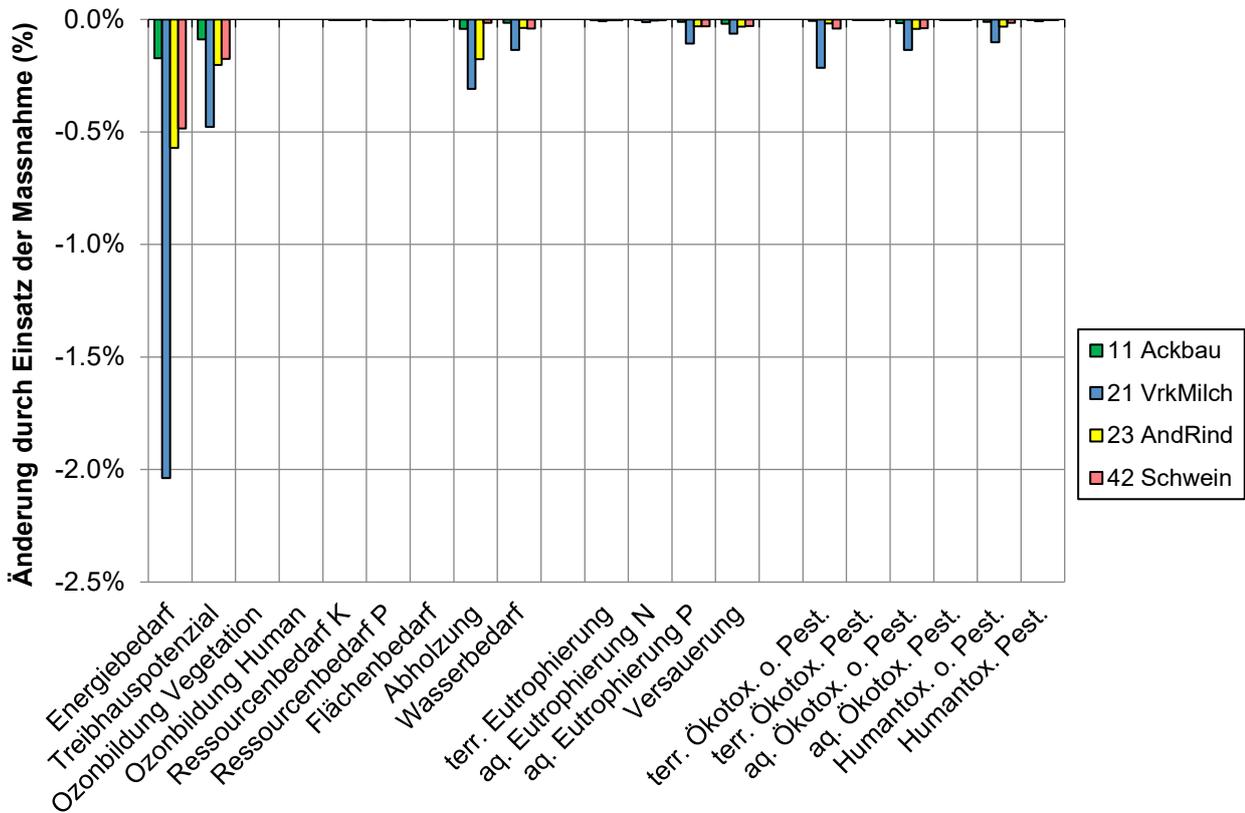


Abbildung 12: Einfluss der Massnahme «Wärmerückgewinnung Milchkühlung» auf weitere Umweltwirkungen. Abweichung der Ergebnisse mit umgesetzter Massnahme von den Ergebnissen der Betriebe ohne umgesetzte Massnahme.

4.4.3 Diskussion

Die Resultate haben gezeigt, dass die Massnahme «Wärmerückgewinnung Milchkühlung» vor allem auf Betrieben mit hoher Milchproduktion interessant ist, weil durch hohe Milchmengen viel Wärmeenergie zur Verfügung steht. In der Massnahme wurde Heizöl als Energielieferant zur Warmwassererzeugung ersetzt. Wird Heisswasser mit Strom erzeugt, so ist das Reduktionspotenzial sehr viel geringer, da der Schweizer Strommix im Vergleich zu Heizöl deutlich geringere Treibhausgasemissionen aufweist. Wird das Heisswasser mit Holz erzeugt, so führt der Ersatz durch eine Wärmerückgewinnung zu keiner Reduktion des Treibhauspotenzials.

Der Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung ist für die Höhe der Reduktion entscheidend. Für den Wirkungsgrad gibt Pommer (2015) einen Bereich von 50-80% an. AgroCleanTech rechnet mit einer Energieeinsparung von ca. 18 kWh/1000 kg Milch und Jahr (Gisler 2016), was unter den hier getroffenen Annahmen umgerechnet einem Wirkungsgrad von ca. 55% entspricht. Der in der Berechnung verwendete Wirkungsgrad von 60% dürfte somit gut passen. Bedingung für einen guten Wirkungsgrad ist, dass das Verhältnis zwischen gekühlter Milchmenge und dem Heisswasserverbrauch nicht zu unausgeglichen ist, sodass während der Milchkühlung permanent Wärmeenergie zur Wassererwärmung genutzt werden kann, ohne dass die Zieltemperatur im Warmwasserspeicher vorzeitig erreicht wird. Zusätzlich ist der Wirkungsgrad auch vom Verkalkungsgrad des Wärmetauschers abhängig. Die Wartung ist also ebenfalls wichtig.

4.5 Leinsamen als Futterzusatz

4.5.1 Beschreibung der Massnahme

Im Bereich von Fütterungsmassnahmen zur Senkung der Methanemissionen bei Wiederkäuern ist der Zusatz von fetthaltigen Futtermitteln eine breit untersuchte Methode mit guten Hinweisen auf deren Wirkung. Insbesondere Fette mit hohen Gehalten an ungesättigten Fettsäuren können eine Reduktion der Methanbildung (CH_4) bewirken (Münger *et al.* 2019). Aufgrund eines hohen Gehalts an Omega-3-Fettsäuren und guten Resultaten in Bezug auf die Methanreduktion sind Leinsamen als Fettquelle besonders im Fokus (Chilliard *et al.* 2007, zitiert in Martin *et al.* 2008; Eugène *et al.* 2011).

Studien zur Verfütterung extrudierter Leinsamen fanden Methanreduktionen von bis zu über 40% (Martin *et al.* 2008; Martin *et al.* 2011; Engelke *et al.* 2019; Münger *et al.* 2019). In grasbasierten Rationen waren die Methanreduktionen geringer als in mais- oder krafftutterlastigen Rationen (Engelke *et al.* 2019).

Beauchemin *et al.* (2008) schätzten 10-25% Methanreduktion durch Fettzufütterung als realistisch ein und berechneten für eine Erhöhung des Fettgehalts in der Ration um 1% der Trockensubstanz (TS) eine durchschnittliche Methanreduktion von 5.6%, bezogen auf die Emissionsrate in g CH_4 /kg TS-Aufnahme. Wichtig ist, dass der Fettgehalt der Futtermischung 6-7% nicht übersteigt, da sonst negative Effekte, wie beispielsweise eine Abnahme des Futterverzehrs, zu erwarten sind (Beauchemin *et al.* 2008). Leinsamen müssen ausserdem für eine effiziente Verdauung vorbehandelt werden (Grainger und Beauchemin 2011), weshalb für die Massnahme extrudierte Leinsamen berücksichtigt wurden.

Zur Berechnung der Massnahme wurde davon ausgegangen, dass ein Teil des herkömmlichen Milchvieh-Krafftutters durch ein Futter mit extrudierten Leinsamen ersetzt wird, sodass der Fettanteil der Ration um 1%, resp. 10 g/kg TS erhöht wird. Die dafür erforderliche Einsatzmenge an extrudierten Leinsamen beträgt 2.3% der Ration oder ca. 450 g TS Leinsamen pro Tier und Tag, bei einem Gehalt von 430 g/kg TS Rohfett in den Leinsamen (Agroscope 2016) und einem angenommenen Futterverzehr von 20 kg TS pro Tier und Tag.

Für die Modellbetriebe wurde ein entsprechender Anteil der Futtermischung mit extrudierten Leinsamen ersetzt. Leinsamen zur Verfütterung werden importiert. Dafür wurde ein neues Ökoinventar erstellt, welches die Produktion in den wichtigsten Herkunftsländern Deutschland, Kasachstan, Frankreich und Belgien abbildet (Importstatistik 2017 – 2019, (Swiss-Impex 2020)). Zusätzlich bezieht es den Transport in die Schweiz und die Verarbeitung mit Extrusion ein.

Eine zentrale Referenz für die Berechnung der Methanbildung bei Milchkühen ist die Methode von Kirchgessner (1995). Diese ergibt eine Methanreduktion von ca. 10%, wenn der Fettgehalt in der Ration um 1% erhöht wird. Dies ist im Vergleich zur übrigen Literatur eher hoch, da Schweizer Futtermischungen gegenüber ausländischen Studien stärker grasbasiert sind und weniger Krafftutter enthalten. Im Gegensatz dazu fanden Münger *et al.* (2019) unter Schweizer Verhältnissen eher tiefe Methanreduktionen (SF6-Methode) von 7% bezogen auf die Methanproduktion pro Tag, resp. keine Unterschiede in der Methanrate (g pro kg TS-Aufnahme) bei einem Fettgehalt der Ration von 6%. Aus diesem Grund wird für die Methanreduktion der Wert aus Beauchemin *et al.* (2008) (5.6% Methanreduktion pro 1% erhöhten Fettgehalt) verwendet, der einen mittleren Wert aus der Literatur repräsentiert.

Im Sinne einer Sensitivitätsanalyse wurde zusätzlich eine Variante nach Kirchgessner (1995) berechnet.

4.5.2 Erzielte Reduktion des Treibhauspotenzials und weitere Umweltwirkungen

Durch den Einsatz extrudierter Leinsamen erzielten die Modellbetriebe eine durchschnittliche Treibhausgasreduktion von 447.5 kg CO₂-Äq in der Variante Beauchemin und 1'266.2 kg CO₂-Äq in der Variante Kirchgessner pro 1'000 kg eingesetzter Leinsamen. Tabelle 14 zeigt die absoluten Resultate der Modellbetriebe. Der Methanreduktion in der Tierhaltung steht dabei ein höheres Treibhauspotenzial der zugekauften Leinsamen relativ zum ersetzten Krafffutter gegenüber (Abbildung 13). In allen untersuchten Fällen wurde jedoch eine Netto-Treibhausgasreduktion erzielt.

Das Treibhauspotenzial der Herstellung extrudierter Leinsamen (1.5 kg CO₂-Äq/kg) ist im Vergleich zum ersetzten Krafffutter Milchvieh mit 16% Rohproteingehalt (0.5 kg CO₂-Äq/kg) deutlich höher. Dabei fällt vor allem der Anbau ins Gewicht, während die Verarbeitung (insbesondere Extrusion) nur wenig dazu beiträgt. Tiefe Erträge im Vergleich zu anderen Kulturen tragen dazu bei, dass sich Produktionsmittel und -aufwand auf geringe Mengen an produzierten Leinsamen verteilen, wodurch die Umweltwirkungen pro Kilogramm höher ausfallen als bei anderen Krafffuttern.

Bezogen auf vom Betrieb produzierten MJ VE betragen die Einsparungen in der Variante Beauchemin 0.1% bis 0.7% (Abbildung 14) resp. 0.1 bis 3.6 g CO₂-Äq/MJ VE.

Der Teilersatz des Krafffutters durch Leinsamen führte aufgrund anderer Düngemengen und Bewässerung in den Importländern zu einem höheren Ressourcenbedarf K und P und zu einem erhöhten Wasserbedarf. Der tiefe Flächenertrag von Leinsamen erhöhte den Flächenbedarf und die aquatische Eutrophierung N und P pro Kilogramm. Hingegen verringerte sich die terrestrische Ökotoxizität, sowie die durch Pestizide verursachte aquatische Ökotoxizität.

Tabelle 14: Treibhausgasreduktion der Leinsamenfütterung

Betrieb	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schwein
Einsatzmenge extrudierter Leinsamen [kg]	323.0	4'494.5	641.2	2'192.4
Variante Beauchemin:				
Eingesparte Treibhausgase, Gesamtbetrieb [kg CO ₂ -Äq.]	-139.3	-1'972.5	-297.7	-998.9
Eingesparte Treibhausgase pro 1'000 kg eingesetzter Leinsamen [kg CO ₂ -Äq.]	-431.3	-438.9	-464.2	-455.6
Variante Kirchgessner:				
Eingesparte Treibhausgase, Gesamtbetrieb [kg CO ₂ -Äq.]	-410.8	-5'639.6	-809.4	-2'796.4
Eingesparte Treibhausgase pro 1'000 kg eingesetzter Leinsamen [kg CO ₂ -Äq.]	-1'272.1	-1'254.8	-1'262.3	-1'275.5

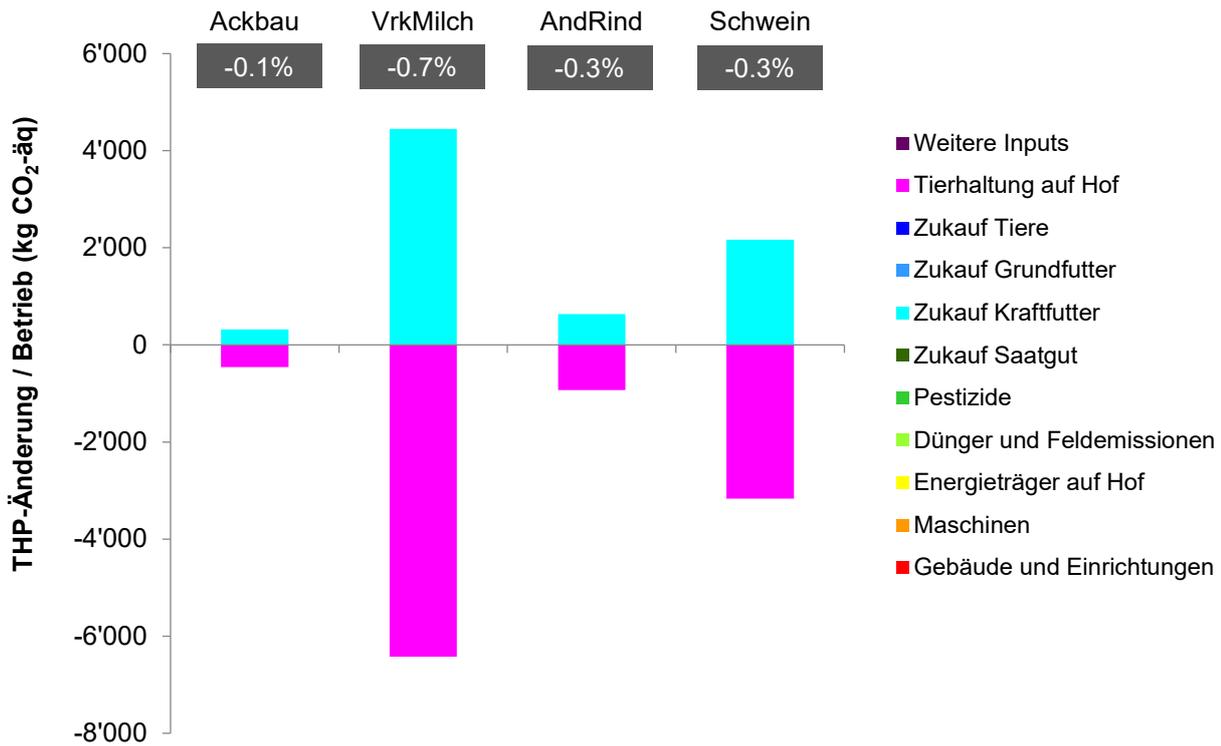


Abbildung 13: Änderung des Treibhauspotenzials der Modellbetriebe bei Umsetzung der Massnahme «Leinsamen als Futterzusatz» (Variante Beauchemin).

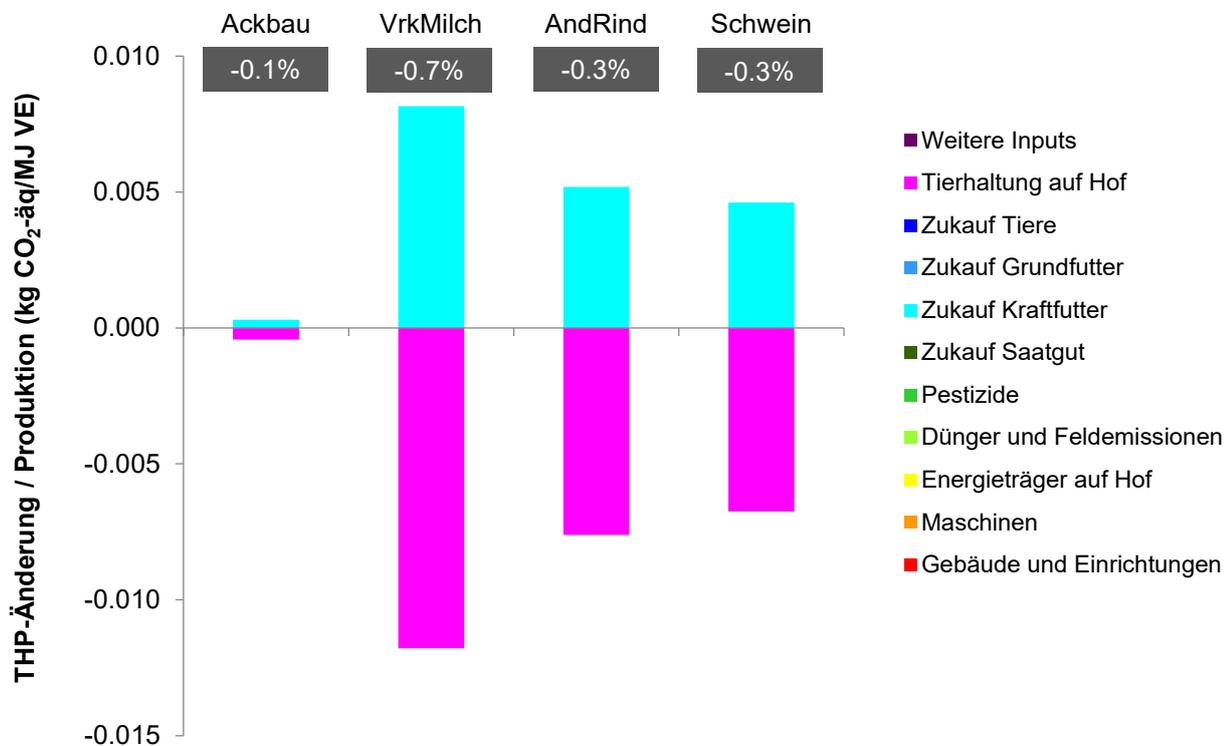


Abbildung 14: Änderung des Treibhauspotenzials pro MJ VE der Modellbetriebe bei Umsetzung der Massnahme «Leinsamen als Futterzusatz» (Variante Beauchemin).

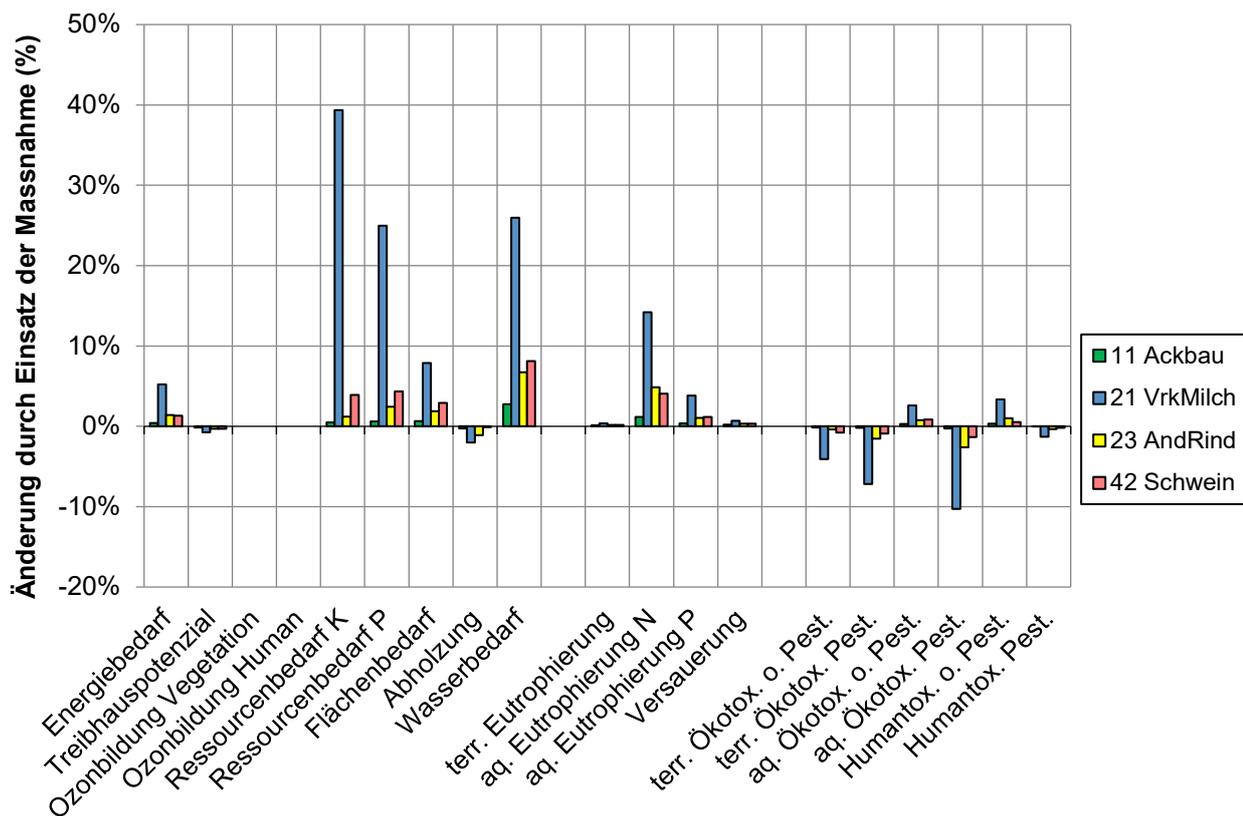


Abbildung 15: Einfluss der Massnahme «Leinsamen als Futterzusatz» (Variante Beauchemin) auf weitere Umweltwirkungen. Abweichung der Ergebnisse mit umgesetzter Massnahme von den Ergebnissen der Betriebe ohne umgesetzte Massnahme.

4.5.3 Diskussion

Mit einem Faktor von ca. 2.8 zwischen der Treibhausgasreduktion in der Variante nach Beauchemin und der Variante nach Kirchgessner unterscheiden sich die Resultate deutlich. Darin zeigt sich, dass die effektive Höhe der Methanreduktion durch das Verfüttern von fetthaltigen Futtermitteln mit Unsicherheiten behaftet ist. Durch die Wahl der Variante nach Beauchemin, als mittlere Methanreduktion aus der Literatur, wird eine mögliche Überschätzung vermieden und der konservative Ansatz gewählt.

Die Untersuchungen von Münger *et al.* (2019) geben Hinweise, dass vorbehandelte Rapssamen (z.B. gemahlen oder extrudiert) eine ähnliche Methanreduktion wie extrudierte Leinsamen erreichen könnten. Allerdings liegt ein besonderes Interesse auf Leinsamen, weil die methansenkende Wirkung mit potenziellen Vorteilen für die Milchqualität durch den hohen Gehalt an ungesättigten Fettsäuren kombiniert wird.

Mit der Verfütterung von extrudierten Leinsamen an Wiederkäuer lässt sich durch die methansenkende Wirkung das Treibhauspotenzial reduzieren. Aufgrund des vergleichsweise hohen Treibhauspotenzials aus dem Leinsamenanbau wird allerdings ein Teil der methansenkenden Wirkung kompensiert. Gleichzeitig wird die erzielte Treibhausgasreduktion, bedingt durch den Leinsamenanbau, mit relativ hohen Trade-Offs im Bereich Eutrophierung, Ressourcen- und Flächenbedarf erkauft.

4.6 Gründüngung

4.6.1 Beschreibung der Massnahme

Zwischenfrüchte werden bereits als eine etablierte Ackerbaumassnahme in der Schweizer Landwirtschaft angebaut (Alig *et al.* 2015). Im Zwischenfruchtanbau wird zwischen der Nutzung als Gründüngungen und als Tierfutter unterschieden.

Gründüngungen werden bei der Ernte in den Boden eingearbeitet (Maitra *et al.* 2018). Sie binden Stickstoff aus dem Boden in der Biomasse, wodurch er vor der Auswaschung geschützt wird. Dieser Stickstoff wird beim Unterpflügen im Boden mobilisiert und kann von der nachfolgenden Kultur genutzt werden (Richner *et al.* 2017). Wenn Leguminosen als Gründüngung angebaut werden, fixieren sie zusätzlich Stickstoff aus der Luft durch Symbiose mit *Rhizobia*-Bakterien. Die Nutzung von Zwischenfrüchten als Gründüngungen ist aus diesen mehreren Gründen klimarelevant. Der Stickstoffbedarf der nachfolgenden Kultur wird so zu einem Teil durch den verfügbaren Stickstoff aus der Gründüngung gedeckt und somit der Bedarf an Stickstoffdünger reduziert. Als Tierfutter genutzte Zwischenfrüchte werden dagegen geerntet und an Tiere verfüttert. Der Stickstoff steht also nicht der nachfolgenden Kultur zur Verfügung. Mit der zusätzlichen Produktion von Grünfütter können Landwirtschaftsbetriebe aber einen Teil ihres externen Raufutterzukaufs substituieren.

Die Massnahme besteht darin, mineralische Stickstoffdünger mit Stickstoff aus Gründüngungen zu substituieren, indem als Zwischenfutter genutzte Flächen neu als Gründüngungsflächen genutzt werden und der Zukauf von mineralischem Stickstoffdünger reduziert wird. Die entsprechende Menge dadurch ausgefallenen Futters muss der Betrieb dann zukaufen. Das Referenzszenario bildet einen Betrieb mit einer 100%igen Nutzung seiner Zwischenfruchtflächen als Tierfutter ab. Die Zwischenfruchtflächen werden dort mit 30 kg N/ha gedüngt.

In den Modellbetrieben werden Zwischenfruchtflächen im August (08) gesät und entweder im Januar (01) oder im Mai (05) eingearbeitet. Daraus ergeben sich 2 Typen von Gründüngungen mit unterschiedlichen Eigenschaften, für die Zeiträume von August bis Januar (08-01) und von August bis Mai (08-05). Die Fläche der Zwischenfrüchte wurden aus den Modellbetrieben entnommen (Tabelle 15) (Hersener *et al.* 2011).

Als Gründüngung wurden verschiedene Arten wie z.B. Ölrettich, Rübsen, Senf, Phacelia oder Klee verwendet. Phacelia, Senf und nicht winterharte Leguminosen (08-01), welche im Herbst eingearbeitet werden, reduzieren den Stickstoffbedarf der Nachfolgekultur gemäss GRUD (2017) um 15 kg N/ha (Richner *et al.* 2017). Für Ölrettich, Rübsen und winterharte Leguminosen kann der Stickstoffbedarf im Mittel um 25 kg N/ha reduziert werden, wenn diese im Frühling eingearbeitet werden (Richner *et al.* 2017). Zudem werden in dieser Massnahme Gründüngungen nicht gedüngt.

Der dadurch eingesparte Stickstoffdünger wurde basierend auf der vorhandenen Zwischenfruchtfläche und der durchschnittlichen Reduktion des Stickstoffbedarfs der nachfolgenden Kultur berechnet. Die berechnete Stickstoffeinsparung wurde anschliessend für alle Modellbetriebe proportional zur Fläche auf die nachfolgenden Ackerkulturen aufgeteilt und dem Bedarf der Kultur angerechnet. Der total eingesparte Dünger pro Betrieb sowie das zusätzlich benötigte zugekaufte Raufutter sind in Tabelle 15 dargestellt.

Tabelle 15: Kennzahlen der Massnahme «Gründüngung»

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schwein
Zwischenfruchtflächen [ha LN]	7.3	1.6	0.8	0.9
Eingesparter Mineraldünger auf Betrieb [kg N/ha Gründüngung]	-7.1	-10.6	-4.5	-8.1
Zusätzlich zugekauftes Heu [kg/Jahr]	20'801	5'154	2'524	2'796

4.6.2 Erzielte Reduktion des Treibhauspotenzials und weitere Umweltwirkungen

Durch die Düngereinsparung bei der Massnahme «Gründüngung» erzielten die Modellbetriebe Treibhausgasreduktionen von 105.3 kg CO₂-Äq bis 4'348.7 kg CO₂-Äq (Tabelle 16). Der Ackerbaubetrieb, welcher von den betrachteten Modellbetrieben die grösste Zwischenfruchtfläche aufweist (Tabelle 15), erreichte dabei die grösste Düngeeinsparung und Reduktion seines betrieblichen Treibhauspotenzials (4.0% in Abbildung 16). Die Düngeeinsparung senkte die Feldemissionen. Ebenso verringerte sich der Maschineneinsatz für die Düngeausbringung und folglich der Treibstoffverbrauch («Energieträger auf Hof»). Mit einem kleineren Maschinenpark wurde zum Beispiel ein kleinerer Unterstand oder eine kleinere Garage benötigt, wodurch sich die Wirkung der Inputgruppe "Gebäude und Einrichtungen" verringerte. Die Emissionen aus der Tierhaltung änderten sich durch die geänderte Futterzusammensetzung. Diese Einsparungen überwogen dabei die Erhöhung des Treibhauspotenzials in der Inputgruppe «Futterzukauf» für drei der Modellbetriebe leicht (Abbildung 16). Beim Modellbetrieb Schwein wurden im Vergleich zur Referenz mehr Treibhausgasemissionen ausgestossen als eingespart (Abbildung 16).

Bezogen auf die vom Betrieb produzierten MJ VE betragen die Änderungen 0.2 bis -4.0 g CO₂-Äq/MJ VE (Tabelle 16) resp. 0% bis -4.0% (Abbildung 17). Analog zur Treibhausgaseinsparung des Gesamtbetriebes wies der Ackerbaubetrieb auch hier die grösste Einsparung auf (Tabelle 16).

Mit der Massnahme wurde unter anderem das Treibhauspotenzial, der Ressourcenbedarf K und P, die aquatische Eutrophierung N sowie die terrestrische Ökotoxizität gesenkt (Abbildung 18). Auf der anderen Seite erhöhte die Massnahme den Flächenbedarf, die terrestrischen Eutrophierung und aquatische Eutrophierung P (Abbildung 18). Der Flächenbedarf nahm zu, da für die Produktion des zugekauften Futters zusätzliches Land benötigt wurde. Ebenfalls fand aufgrund des Futterzukaufs eine Nährstoffanreicherung und Versauerung im Ökosystem statt. Dieser Effekt zeigte sich in den erhöhten Umweltwirkungen «terrestrisches sowie aquatisches Eutrophierungspotenzial» und «Versauerungspotenzial» (Abbildung 18).

Tabelle 16: Treibhausgasreduktion der Massnahme «Gründüngung»

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schwein
Eingesparte Treibhausgase, Gesamtbetrieb [kg CO ₂ -Äq.]	-4348.7	-332.4	-105.3	100.0
Eingesparte Treibhausgase pro erzeugte Megajoule verdaulicher Energie [g CO ₂ -Äq./MJ VE]	-4.0	-0.6	-0.9	0.2

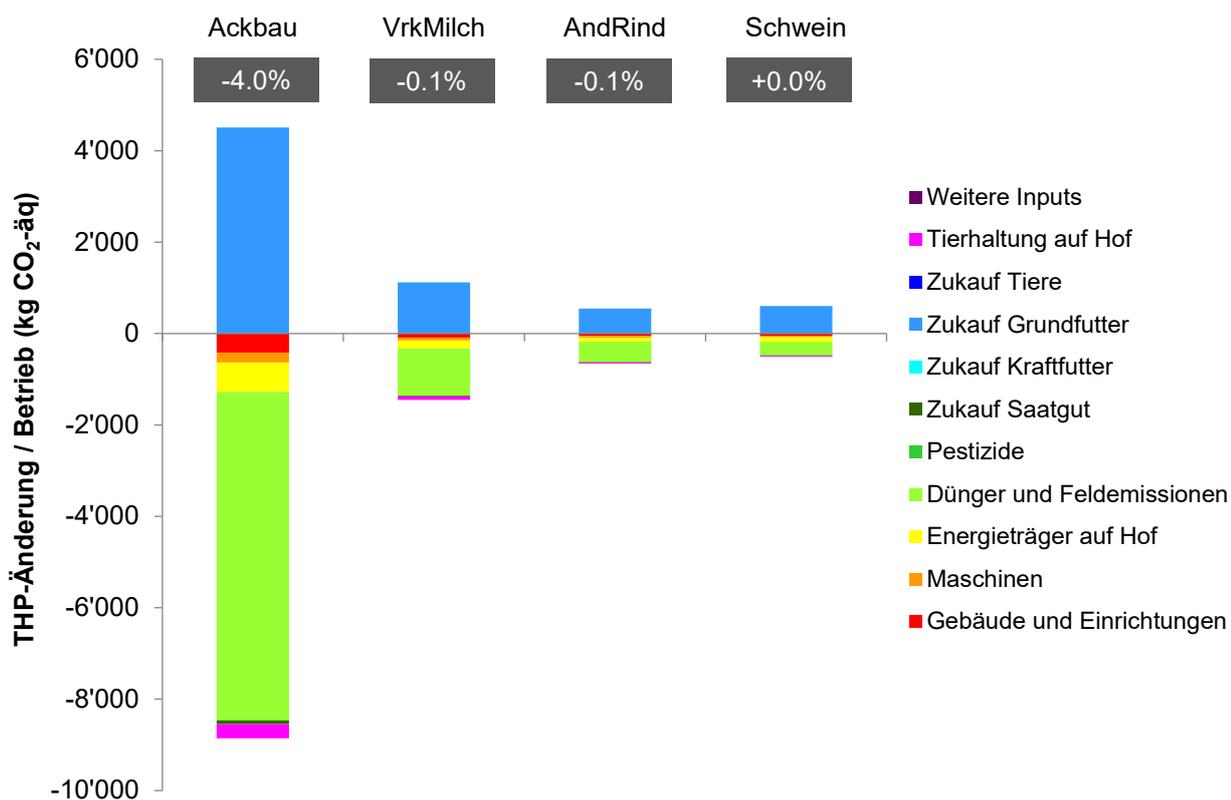


Abbildung 16: Änderung des Treibhauspotenzials der Modellbetriebe bei Umsetzung der Massnahme «Gründüngung».

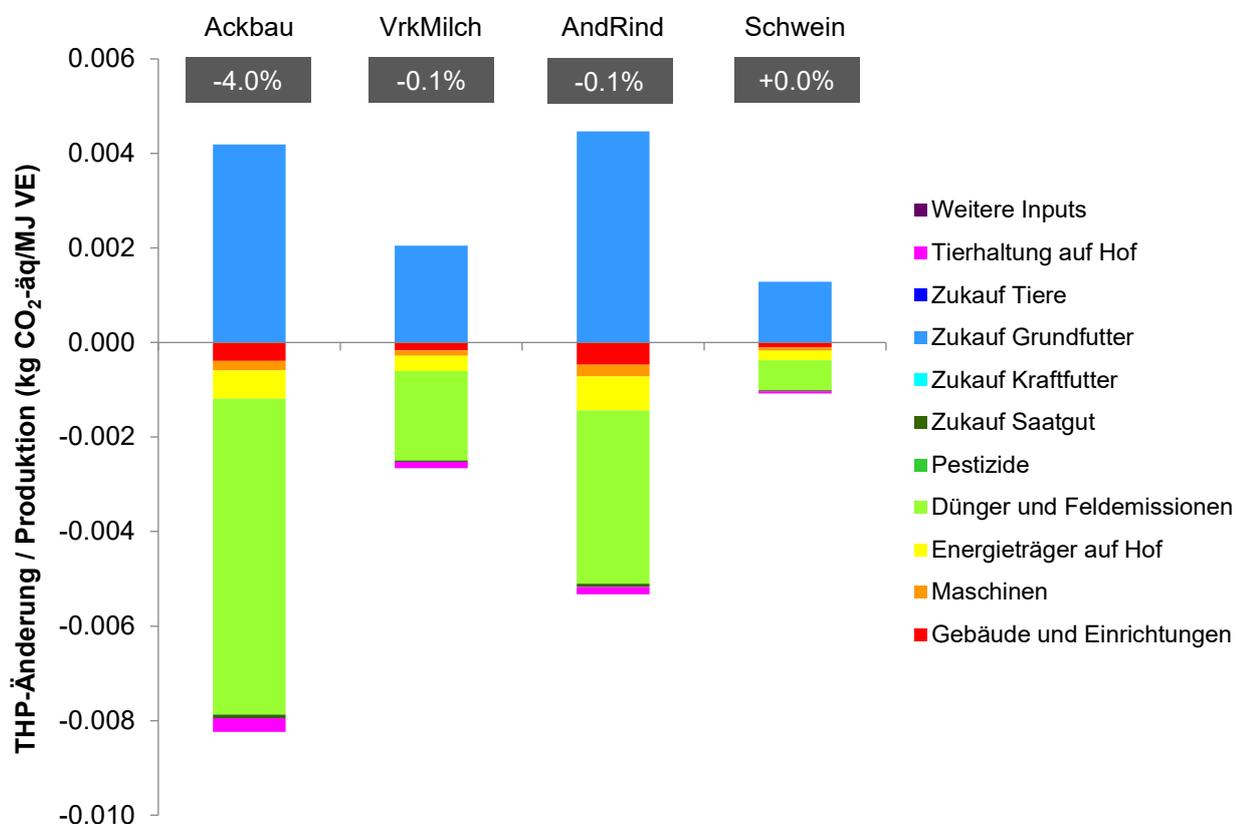


Abbildung 17: Änderung des Treibhauspotenzials pro MJ VE der Modellbetriebe bei Umsetzung der Massnahme «Gründüngung».

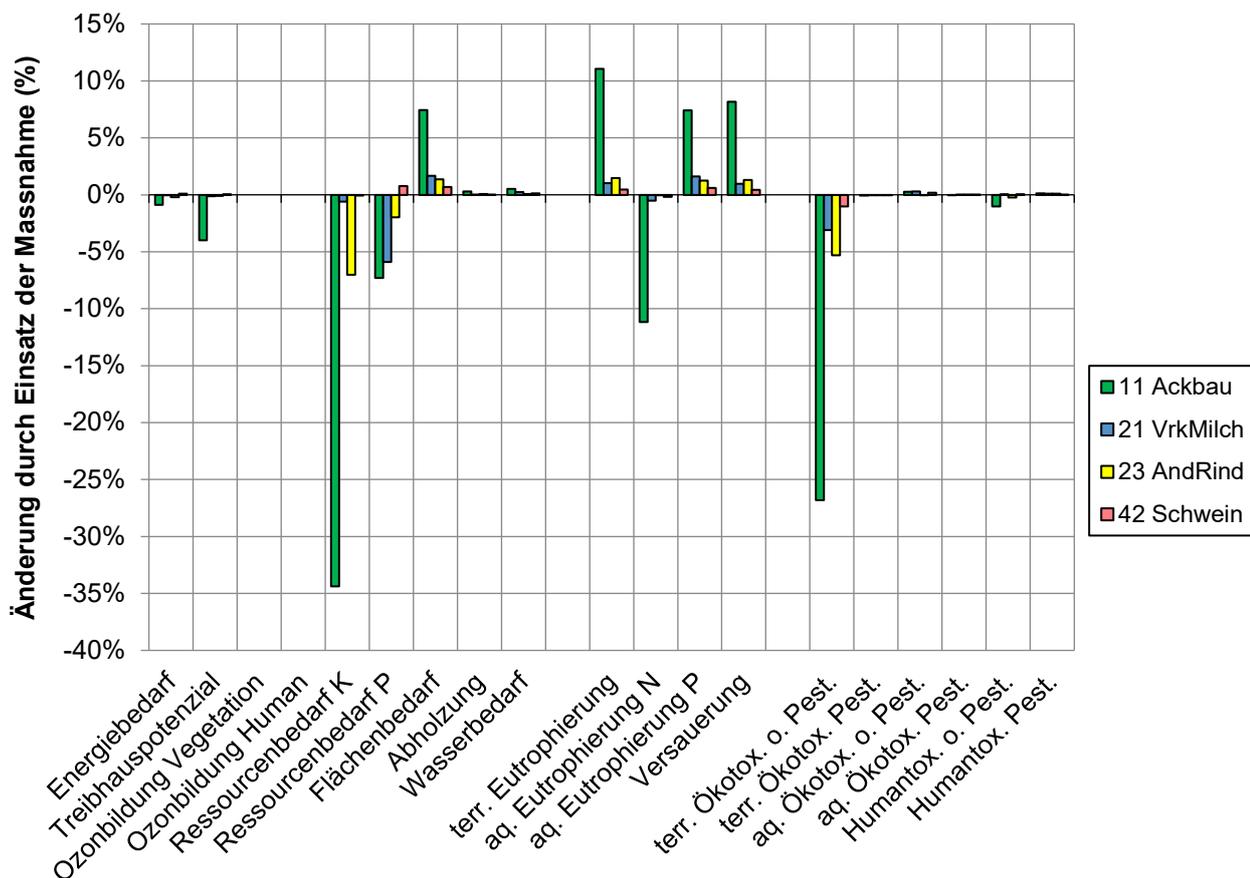


Abbildung 18: Einfluss der Massnahme «Gründüngung» auf weitere Umweltwirkungen. Abweichung der Ergebnisse mit umgesetzter Massnahme von den Ergebnissen der Betriebe ohne umgesetzte Massnahme.

4.6.3 Diskussion

Die Massnahme «Gründüngung» wies eine durchschnittliche Einsparung von rund 447 kg CO₂-Äq pro Hektar eingesetzter Gründüngung über alle Modellbetriebe gesehen auf. Analog zu Alig *et al.* (2015) stand der Nutzen aus der Gründüngung (Reduktion des Düngers) auch in der neuen Berechnung in Konkurrenz mit dem Nutzen aus dem Zwischenfutter (Verwendung als Tierfutter). Für die Höhe der Treibhausgaseinsparung ist die eingesparte Menge an Stickstoffdünger relevant. Die Produktion von Stickstoffdünger benötigt viel Energie und setzt dadurch Treibhausgase frei. Ein Teil der Treibhausgaseinsparung liess sich so über eine reduzierte Produktion von Stickstoffdünger erreichen. Ein noch wichtigerer Effekt auf die Treibhausgaseinsparung wurde aber mit einer reduzierten Ausbringung von Stickstoffdünger auf dem Feld erreicht. Die Nitratauswaschung und die Emissionen von Lachgas (N₂O) waren dadurch geringer. In Alig *et al.* (2015) wurde hauptsächlich der erste Effekt der Produktion von Stickstoffdünger in der Berechnung berücksichtigt, während der letztere Effekt nicht gänzlich in die Berechnung mit einfluss. Aus diesem Grund fiel die berechnete Treibhausgaseinsparung bei der neuen Berechnung grösser aus. Negative Auswirkungen auf weitere Umweltwirkungen von mehr als 1% sind als bedeutend einzustufen. Dies betrifft der Flächenbedarf sowie weitere Umweltwirkungen im Bereich Eutrophierung.

Die Höhe des Stickstoffdüngers, der durch Gründüngung eingespart werden kann, hängt gemäss Richner *et al.* (2017) von der Wahl der Kultur ab. Bei Einarbeitung der Gründüngung im Herbst resp. Winter kann die Stickstoffdüngung der nachfolgenden Kultur so um 20 kg N/ha resp. 30 kg N/ha korrigiert werden (Richner *et al.* 2017). Die in Alig *et al.* (2015) berechneten Stickstoffeinsparungen durch Gründüngungen auf den zugrundeliegenden Modellbetrieben lagen bei 12.70 kg N/ha für die Gründüngungsvariante 08-01 und 22.00 kg N/ha für die Variante 08-05. In der neuen Berechnung lagen diese Einsparungen mit 15.00 kg N/ha für die Variante 08-01 und 25.00 kg N/ha für die Variante 08-05 etwas höher. In beiden Fällen wurde das gemäss Richner *et al.* (2017) theoretisch ausschöpfbare Potenzial nicht erreicht.

4.7 Ausbringung von Pflanzenkohle auf das Feld

4.7.1 Beschreibung der Massnahme

Pflanzenkohle ist ein kohlenstoffreiches Material, welches mittels Pyrolyse unter Sauerstoffausschluss bei Temperaturen zwischen 300°C bis 1000°C aus pflanzlicher Biomasse hergestellt wird (Zhang *et al.* 2015).

Bei der Pyrolyse wird der in der Biomasse gespeicherte Kohlenstoff gebunden. Studien zeigen, dass sich Pflanzenkohle im Vergleich zum Ausgangsrohstoff nur sehr langsam im Boden abbaut. Der in den Boden eingebrachte Kohlenstoff verbleibt je nach Eigenschaften der Pflanzenkohle und Bodentyp über Jahrhunderte bis Jahrtausende im Boden und stellt somit eine CO₂-Senke dar (Smith 2016; Leng *et al.* 2019). Zusätzlich zu diesem Effekt wurde gezeigt, dass Pflanzenkohle die Lachgasemissionen aus dem Boden um bis zu 40% senkt (Cayuela *et al.* 2014; Felber *et al.* 2014). Weitere Studien stellten fest, dass Pflanzenkohle die Wasserhaltekapazität und die Nährstoffverfügbarkeit in nährstoffarmen Böden erhöht (Liu *et al.* 2017; Fischer *et al.* 2019; Karimi *et al.* 2020). Bei nährstoffreichen Böden ist dieser Effekt jedoch weniger gut untersucht. Deshalb wird er in dieser Analyse nicht berücksichtigt.

Die Ausgestaltung der Massnahme orientiert sich an der bereits berechneten Massnahme in Alig *et al.* (2015). Analog dazu wurde mit einer Ausbringung von 50 t Pflanzenkohle pro Hektar über 50 Jahre auf das Feld gerechnet, aufgeteilt auf 5 Chargen von jeweils 10 t Pflanzenkohle (alle 10 Jahre) (Woolf *et al.* 2010). Im Schnitt resultiert so eine Pflanzenkohleausbringung von 1 t pro Hektar und Jahr. Die Pflanzenkohle wird zusammen mit Mist auf das Feld ausgebracht (Alig *et al.* 2015). Durch das zusätzlich auszubringende Material steigt der Treibstoff- und Maschineneinsatz.

Das neu erstellte Ökoinventar für die Produktion von Pflanzenkohle bildet einen Pyrolyseprozess bei ca. 800°C mit Waldholz als Ausgangssubstrat ab und beinhaltet die Umweltwirkungen aller daran beteiligten Prozesse wie die Bereitstellung der nötigen Infrastruktur für die Pyrolyse, den Transport von Materialien sowie die Entsorgung der Abfälle gemäss Bergman *et al.* (2016).

Entgegen Alig *et al.* (2015) wird in dieser Version der Massnahme zusätzlich die Wirkung auf den Kohlenstoffvorrat im Waldboden berücksichtigt. Da das Holz dem Waldboden entzogen und zur Produktion von Pflanzenkohle genutzt wird, verbleibt weniger Holz im Wald. Das wirkt sich negativ auf die Humusbilanz des Waldbodens aus. Durch diesen Entzug ist die insgesamt im Boden gespeicherte Menge an Kohlenstoff geringer als wenn man nur die Anreicherung im Ackerboden berücksichtigt. Dieser Tatsache muss Rechnung getragen werden, da sonst das Reduktionspotenzial von Pflanzenkohle überschätzt wird. Der Kohlenstoffverlust im Waldboden wurde mithilfe des RothC-Modells (Coleman und Jenkinson 1996) und entsprechenden Parametrisierungsfaktoren (u.a. Bodentyp, Temperatur, Niederschlag, Dekompositionsraten Holz) für diese Massnahme berechnet. Das RothC-Modell ist ein Modell zur Berechnung der Bodenkohlenstoffbilanz über längere Zeithorizonte (Coleman und Jenkinson 1996).

Der Kohlenstoff, welcher mit der Pflanzenkohle in den Ackerboden eingetragen wird, erhöht dort den Bodenkohlenstoffgehalt. Teilweise wird dieser Kohlenstoff in Form von CO₂ wieder emittiert. Die Menge des nach 50 Jahren noch im Ackerboden vorhandenen Kohlenstoffs wurde mithilfe eines 2-Pool-Modells berechnet (Leng *et al.* 2019). Für die Daten zur Abbaubarkeit von Pflanzenkohle wurde jeweils zwischen einer stabilen und einer labilen Kohlenstofffraktion unterschieden. Die Daten zur mittleren Verweildauer ($MRT_{\text{stabil}} = 1271$ Jahre und $MRT_{\text{labil}} = 0.008$ Jahre) von Pflanzenkohle im Boden sowie zu den labilen und stabilen Boden-Kohlenstoffpools ($C\text{-Pool}_{\text{stabil}} = 99.91\%$ und $C\text{-Pool}_{\text{labil}} = 0.09\%$) sind aus Singh *et al.* (2012) entnommen. Der C-Gehalt der Pflanzenkohle wurde auf 75% festgelegt (Trompowsky *et al.* 2005; Bergman *et al.* 2016). Zur Berechnung der Lachgasreduktion durch die Ausbringung von Pflanzenkohle auf Ackerböden wurde gemäss Felber *et al.* (2014) von einem Reduktionspotenzial von 20% der Lachgasemissionen ausgegangen. Aufgrund fehlender langfristiger Studien wurde eine Lachgasreduktion nur für die ersten 2 Jahre modelliert

4.7.2 Erzielte Reduktion des Treibhauspotenzials und weitere Umweltwirkungen

Die Ausbringung von Pflanzenkohle auf das Feld erzielte bei den Modellbetrieben Treibhausgasreduktionen von 1'117 kg CO₂-Äq bis 1'124 kg CO₂-Äq (Tabelle 17). Da die Menge ausgebrachter Pflanzenkohle bei allen Modellbetrieben gleich gross war (1 t Pflanzenkohle pro Jahr, unabhängig von der Betriebsgrösse), waren die Treibhausgasemissionen aus der Pflanzenkohleproduktion (Inputgruppe «Weitere Inputs» in Abbildung 19) gleich hoch. Ebenso war die Kohlenstoffspeicherung im Boden gleich (abgebildet in der Inputgruppe "Dünger und Feldemissionen" in Abbildung 16, die dadurch negativ ist). Die Kohlenstoffspeicherung im Boden und die Reduktion der Lachgasemissionen überwogen die Treibhausgasemissionen bei der Herstellung der Pflanzenkohle, wodurch für alle Modellbetriebe total gesehen eine Treibhausgasreduktion resultierte (Abbildung 19). Die zusätzlichen Treibhausgasemissionen durch den höheren Maschinenbedarf für die Ausbringung der Pflanzenkohle waren aufgrund der geringen Wirkung in Abbildung 19 nicht sichtbar (3.43 kg CO₂-Äq/Betrieb, Inputgruppe «Maschinen» in orange).

Bezogen auf vom Betrieb produzierten MJ VE betragen die Einsparungen 1.2 bis -9.9 g CO₂-Äq/MJ VE (Tabelle 17) resp. 0.3% bis 1.2% (Abbildung 20). Da die Treibhausgaseinsparung auf allen Modellbetrieben absolut gesehen fast gleich war, wies der Modellbetrieb Anderes Rindvieh aufgrund der geringeren Produktionsmenge die grösste Treibhausgaseinsparung pro MJ VE auf (Tabelle 17).

Abgesehen vom Treibhauspotenzial wurden in allen anderen betrachteten Umweltwirkungen ungünstige Umweltwirkungen festgestellt, wie zum Beispiel im Energie- und Flächenbedarf sowie der Humantoxizität (Abbildung 21).

Die Ursache für den hohen Energiebedarf ist der hohe Wärmebedarf der Pyrolyseanlage, um die Pyrolysetemperatur konstant auf rund 800°C zu halten. Der Wärmebedarf wurde im Ökoinventar über die Verbrennung mit Erdgas abgebildet. Gleichzeitig zum Energiebedarf steigt auch der Flächenbedarf, da zur Produktion von Pflanzenkohle Holz geschlagen werden muss, welches im Wald Fläche benötigt. Ungünstige Umweltwirkungen in der Öko- und Humantoxizität beruhen auf der Verbrennung von Erdgas für die Wärmeerzeugung.

Tabelle 17: Treibhausgasreduktion der Massnahme «Ausbringung Pflanzenkohle auf das Feld»

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schwein
Eingesparte Treibhausgase, Gesamtbetrieb [kg CO ₂ -Äq.]	-1'124	-1'122	-1'117	-1'117
Eingesparte Treibhausgase pro erzeugte Megajoule verdaulicher Energie [g CO ₂ -Äq./MJ VE]	-0.1	-0.5	-0.8	-0.7

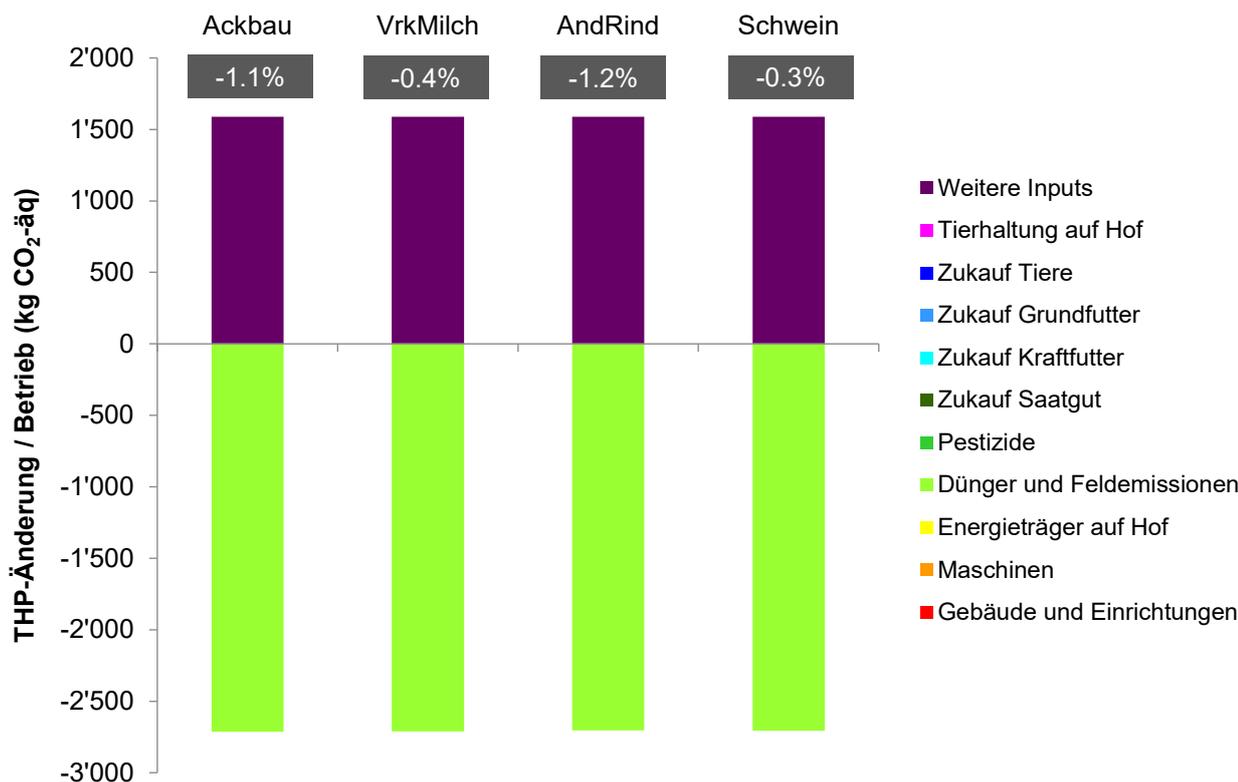


Abbildung 19: Änderung des Treibhauspotenzials der Modellbetriebe bei Umsetzung der Massnahme «Ausbringung von Pflanzenkohle auf das Feld».

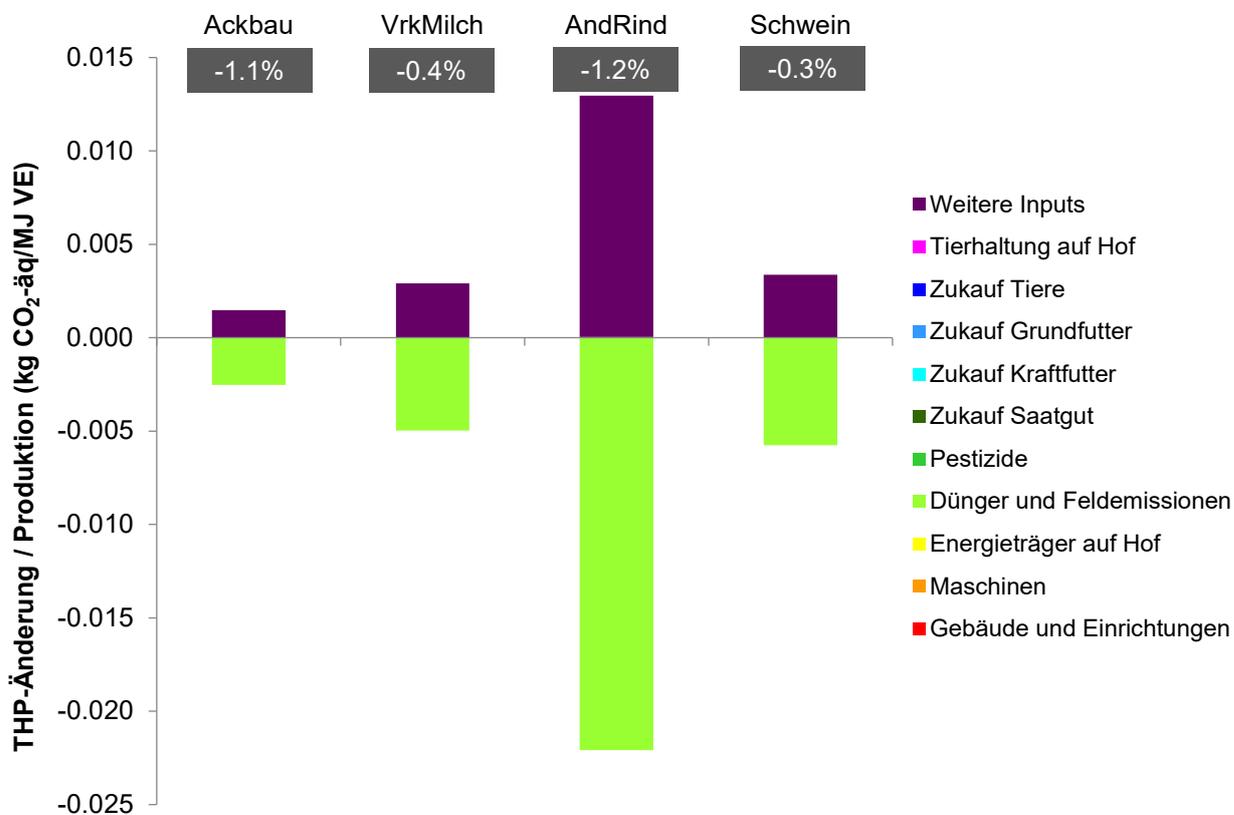


Abbildung 20: Änderung des Treibhauspotenzials pro MJ VE der Modellbetriebe bei Umsetzung der Massnahme «Ausbringung von Pflanzenkohle auf das Feld».

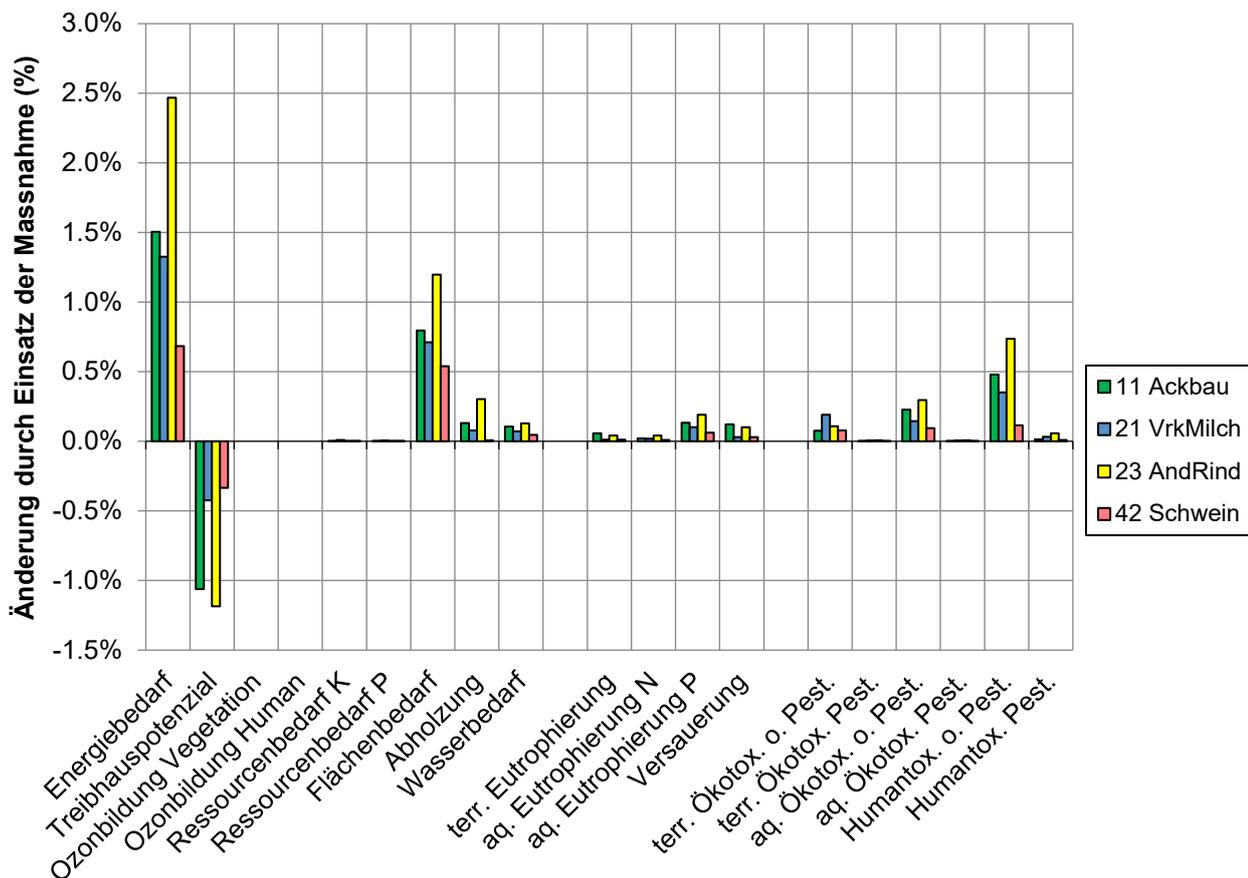


Abbildung 21: Einfluss der Massnahme «Ausbringung von Pflanzenkohle auf das Feld» auf weitere Umweltwirkungen. Abweichung der Ergebnisse mit umgesetzter Massnahme von den Ergebnissen der Betriebe ohne umgesetzte Massnahme.

4.7.3 Diskussion

Die Ergebnisse der Massnahme «Ausbringung von Pflanzenkohle auf das Feld» zeigen eine im Verhältnis zu den anderen Massnahmen relativ hohe Treibhausgaseinsparung. Diese Einsparung geht, aufgrund der Energie, welche nötig ist, um den Pyrolyseprozess in Gang zu bringen, mit einem gewissen Trade-Off im Energiebedarf einher. Der Pyrolyseprozess wurde in dieser Berechnung vollständig abgebildet (von der Produktion von Holz bis zur Abfallentsorgung). Im Vergleich zu der Berechnung aus Alig *et al.* (2015) verursacht der Pyrolyseprozess pro Tonne produzierter Pflanzenkohle höhere Treibhausgasemissionen (0.88 statt 0.15 kg CO₂-Äq). Zusammen mit dem Verlust des Kohlenstoffvorrats im Waldboden erreicht die Massnahme somit eine tiefere Treibhausgaseinsparung als in Alig *et al.* (2015).

Für diese Massnahme wurde ein «schneller» Pyrolyseprozess betrachtet, bei welchem das Holz unter Sauerstoffausschluss während kurzer Zeit zu Pflanzenkohle verbrannt wird. Als Alternative könnte auch ein «langsamer» Pyrolyseprozess verwendet werden. Dieser benötigt tendenziell weniger Wärme und so weniger Heizmaterial, was zu einer geringeren Menge ausgestossener Treibhausgasemissionen führen würde. Auf der anderen Seite wäre der Kohlenstoffgehalt in der Pflanzenkohle tiefer als bei der schnellen Pyrolyse, wodurch sich weniger Kohlenstoff im Boden speichern liesse. Ob die Wahl des Pyrolyseprozesses zu einer starken Änderung der aktuellen Treibhausgaseinsparung führen würde, ist ungewiss und müsste genauer untersucht werden.

Der Effekt einer Lachgasreduktion wurde bereits in Alig *et al.* (2015) berücksichtigt. Dabei wurde pauschal mit einer Reduktion von 20% der Lachgasemissionen gerechnet, abgeleitet aus Felber *et al.* (2014). Dort wurde dieser Effekt während 2 Jahren gemessen. Ob die Lachgasreduktion langfristig anhält, ist gemäss heutigem Stand der Forschung ungewiss, da entsprechende Versuche dazu noch stattfinden oder erst starten. Gemäss Studien wie Cayuela *et al.* (2014) oder He *et al.* (2017) wurde dieser Effekt für kürzere Zeithorizonte in der Praxis mit teils verschiedenen Ergebnissen untersucht. Da mit der Massnahme ein Zeithorizont von 50 Jahren betrachtet wird, ist eine pauschale Aussage zur Lachgasreduktion schwierig.

Ausserdem ist zu vermerken, dass der Effekt einer Treibhausgaseinsparung mit der Massnahme Pflanzenkohle stark vom Pflanzenkohletyp (abhängig vom Pyrolyseprozess und vom Ausgangssubstrat) und den Standortbedingungen (insbesondere vom Bodentyp) abhängen kann. Zum Ausmass dieser Unsicherheit stehen momentan keine Daten zur Verfügung.

Bei der Kaskadennutzung von Pflanzenkohle (Verfütterung der Pflanzenkohle, die dann mit dem Hofdünger aufs Feld gelangt) könnten weitere positive Effekte auf das Treibhauspotenzial hinzukommen, beispielsweise durch Emissionsreduktionen beim Tier oder während der Hofdüngerlagerung. Es wird vermutet, dass die Verfütterung von Pflanzenkohle die Methanbildung im Pansen von Wiederkäuern hemmt. Eine Literaturrecherche zeigte, dass dieser Effekt mit Unsicherheiten behaftet ist (siehe dazu Kapitel 10.1). Das Methaneinsparungspotenzial in den vorhandenen Studien ist oftmals wissenschaftlich unsicher. Bis auf wenige Studien existieren praktisch nur Labor-, jedoch kaum Praxisversuche. Im Bereich Hofdüngerlagerung ist ungewiss, ob oder in welchem Ausmass Pflanzenkohle vom Tier verdaut wird. Aus diesen Gründen konnte zum Zeitpunkt der Berechnung (Stand Frühjahr 2020) eine mögliche Treibhausgaseinsparung bei der Kaskadennutzung von Pflanzenkohle nicht ermittelt werden.

4.8 Agroforstsystem

4.8.1 Beschreibung der Massnahme

Als Agroforstsystem wird die Kombination von Bäumen mit landwirtschaftlichen Unterkulturen auf derselben Fläche bezeichnet (Jäger 2017). Dabei gibt es eine Vielzahl von sowohl traditionellen (z.B. Streuobstwiesen, Kastanienselven) wie auch modernen oder wiederentdeckten Systemen (z.B. Obstbäume kombiniert mit Ackerkulturen).

Neben möglicher Ressourcenkonkurrenz um Licht oder Wasser, welche durch die optimale Gestaltung eines Agroforstsystems minimiert werden sollen, führen positive Wechselwirkungen zwischen Bäumen und den Unterkulturen zu einer Reihe von erwünschten Auswirkungen, wie z.B. zu Erosionsschutz, verringerter Nährstoffauswaschung, oder zu positiven Einflüssen auf die Biodiversität (Kaeser *et al.* 2010). Durch die Speicherung von Kohlenstoff in den Bäumen sind Agroforstsysteme auch klimarelevant.

Zur Abschätzung der Klimawirkung wurde von Alig *et al.* (2015) ein System mit Apfelbäumen zur Obstproduktion in der Kombination mit Ackerkulturen berechnet. Alig *et al.* (2015) schlugen zudem vor, als Alternativsystem ein Agroforstsystem mit schnellwachsenden Energiehölzern zu berechnen. Dieses System wurde allerdings nicht berücksichtigt, da die Relevanz für die Schweiz als unbedeutend beurteilt wurde. Dies einerseits aufgrund des Direktzahlungssystems, weil im Gegensatz zu schnellwachsenden Hölzern für Hochstammobstbäume und Wildobstsorten Beiträge entrichtet werden, andererseits, weil der Schweizer Wald noch stärker genutzt werden könnte und darum eine Energieholzproduktion auf Landwirtschaftsflächen wenig sinnvoll erscheint.

Für diese Massnahme wurde ein extensiveres (weniger Input von Arbeit und Produktionsmitteln) Agroforstsystem in der Kombination aus Wertholzproduktion und Ackerflächen berechnet. Als Baumart wurden dabei Nussbäume berücksichtigt (Empfehlung von S. Kay, Agroscope, Mai 2020). Während in einigen Fällen die produzierten Nüsse genutzt und allenfalls vermarktet werden können, liegt der Fokus im betrachteten System auf der Wertholznutzung. Aufgrund von erforderlichem Aufwand und den Marktgegebenheiten ist die Nussnutzung sekundär (Markt für einheimische Nüsse noch nicht etabliert/im Aufbau (Götz 2020), eher für Direktvermarktung geeignet). Aus diesen Gründen wurde auf die Berücksichtigung eines Nussertrags verzichtet.

Um die beiden Systeme vergleichen zu können, wurde das Wertholz-System nach dem Vorbild des Obst-Systems aus Alig *et al.* (2015) gestaltet und es wurden wo möglich dieselben Annahmen getroffen. Zudem wurde für die Vergleichbarkeit das Obst-System (aufgrund von Versionsunterschieden der Ökobilanzsoftware) neu berechnet. Mit einer Kohlenstoffspeicherung von $1.6 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Jäger 2018; Kay *et al.* 2019) wurde in beiden Agroforstsystemen neu die gesamte Baumbiomasse (ober- und unterirdisch) berücksichtigt, während Alig *et al.* (2015) nur die oberirdische Baumbiomasse berücksichtigten.

Wie beim Obst-System wurde davon ausgegangen, dass am Ende der Nutzungsdauer eines Einzelbaums von 60 Jahren das System weiterbesteht und die genutzten Bäume wieder durch Jungbäume ersetzt werden.

In der Analyse berücksichtigt wurden der Aufwand für das Bepflanzen der Fläche, die Pflege (wiederholtes entasten, Baumstreifen mulchen), und die Holzernte. Als Ertrag wurde der durch die Bäume im System (inkl. verkaufte Wertholz) gespeicherte Kohlenstoff berücksichtigt, sowie Brennholz als Nebenprodukt, welches durch eine energetische Verwertung Heizöl substituiert. In Bezug auf die Unterkulturen wurde wegen der Beschattung im späteren Verlauf ein Ertragsrückgang berücksichtigt (Tabelle 18), und es wurde davon ausgegangen, dass die Unterkulturen im Agroforstsystem gleich weiterbewirtschaftet werden wie zuvor auf der reinen Ackerfläche.

Tabelle 18: Kennzahlen zur Massnahme „Agroforstsystem“ in der Variante Wertholz

Variablen	Annahmen	
Fläche für AFS	20 % der gesamten Ackerbaufläche (Modellbetriebe)	
	Ackbau	4.3 ha
	VrkMilch	1.3 ha
	AndRind	1.0 ha
	Schwein	0.9 ha
Flächenaufteilung (Häseli <i>et al.</i> 2000; Kaeser <i>et al.</i> 2011)	Bäume pro ha	50 Stück (auf 2000 m ²)
	Fläche Unterkulturen	8000 m ² /ha
Ertragsreduktion der Unterkultur (Seidel und Jäger, Agroscope/ Agridea, persönliche Mitteilung 2015)	Jahr 0-20: 0 % Jahr 20-60: jährliche Abnahme um 1 % des Ertrages vom Vorjahr	
Produkte	Wertholz (Stamm; nach 60 Jahren), Brennholz (Krone; nach 60 Jahren; Substitution fossiler Energieträger), Winterweizen (bei Ackbau), Grundfutter (bei VrkMilch, AndRind, Schwein)	
Zeithorizont (Palma <i>et al.</i> 2007; Kaeser <i>et al.</i> 2011)	60 Jahre	
Kohlenstoffspeicherung (Baumbiomasse) (Kay <i>et al.</i> 2019)	1.6 t C/ha/a → 5.87 t CO ₂ /ha/a	
Holzvolumen	53.3 m ³ / ha 60a (37.7 m ³ /ha 60a Wertholz, 15.6 m ³ /ha 60a Brennholz)	

4.8.2 Erzielte Reduktion des Treibhauspotenzials und weitere Umweltwirkungen

Durch die Etablierung eines Agroforstsystems mit Wertholz auf den Ackerflächen erzielten die Modellbetriebe durch die Kohlenstoffspeicherung Reduktionen ihres Treibhauspotenzials von 4.5 bis 24.5 t CO₂-Äq, was auf die Fläche bezogen einer Reduktion von 5.0 bis 5.7 t CO₂-Äq/ha entspricht (Tabelle 19). Im Vergleich zur Variante eines Agroforstsystems mit Apfelbäumen erzielte das Wertholz-System etwas tiefere Reduktionen des Treibhauspotenzials (Tabelle 19).

Abbildung 22 zeigt, dass das Treibhauspotenzial des Aufbaus und der Pflege eines Agroforstsystems («Weitere Inputs») im Vergleich zur Kohlenstoffspeicherung («Dünger und Feldemissionen») nur einen geringen Einfluss auf das Resultat hatte. Dasselbe gilt auch für den Grundfutterzukauf zur Kompensation des Minderertrags bei den Betrieben mit Kunstwiese als Unterkultur, sowie für den Energieertrag aus dem anfallenden Brennholz («Energieträger auf Hof»), im Fall des Systems mit Wertholz. Im Agroforstsystem mit Obst fällt mehr Brennholz an, da der Stamm nach dem Fällen des Baumes nicht als Wertholz genutzt wird, sodass mehr Heizöl eingespart wurde. Die generelle Aussage trifft aber auch dort zu (Abbildung 23).

Die Reduktion der Treibhausgasemissionen pro Betrieb war aufgrund der Fläche des Agroforstsystems mit Wertholz auf dem Ackerbaubetrieb am grössten. Bezogen auf die Produktion in verdaulicher Energie hingegen reduzierte der Betrieb «Anderes Rindvieh» sein Treibhauspotenzial mit -43 g CO₂-Äq/MJ VE am stärksten (Abbildung 24), da er insgesamt deutlich weniger MJ VE produzierte als die übrigen Betriebe (Alig *et al.* 2015). Der Ackerbaubetrieb kam auf -12 g CO₂-Äq/MJ VE, die Betriebe «Verkehrsmilch» und «Schweine» auf -12 resp. -10 g CO₂-Äq/MJ VE.

Auf dem Ackerbaubetrieb nahm die Produktion an verdaulicher Energie durch die Etablierung eines Agroforstsystems am meisten ab (-12%). Dies liegt daran, dass er am meisten Ackerfläche hatte und somit auch am meisten Produktionsfläche für Nahrungsmittel verlor. Bei den übrigen Betrieben wurde auf den Ackerflächen unter

anderem Futter produziert, welches über Zukauf kompensiert wurde, sodass die Produktion an verdaulicher Energie gleichblieb, weil die Tierhaltung unverändert fortgeführt werden konnte. Beim Ackerbaubetrieb sank die relative Einsparung pro MJ VE dadurch um 12.1%, während das Treibhauspotenzial des Gesamtbetriebes um 23.1% abnahm. Für die übrigen Betriebe war die relative Reduktion des Treibhauspotenzials pro MJ VE geringer als beim Ackerbaubetrieb, nämlich -5.6% (Anderes Rindvieh), -2.5% (Verkehrsmilch) und -1.4% (Schweine).

Für das System mit Obst fällt die Reduktion pro MJ VE nochmal anders aus. Während auf dem Ackerbaubetrieb die zusätzliche Obstproduktion den Minderertrag vom Weizen beinahe kompensieren konnte (-3% verdauliche Energie), erhöhte sich die Produktion an verdaulicher Energie auf den übrigen Betrieben um ca. 5% für die Betriebe «Verkehrsmilch» und «Schweine» und um 20% für den Betrieb «Anderes Rindvieh». Dadurch wird die Reduktion des Treibhauspotenzials pro MJ VE noch verstärkt. Der Effekt der gesteigerten Produktion war dabei sogar etwas grösser als jener der Kohlenstoffspeicherung und der Einsparung fossiler Energieträger (Inputgruppen «Dünger und Feldemissionen», sowie «Energieträger auf Hof» in Abbildung 25).

Für weitere Umweltwirkungen gilt dasselbe wie in Alig *et al.* (2015):

«Im Hinblick auf andere Umweltwirkungen waren in dieser Wirkungsabschätzung die Agroforstsystemen zugeschriebenen, positiven Wirkungen (wie z.B. die Verminderung der Nitratauswaschung) aufgrund fehlender Datengrundlage nicht enthalten, sondern nur die Emissionen, die bei der Etablierung, Pflege, Ernte und Rodung entstehen. Diese Wirkungsabschätzung bildet die Wirkung eines Agroforstsystems daher nur unvollständig ab, weshalb sie hier nicht gezeigt wird.»

Tabelle 19: Treibhausgasreduktion der Massnahme «Agroforstsystem»

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schwein
Agroforstsystem Wertholz				
Eingesparte Treibhausgase, Gesamtbetrieb [kg CO ₂ -Äq.]	-24'455	-6'664	-5'266	-4'552
Eingesparte Treibhausgase pro AFS-Fläche [kg CO ₂ -Äq./ha]	-5'714	-5'206	-5'064	-5'057
Agroforstsystem Obst				
Eingesparte Treibhausgase, Gesamtbetrieb [kg CO ₂ -Äq.]	-26'387	-7'241	-5'733	-4'927
Eingesparte Treibhausgase pro AFS-Fläche [kg CO ₂ -Äq./ha]	-6'165	-5'657	-5'513	-5'474

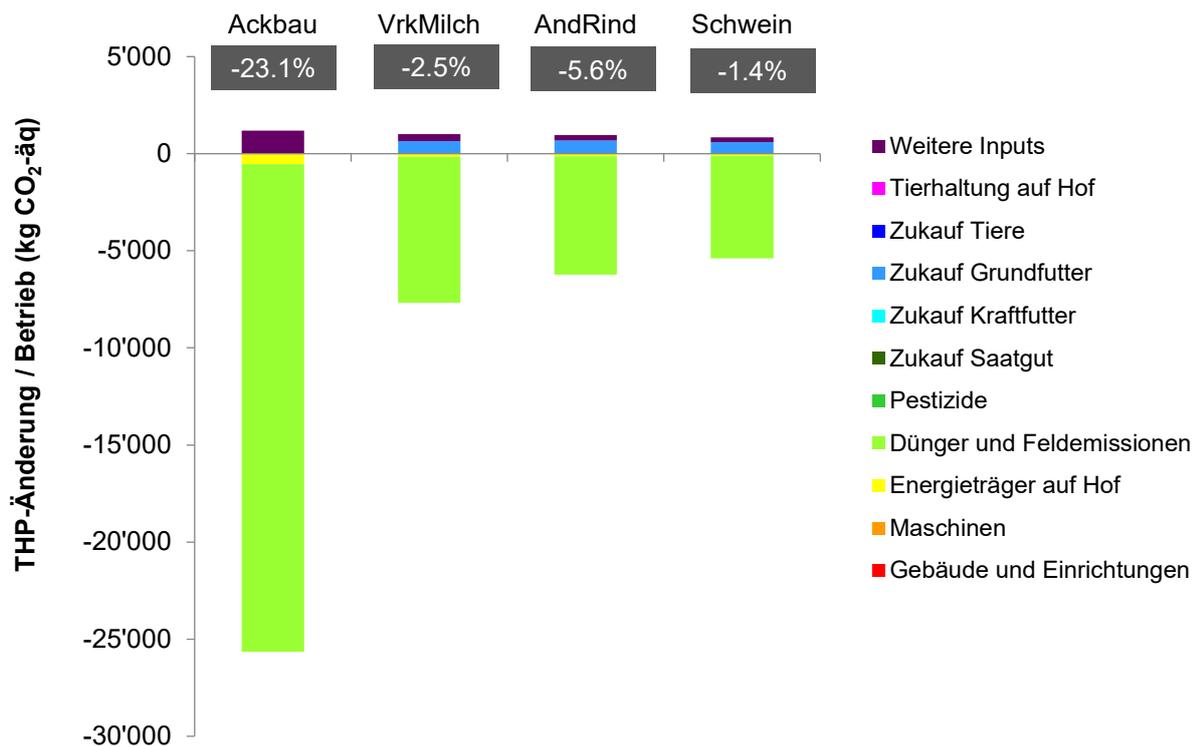


Abbildung 22: Änderung des Treibhauspotenzials der Modellbetriebe bei Umsetzung der Massnahme «Agroforstsystem (Variante Wertholz)».

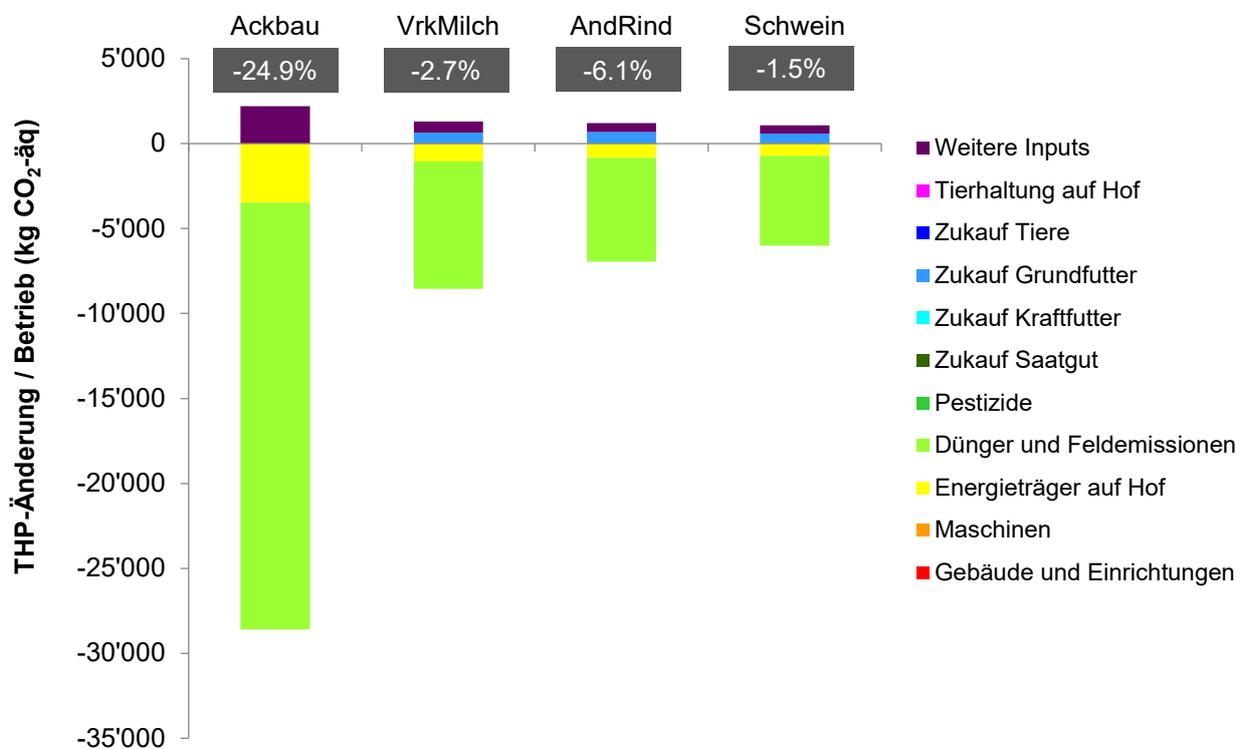


Abbildung 23: Änderung des Treibhauspotenzials der Modellbetriebe bei Umsetzung der Massnahme «Agroforstsystem (Variante Obst)».

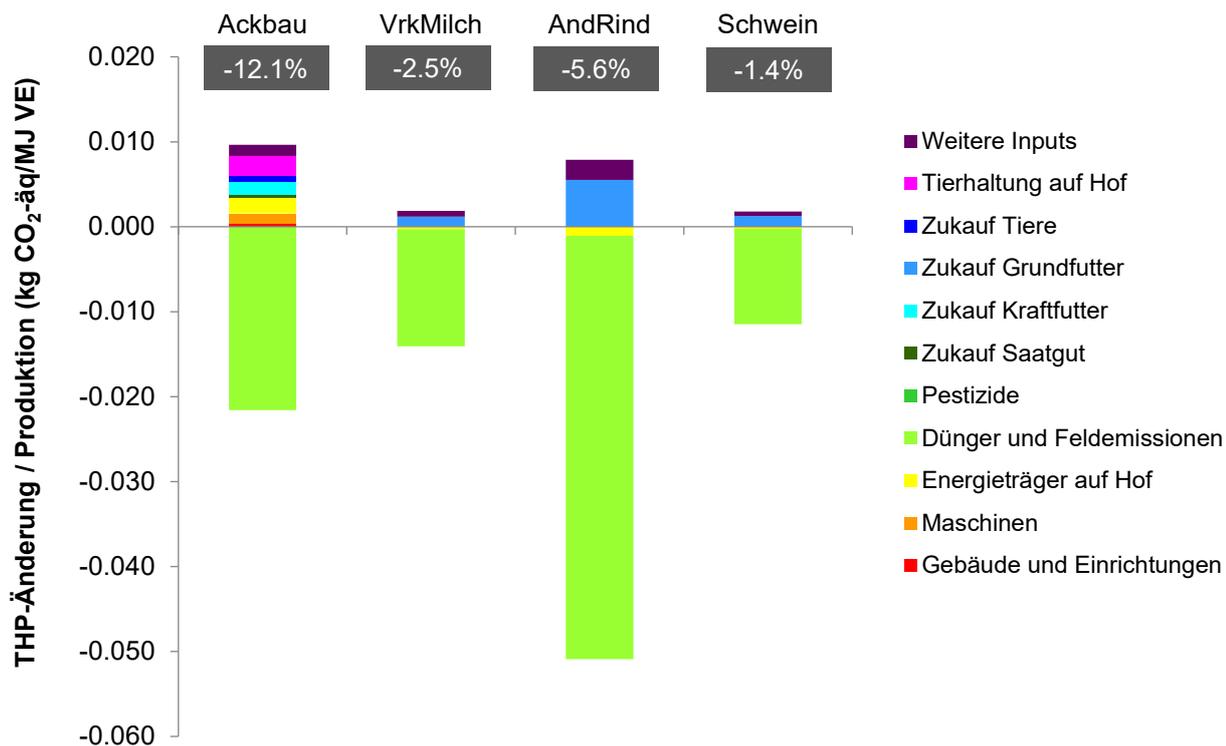


Abbildung 24: Änderung des Treibhauspotenzials pro MJ VE der Modellbetriebe bei Umsetzung der Massnahme «Agroforstsystem (Variante Wertholz)».

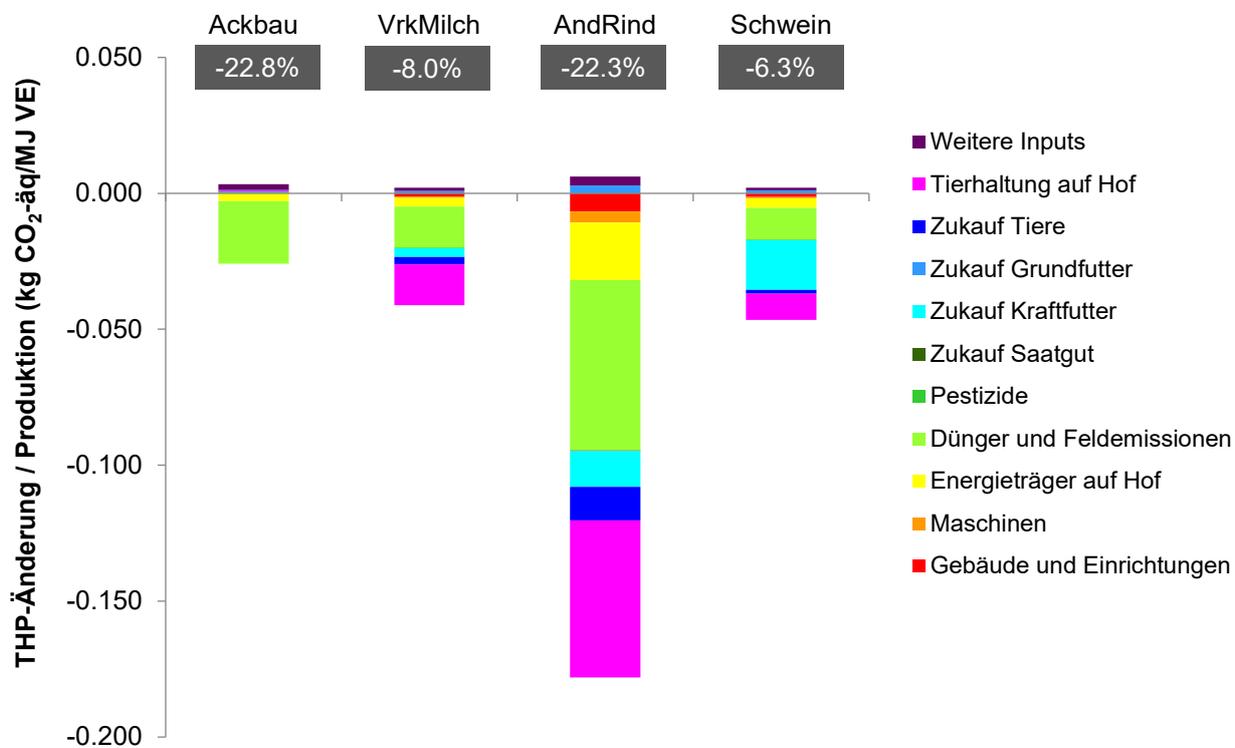


Abbildung 25: Änderung des Treibhauspotenzials pro MJ VE der Modellbetriebe bei Umsetzung der Massnahme «Agroforstsystem (Variante Obst)».

4.8.3 Diskussion

Die Unterschiede der beiden betrachteten Agroforstsysteme sind in ihrem absoluten Reduktionspotenzial gering, weil sich die Wirkung der Kohlenstoffspeicherung nicht unterscheidet, und sie die Wirkung der Inputs und der Brennholzverwertung in beiden Systemen deutlich überwiegt.

Während die meisten Massnahmen im Punktesystem direkt Treibhausgasemissionen reduzieren, so wird bei einem Agroforstsystem die Kohlenstoffspeicherung wie eine Reduktion angerechnet, auch wenn sich diese beiden Wirkungsweisen unterscheiden. In dieser Massnahme wird CO₂ aus der Luft zusätzlich gebunden. Die Höhe der Kohlenstoffspeicherung übersteigt dabei mengenmässig die Treibhausgaseinsparungen anderer Klimaschutzmassnahmen relativ schnell. Die Anrechnung ist aber an die Voraussetzung gebunden, dass das Agroforstsystem neu etabliert wird und langfristig weiterbesteht. Bei der Berechnung der Menge an gespeichertem Kohlenstoff wurden verschiedene Angaben gefunden, so dass diesbezügliche Unsicherheiten bestehen. In der vorliegenden Berechnung wurde die gesamte Baumbiomasse mit einem Wert von 1.6 t C/ha/Jahr berücksichtigt. Kim *et al.* (2016) beschrieben eine höhere Kohlenstoffspeicherung von 2.4 +/- 1.2 t C/ha/Jahr für die gesamte Baumbiomasse als Mittelwert aus sechs verschiedenen Studien.

Weitere Ökosystemleistungen von Agroforstsystemen, wie Erosionsschutz oder verringerte Nährstoffauswaschung, könnten ebenfalls indirekte Einflüsse auf die Treibhausgasemissionen haben. Da der Einfluss solcher Ökosystemleistungen auf das Treibhauspotenzial aber nicht in diesem Detail abgebildet werden kann und überwiegend geringe Effekte zu erwarten wären, wurden indirekte Einflüsse dieser Art nicht berücksichtigt.

Eine Überschätzung der Wirkung von Agroforstsystemen ist also, trotz einer stärkeren Berücksichtigung der Kohlenstoffspeicherung als in Alig *et al.* (2015), eher unwahrscheinlich, sofern die Annahme der Neuetablierung und des langfristigen Bestehens der Flächen erfüllt ist.

4.9 Recycling von Silofolien

4.9.1 Beschreibung der Massnahme

Jährlich fallen 110'000 Tonnen Polyethylen-haltige Folien (PE-Folien) aus Industrie, Landwirtschaft und Gewerbe als Abfall an (Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2012). Rund 70% dieser Abfälle werden nicht wiederverwertet, sondern landen in einer Kehrichtverbrennungsanlage (KVA). Bei der Verbrennung dieses Abfalls werden Treibhausgase freigesetzt. Für jedes nicht wiederverwertete Kilogramm alter PE-Folie muss ausserdem neues Erdöl gefördert werden, um neue PE-Folie herzustellen. Der Energieverbrauch für die Erdölförderung und die Herstellung neuer Folie ist grösser als der für das Recycling der alten Folie. Dies belastet das Klima zusätzlich.

Das Recycling von alten PE-Folien ist technisch möglich und gemäss BAFU (2012) klimarelevant. Unreine oder schmutzige PE-Folien werden aussortiert und in der KVA verbrannt. Saubere Folien werden zu recyceltem PE-Granulat (R-PE) verarbeitet. Das R-PE dient als Rohmaterial für die Produktion neuer PE-Folien. Beim Recycling von PE-Folien werden im Vergleich mit der Verbrennung in der KVA rund 3'100 kg CO₂-Äq pro Tonne verbrannter PE-Folie eingespart (Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2012). Gleichzeitig wird mit dem Recycling von alter PE-Folie die Herstellung von neuer Folie teilweise substituiert und so werden rund 900 L Erdöl pro Tonne verbrannter PE-Folie weniger gefördert.

In der Landwirtschaft werden PE-Folien für die Konservierung von Grundfutter, hauptsächlich Silage, verwendet. Die PE-Folien werden als Verpackungsmaterial für Siloballen oder als Abdeckung im Flachsilo eingesetzt.

Für Siloballen werden gemäss Herstellerangaben Folien aus «Linear Low Density PE» (LLDPE) und für Flachsilo Folien aus «Low Density PE» (LDPE) verwendet. Zur Berechnung der Folienmengen wurden die auf dem Modellbetrieb verwendeten Mengen an Gras- und Maissilage zuerst auf die Lagerung in Siloballen und im Flachsilo aufgeteilt (Tabelle 20). Das Frischgewicht für Mais- und Gras-Siloballen wurde auf 1'018 kg respektive 814 kg pro Ballen und das Volumen eines Siloballens auf 1.4 m³ festgelegt (Schrade *et al.* 2005; Richter *et al.* 2009; Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) 2014; Musfeldt und Mahlkow-Nerge 2017). Basierend auf diesen Angaben wurde die Anzahl der auf dem Betrieb verwendeten Siloballen berechnet (Tabelle 20). Zur Berechnung des totalen Folienverbrauchs pro Betrieb wurde der durchschnittliche Verbrauch pro Siloballen auf 1.20 kg LLDPE geschätzt und mit der Anzahl verwendeter Siloballen multipliziert (Tabelle 20) (Keller 2000; Dudda 2017; Blaser 2018).

Die Dimensionen für das Flachsilo betragen für alle Modellbetriebe (gemäss Ökoinventar) 30 m : 7 m : 2 m (Länge : Breite : Höhe) mit einer totalen Lagerkapazität von jeweils 350 m³ Silage pro Flachsilo (Dux 2009). Basierend auf der produzierten Menge Silage wurde auf den Modellbetrieben aber nur ein Bruchteil dieser Lagerkapazität des Flachsilos ausgenutzt. Die Berechnung zum Folienverbrauch orientierte sich an dieser tatsächlich benötigten Lagerkapazität (Tabelle 20). Der Folienverbrauch wurde basierend auf dem Schema zur optimalen Siloabdeckung eines Flachsilos berechnet (Zuber 2019). Für das Flachsilo wurde eine Abdeckfolie (Stärke: 0.1625 µm), eine Unterzieh- (40 µm) und eine Wandfolie (110 µm) verwendet (Resch und Wildling 2017).

Die Umweltwirkungen des LDPE und des LLDPE Recyclings wurden mit dem Recycling von «High Density PE» (HDPE) angenähert (Kägi 2018). Für das Recycling wurde ein Verlust von 21% für das Sortieren von alten PE-Folien und 28% für Verluste während des Recyclingprozesses angerechnet (Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2012). Recyclingfolie kann neue Folie aufgrund technischer Eigenschaften nur zu einem gewissen Teil ersetzen (Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2012). Fertige Recyclingfolie besteht zu 22.5% aus neuem und zu 77.5% aus recyceltem PE, welches die Emissionen einspart, welche in der KVA durch die Verbrennung der Folien entstehen würden (Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2012). Pro Tonne recycelter Folie werden 1'370 L Erdöl eingespart (Kägi 2018).

Tabelle 20: Kennzahlen der Massnahme «Folienrecycling»

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schwein
Silage in Rundballen [t/Jahr]	8.26	19.28	14.02	13.29
Silage im Flachsilo [t/Jahr]	8.26	6.81	3.59	3.52
Anzahl verwendeter Rundballen [#]	26.9	60.6	43.7	41.5
Ausgenutzte Lagerkapazität des Flachsilos [m ³]	41.3	96.4	70.1	66.4
LLDPE-Folienverbrauch [kg/Jahr]	32.5	73.2	52.8	50.2
LDPE-Folienverbrauch [kg/Jahr]	6.2	14.5	10.5	10.0

4.9.2 Erzielte Reduktion des Treibhauspotenzials und weitere Umweltwirkungen

Mit dem Recycling von PE-Folien erzielten die Modellbetriebe eine durchschnittliche Treibhausgasreduktion von 122.3 bis 277.0 kg CO₂-Äq (Tabelle 21), abhängig von der Menge benötigter Silofolie. Der Verkehrsmilchbetrieb erreichte dabei die grösste Treibhausgasreduktion, da er die grösste Menge recycelter PE-Folie nutzte (0.02% und 0.12% des betrieblichen Treibhauspotenzials) (Tabelle 20). Die Treibhausgasreduktion pro Siloballen und pro m³ Silage im Flachsilo betrug für alle Modellbetriebe 3.8 kg CO₂-Äq/Ballen resp. 0.5 kg CO₂-Äq/m³ Silage. Bezogen auf die vom Betrieb produzierten MJ VE betragen die Einsparungen zwischen 0.1 und 1.6 g CO₂-Äq/MJ VE (Tabelle 21). Das Folienrecycling hatte auf die übrigen Umweltwirkungen nur einen sehr kleinen Einfluss (Abbildung 28). Es verringerte den Energie- und Wasserbedarf sowie die terrestrische und aquatische Ökotoxizität leicht und erhöhte die Eutrophierung und Humantoxizität leicht (Abbildung 28).

Tabelle 21: Treibhausgasreduktion der Massnahme «Folienrecycling».

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schwein
Eingesparte Treibhausgase, Gesamtbetrieb [kg CO ₂ -Äq.]	-122.3	-277.0	-200.2	-190.1
Eingesparte Treibhausgase pro erzeugte Megajoule verdaulicher Energie [g CO ₂ -Äq./MJ VE]	-0.1	-0.5	-1.6	-0.4

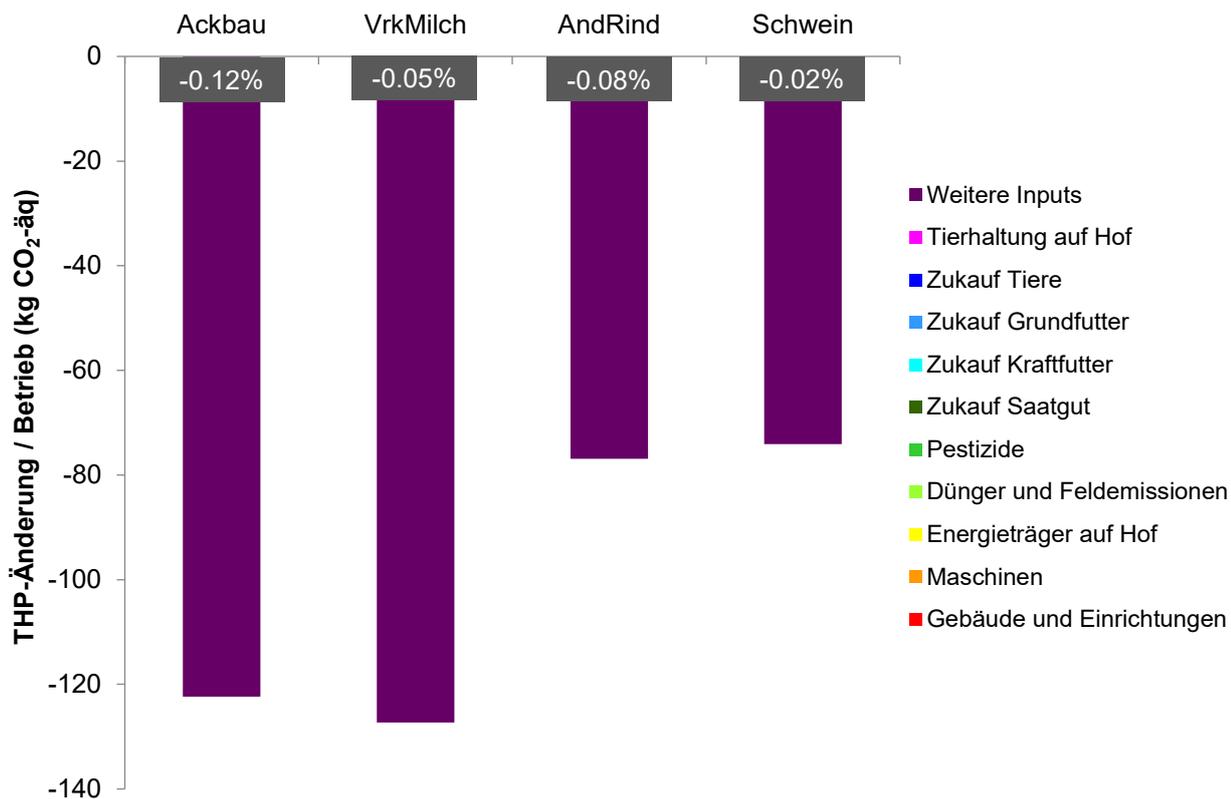


Abbildung 26: Änderung des Treibhauspotenzials der Modellbetriebe bei Umsetzung der Massnahme «Recycling von Silofolien».

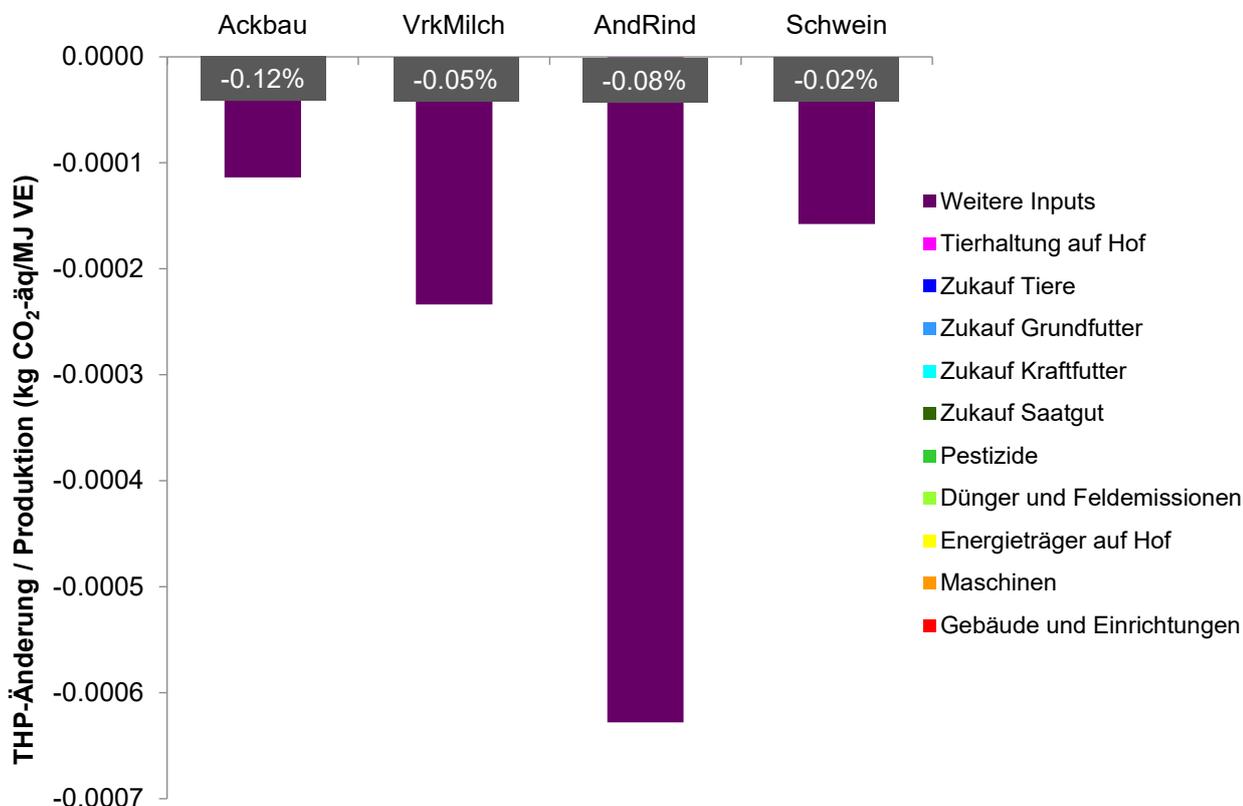


Abbildung 27: Änderung des Treibhauspotenzials pro MJ VE der Modellbetriebe bei Umsetzung der Massnahme «Recycling von Silofolien».

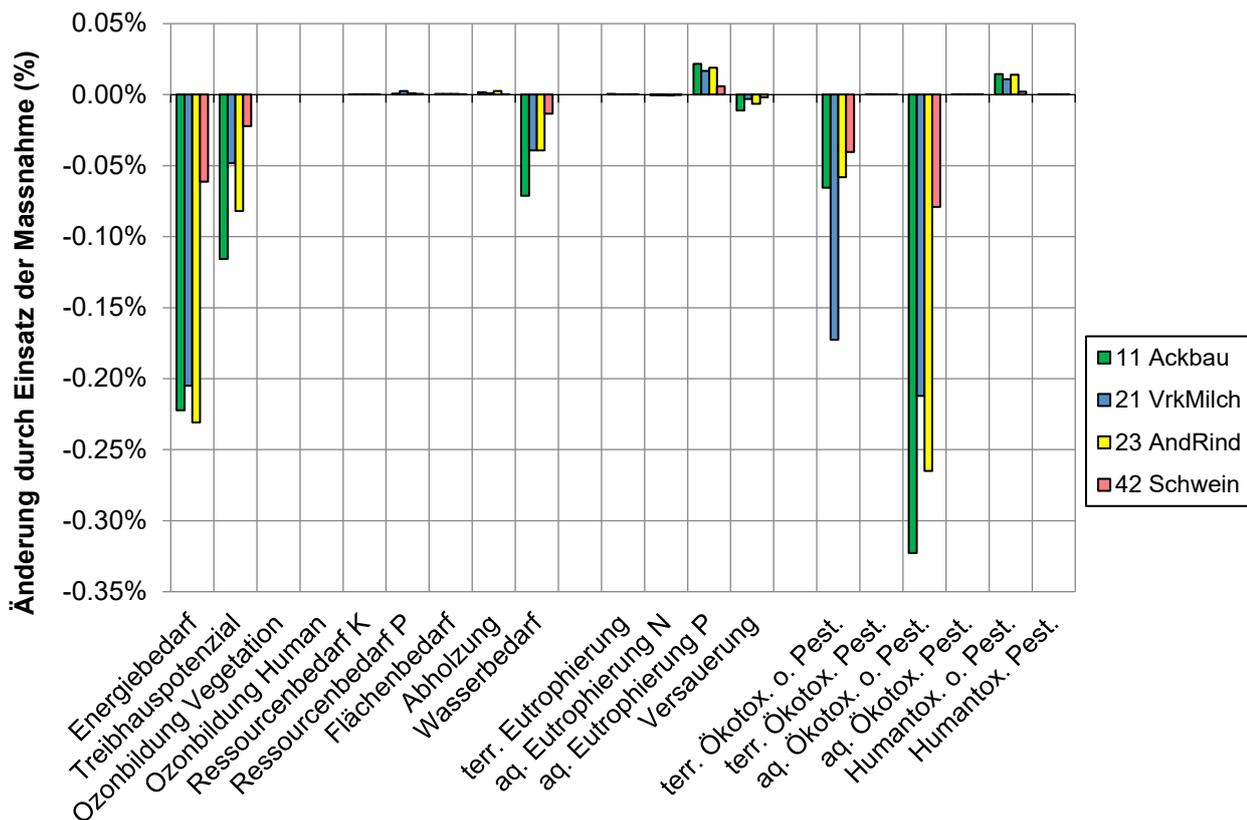


Abbildung 28: Einfluss der Massnahme «Folienrecycling» auf weitere Umweltwirkungen. Abweichung der Ergebnisse mit umgesetzter Massnahme von den Ergebnissen der Betriebe ohne umgesetzte Massnahme.

4.9.3 Diskussion

Die in dieser Massnahme berechnete Treibhausgasreduktion pro Kilogramm recycelter PE-Folie beträgt im Durchschnitt 3.6 kg CO₂-Äq und ist etwas höher als die Treibhausgasreduktion im BAFU-Bericht von 3.1 kg CO₂-Äq. (Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2012). Gründe für diesen Unterschied liegen unter anderem in der Datengrundlage. Im BAFU-Bericht wurden eigene für die Berechnung erstellte, spezifische Ökoinventare verwendet. In dieser Berechnung wurde mit Ökoinventaren aus der ecoinvent-Datenbank gerechnet. Die Autoren des BAFU-Berichts rechneten ausserdem mit unterschiedlichen Szenarien und bildeten am Ende daraus den Mittelwert. Für die Berechnung dieser Massnahme wurde von Beginn an mit Mittelwerten gerechnet. Grössenordnungsmässig ist der Unterschied der Ergebnisse allerdings nicht als bedeutend einzustufen. Das Recycling von alten Silofolien ist nebst der berechneten Treibhausgasreduktion auch hinsichtlich einer reduzierten Abhängigkeit von fossilen, nicht erneuerbaren Ressourcen von grossem Interesse.

Eine entscheidende Variable zur Bestimmung der Höhe der Treibhausgaseinsparung ist der Folienverbrauch im Flachsilo und bei den Rundballen. Für Rundballen wurde gemäss Literaturangaben mit einem durchschnittlichen Folienverbrauch von 1.20 kg pro Rundballen gerechnet. Gemäss U. Wyss (Agroscope, persönliche Mitteilung Juni 2020) liegt der Folienverbrauch gemäss Herstellerangaben bei rund 1 kg Folie pro Rundballen. Bei einem geringeren Materialeinsatz würde sich auch die Einsparung von Treibhausgasen durch Folienrecycling auf den Betrieben verringern.

Der Verbrauch an PE-Folie im Flachsilo ist aufgrund der unterschiedlichen Möglichkeiten der Siloabdeckung sowie der Grösse und den Dimensionen des Flachsilos etwas schwieriger zu bestimmen. Der Folienverbrauch basiert auf den Dimensionen des Flachsilos aus den Modellbetrieben sowie auf einer optimalen Abdeckung des Flachsilos. Je nach Grösse und Dimensionen des Flachsilos in der Praxis kann der Folienverbrauch etwas variieren. Es finden sich keine vergleichbaren Werte aus der Literatur, um den hier verwendeten Wert zum Folienverbrauch im Flachsilo zu validieren.

5 Einordnung der Massnahmen

Die in den Massnahmen getroffenen Annahmen wurden durch die Literaturrecherche und Expertenmeinungen abgestützt. Bei einer aktuelleren Datenlage in Zukunft müssten verschiedene Annahmen angepasst werden, sodass sich die ermittelten Reduktionspotenziale (Kapitel 4) einzelner Massnahmen zu einem späteren Zeitpunkt erhöhen oder verringern können. Genauso ist ein Einfluss auf die Ergebnisse zu erwarten, falls die für die Berechnungen verwendete Ökoinventar-Datenbank ecoinvent aktualisiert wird.

Die Resultate zeigen, dass neben der ermittelten Treibhausgaseinsparung für einige der Massnahmen eine Reihe ungünstiger Wirkungen auf andere Umweltbereiche zu erwarten sind (Trade-Offs).

Eine Bewertung respektive eine Empfehlung zur Verwendung der Massnahmen sollte basierend auf den Unsicherheiten bezüglich der getroffenen Annahmen und den erwarteten Trade-Offs erfolgen. Die Massnahmen werden darum wie folgt eingeordnet: In einem ersten Schritt wird die Unsicherheit der Höhe der ermittelten Treibhausgasreduktion bestimmt. In einem zweiten Schritt wird die Anzahl der Trade-Offs jeder Massnahme bestimmt, und in einem dritten Schritt werden die Massnahmen basierend auf diesen identifizierten Unsicherheiten und der Anzahl Trade-Offs qualitativ bewertet.

Der erste Schritt stellt auf Stufe des Treibhauspotenzials die von den Massnahmen verursachten Treibhausgasemissionen den mit den Massnahmen eingesparten Treibhausgasemissionen gegenüber (Tabelle 22). Basierend auf diesen Daten wird für jede Massnahme ein Verhältnis zwischen eingesparten und zusätzlich emittierten Treibhausgasen berechnet. Je grösser das Verhältnis ist, desto sicherer ist es, dass eine Treibhausgas-Reduktion erzielt wird. Oder anders gesagt: Die Unsicherheit des Reduktionspotenzials ist bei einem niedrigen Verhältnis höher, da sich eine Änderung der (z.B. durch den Anbau und Transport von Leinsamen) verursachten oder der (z.B. durch die Methanreduktion bei Verfütterung der Leinsamen) eingesparten Treibhausgasemissionen total gesehen stärker auf das Reduktionspotenzial auswirkt als bei einem grossen Verhältnis. Änderungen der Datengrundlage hätten dort einen grösseren Einfluss und könnten das Verhältnis von eingesparten zu zusätzlich emittierten Treibhausgasen schneller kippen.

Die Verhältnisse der technischen Massnahmen liegen mit Werten zwischen 82:1 und 197:1 hoch (Tabelle 22). Das heisst, die ermittelten Treibhausgas-Reduktionspotenziale können als relativ robust eingeschätzt werden. Für die Massnahmen «Ausbringung von Pflanzenkohle auf das Feld», «Gründüngung» und «Leinsamen als Futterzusatz» finden sich dagegen relativ kleine Verhältnisse zwischen eingesparten und zusätzlich emittierten Treibhausgasemissionen. Bei diesen Massnahmen wäre eine Änderung der ermittelten Reduktionspotenziale bei einer aktualisierten Datenlage wahrscheinlich (in negative wie positive Richtungen), und es existieren somit höhere Unsicherheiten. Das Verhältnis der Massnahme «Agroforstsystem Wertholz» liegt mit 11:1 zwischen den Verhältnissen der anderen Massnahmen.

Im zweiten Schritt wurde die Anzahl der Trade-Offs aller betrachteten Umweltwirkungen der einzelnen Massnahmen ermittelt. Als Trade-Off gilt hier, wenn sich eine Umweltwirkung auf einem Modellbetrieb, welcher die Massnahme umsetzt, im Vergleich zum Modellbetrieb, welcher die Massnahme nicht umsetzt, erhöht. Je höher die Anzahl ermittelter Trade-Offs, desto häufiger sind ungünstige Effekte auf andere Umweltbereiche zu erwarten. Um auch hier eine gewisse Unsicherheit der Ergebnisse zu berücksichtigen, wurden Trade-Offs von unter 1% vernachlässigt. Tabelle 22 gibt den gerundeten Mittelwert aus der ermittelten Anzahl Trade-Offs der vier Modellbetriebe wieder.

Die Resultate aus der Analyse der Trade-Offs (Tabelle 22) stützen die Erkenntnisse aus dem ersten Schritt. Die technischen Massnahmen erzielten wenige bis keine Trade-Offs. Folglich sind keine weiteren ungünstigen Wirkungen auf die Umwelt zu erwarten. Die Massnahmen «Ausbringung von Pflanzenkohle auf das Feld», «Gründüngung» und «Leinsamen als Futterzusatz» sind aus Klimasicht zwar sinnvoll, da mit den Massnahmen Treibhausgasemissionen reduziert werden. Gleichzeitig fanden sich bei diesen Massnahmen aber eine grössere Anzahl von Trade-Offs. Eine Treibhausgasreduktion durch die Umsetzung dieser Massnahmen erfolgt also auf Kosten anderer Umweltwirkungen. Aus Umweltsicht sind diese Massnahmen kritisch.

In Tabelle 22 werden die Massnahmen basierend auf den Erkenntnissen aus der Analyse der Unsicherheiten und der Trade-Offs mit einem Ampelsystem qualitativ bewertet. Bei grün markierten Massnahmen werden die Unsicherheiten bei der Treibhausgaseinsparung und die ungünstigen Effekte auf andere Umweltwirkungen als klein eingeschätzt. Diese Massnahmen können für eine Umsetzung aus Klima- und Umweltsicht empfohlen werden. Für die orange und rot markierten Massnahmen existieren gewisse Unsicherheiten und Trade-Offs.

Aufgrund der hohen Anzahl an Trade-Offs kann die Massnahme «Leinsamen als Futterzusatz» aus Umweltsicht nicht empfohlen werden. Dasselbe gilt in geringerem Umfang auch für die Massnahme «Gründüngung». Die Massnahmen «Ausbringung Pflanzenkohle» und «Agroforstsystem» können bedingt empfohlen werden, da unter geänderten Annahmen die Einsparung womöglich nicht mehr erreicht wird.

Tabelle 22: Gegenüberstellung der zusätzlichen verursachten und eingesparten Emissionen sowie der erwarteten Trade-Offs bei einer Umsetzung der Massnahmen (Mittelwerte der vier Modellbetriebe). n.v. = nicht verfügbar.

Massnahme	Mit der Massnahme verursachte Emissionen [kg CO ₂ -Äq.]	Mit der Massnahme eingesparte Emissionen [kg CO ₂ -Äq.]	Verhältnis: (Einsparung/ Emissionen)	Anzahl erwarteter Trade-Offs
Recycling von Silofolien	0	-197	197:0	0
Frequenzumformer Melkanlage	1.39	-197	143:1	0
Wärmerückgewinnung Milchkühlung	4.95	-540	109:1	0
Häufiger Ersatz Mähklingen	1.38	-114	82:1	0
Heizen mit Holzpellets	32.50	-4'486	138:1	1
Agroforstsystem Wertholz	1'226	-11'879	11:1	n.v.
Ausbringung Pflanzenkohle	1'588	-2'822	1.8:1	1
Gründüngung	1'968	-2'871	1.5:1	3
Leinsamen als Futterzusatz	1'893	-2'745	1.5:1	7

6 Schlussfolgerungen

Alle hier betrachteten Massnahmen wirken sich günstig auf das Klima aus. Je nach Massnahme variiert die Höhe der Treibhausgaseinsparung allerdings und reicht von wenigen Kilogramm eingesparten CO₂-Äq. pro Betrieb (z.B. Massnahme Ersatz von Rotormähklingen) bis hin zu mehreren Tonnen CO₂-Äq. (z.B. Massnahme Agroforstsystem). Massnahmen, welche eine grössere Menge Treibhausgase einsparen, tendieren oftmals (aber nicht ausschliesslich) zu einem höheren Arbeitsaufwand und/oder höheren (finanziellen) Investitionen. Das Anlegen eines neuen Agroforstsystems zum Beispiel benötigt unter anderem finanzielle Investitionen (Kauf von Bäumen) sowie zusätzlichen Arbeitsaufwand (Pflege der Bäume). Auch die Massnahme Ausbringung von Pflanzenkohle auf das Feld, welche relativ zu den anderen Massnahmen gesehen eine höhere Treibhausgasreduktion erreicht, verursacht zusätzliche finanzielle Investitionen (Zukauf von Pflanzenkohle).

Auf der anderen Seite verursachen Massnahmen wie der Ersatz von Mähklingen oder die Verfütterung von Leinsamen, die verhältnismässig weniger Treibhausgase reduzieren, in deren Umsetzung oftmals aber weniger Aufwand. Daher sollten solche Massnahmen mit kleinerem Reduktionspotenzial nicht vernachlässigt werden. Denn auch verhältnismässig kleinere Massnahmen können bei Umsetzung auf einer Mehrheit von Landwirtschaftsbetrieben gesamtheitlich gesehen bedeutende Treibhausgasreduktionen erzielen.

Auch wenn sich alle betrachteten Massnahmen günstig auf das Klima auswirken, können aufgrund der Unsicherheiten und Trade-Offs nicht alle Massnahmen uneingeschränkt empfohlen werden. Die technischen Massnahmen zeigten robuste, aber weniger hohe Treibhausgaseinsparungen und kaum Trade-Offs bei weiteren Umweltwirkungen. Einzelne Massnahmen, allen voran Leinsamen als Futterzusatz, zeigten hingegen verschiedene, teils deutliche Trade-Offs bei anderen Umweltwirkungen, bei gleichzeitig weniger robusten Treibhausgaseinsparungen. Die Massnahmen «Leinsamen als Futterzusatz» und «Gründüngung» sind daher unter einer ganzheitlichen Umweltbetrachtung nicht zu empfehlen.

Die zusätzlich berechneten Massnahmen ergänzen die momentan verfügbaren Massnahmen aus Alig *et al.* (2015) und bilden eine weitere Basis zur Reduktion der Treibhausgase auf landwirtschaftlichen Betrieben. Dank den im IP-SUISSE-Tool⁷ mitgelieferten technisch-agronomischen Erläuterungen können die Betriebsleitenden ihre Möglichkeiten für einen Beitrag zum Klimaschutz individuell beurteilen und die für sie geeigneten Massnahmen aus dem Katalog auswählen.

⁷ IP-SUISSE Webportal, <https://ips3.ipsuisse.ch>

7 Danksagung

Jens Leifeld danken wir für die Berechnung des Kohlenstoffvorrats im Waldboden (Massnahme «Ausbringung von Pflanzenkohle auf das Feld»).

8 Abkürzungen

Allgemeine Abkürzungen:

AckBau:	Ackerbaubetrieb (Betriebsnummer 11.11)
AFS:	Agroforstsystem
AndRind:	Anderes Rindvieh Betrieb (Betriebsnummer 23.11)
BAFU:	Bundesamt für Umwelt
BLW:	Bundesamt für Landwirtschaft
CH:	Schweiz
CH ₄ :	Methan
CO ₂ :	Kohlenstoffdioxid
GWP:	Global warming potential
HDPE:	Polyethylen hoher Dichte (engl. «high density polyethylen»)
IPCC:	Intergovernmental Panel for Climate Change
IPS:	IP-SUISSE
K:	Kalium (chem. Bezeichnung)
KVA:	Kehrrichtverbrennungsanlage
LDPE:	Polyethylen niedriger Dichte (engl. «low density polyethylen»)
LLDPE:	Lineares Polyethylen niedriger Dichte (engl. «linear low density polyethylen»)
MRT:	mittlere Verweildauer (engl. «mean residence time»)
N:	Stickstoff (chem. Bezeichnung)
N ₂ O:	Lachgas
Nfix:	Stickstofffixierungsleistung
ÖLN:	Ökologischer Leistungsnachweis
P:	Phosphor (chem. Bezeichnung)
PE:	Polyethylen
RP:	Rohprotein
R-PE:	rezykliertes Polyethylen
SALCA:	Swiss Agricultural Life Cycle Assessment
Schwein:	Schweinebetrieb (Betriebsnummer 42.11)
THP:	Treibhauspotenzial
TS:	Trockensubstanz
VE:	verdauliche Energie
VrkMilch:	Verkehrsmilchbetrieb (Betriebsnummer 21.11)

Einheiten:

#:	Anzahl
°C:	Grad Celsius
µm:	Mikrometer
1.4-DB-Äq.:	Einheit für Umweltwirkungen der Kategorien «Toxizität»
a:	Jahr
CHF:	Schweizer Franken
CO ₂ -Äq.:	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente
dt:	Dezitonne
g:	Gramm
GVE:	Grundvieheinheit
h:	Stunde (Einheit bez. Abkürzung)
ha:	Hektar
kg:	Kilogramm
kW:	Kilowatt
kWh:	Kilowattstunde
L:	Liter
LN:	landwirtschaftliche Nutzfläche
m:	Meter
m ² :	Quadratmeter
m ³ :	Kubikmeter
min:	Minuten
MJ:	Megajoule
MJ-Äq.:	Megajoule-Äquivalente
ppm:	Millionstel (engl. «parts per million»)
t:	Tonne

9 Verzeichnisse

9.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Änderung des Treibhauspotenzials der Modellbetriebe bei Umsetzung der Massnahme «Frequenzumformer Melkanlage».	16
Abbildung 2: Änderung des Treibhauspotenzials pro MJ VE der Modellbetriebe bei Umsetzung der Massnahme «Frequenzumformer Melkanlage».	16
Abbildung 3: Einfluss der Massnahme «Frequenzumformer Melkanlage» auf weitere Umweltwirkungen. Abweichung der Ergebnisse mit umgesetzter Massnahme von den Ergebnissen der Betriebe ohne umgesetzte Massnahme.	17
Abbildung 4: Änderung des Treibhauspotenzials (THP) der Modellbetriebe bei Umsetzung der Massnahme «Regelmässiger Ersatz von Mähklingen».	19
Abbildung 5: Änderung des Treibhauspotenzials pro MJ verdaulicher Energie (VE) der Modellbetriebe bei Umsetzung der Massnahme «Regelmässiger Ersatz von Mähklingen».	20
Abbildung 6: Einfluss der Massnahme «Regelmässiger Ersatz von Mähklingen» auf weitere Umweltwirkungen. Abweichung der Ergebnisse mit umgesetzter Massnahme von den Ergebnissen der Betriebe ohne umgesetzte Massnahme.	20
Abbildung 7: Änderung des Treibhauspotenzials der Modellbetriebe bei Umsetzung der Massnahme «Heizen mit Holzpellets».	23
Abbildung 8: Änderung des Treibhauspotenzials pro MJ VE der Modellbetriebe bei Umsetzung der Massnahme «Heizen mit Holzpellets».	24
Abbildung 9: Einfluss der Massnahme «Heizen mit Holzpellets» auf weitere Umweltwirkungen. Abweichung der Ergebnisse mit umgesetzter Massnahme von den Ergebnissen der Betriebe ohne umgesetzte Massnahme.	24
Abbildung 10: Änderung des Treibhauspotenzials der Modellbetriebe bei Umsetzung der Massnahme «Wärmerückgewinnung Milchkühlung».	27
Abbildung 11: Änderung des Treibhauspotenzials pro MJ VE der Modellbetriebe bei Umsetzung der Massnahme «Wärmerückgewinnung Milchkühlung».	28
Abbildung 12: Einfluss der Massnahme «Wärmerückgewinnung Milchkühlung» auf weitere Umweltwirkungen. Abweichung der Ergebnisse mit umgesetzter Massnahme von den Ergebnissen der Betriebe ohne umgesetzte Massnahme.	28
Abbildung 13: Änderung des Treibhauspotenzials der Modellbetriebe bei Umsetzung der Massnahme «Leinsamen als Futterzusatz» (Variante Beauchemin).	32
Abbildung 14: Änderung des Treibhauspotenzials pro MJ VE der Modellbetriebe bei Umsetzung der Massnahme «Leinsamen als Futterzusatz» (Variante Beauchemin).	32
Abbildung 15: Einfluss der Massnahme «Leinsamen als Futterzusatz» (Variante Beauchemin) auf weitere Umweltwirkungen. Abweichung der Ergebnisse mit umgesetzter Massnahme von den Ergebnissen der Betriebe ohne umgesetzte Massnahme.	33
Abbildung 16: Änderung des Treibhauspotenzials der Modellbetriebe bei Umsetzung der Massnahme «Gründüngung».	36
Abbildung 17: Änderung des Treibhauspotenzials pro MJ VE der Modellbetriebe bei Umsetzung der Massnahme «Gründüngung».	36
Abbildung 18: Einfluss der Massnahme «Gründüngung» auf weitere Umweltwirkungen. Abweichung der Ergebnisse mit umgesetzter Massnahme von den Ergebnissen der Betriebe ohne umgesetzte Massnahme.	37

Abbildung 19: Änderung des Treibhauspotenzials der Modellbetriebe bei Umsetzung der Massnahme «Ausbringung von Pflanzenkohle auf das Feld».	40
Abbildung 20: Änderung des Treibhauspotenzials pro MJ VE der Modellbetriebe bei Umsetzung der Massnahme «Ausbringung von Pflanzenkohle auf das Feld».	40
Abbildung 21: Einfluss der Massnahme «Ausbringung von Pflanzenkohle auf das Feld» auf weitere Umweltwirkungen. Abweichung der Ergebnisse mit umgesetzter Massnahme von den Ergebnissen der Betriebe ohne umgesetzte Massnahme.	41
Abbildung 22: Änderung des Treibhauspotenzials der Modellbetriebe bei Umsetzung der Massnahme «Agroforstsystem (Variante Wertholz)».	46
Abbildung 23: Änderung des Treibhauspotenzials der Modellbetriebe bei Umsetzung der Massnahme «Agroforstsystem (Variante Obst)».	46
Abbildung 24: Änderung des Treibhauspotenzials pro MJ VE der Modellbetriebe bei Umsetzung der Massnahme «Agroforstsystem (Variante Wertholz)».	47
Abbildung 25: Änderung des Treibhauspotenzials pro MJ VE der Modellbetriebe bei Umsetzung der Massnahme «Agroforstsystem (Variante Obst)».	47
Abbildung 26: Änderung des Treibhauspotenzials der Modellbetriebe bei Umsetzung der Massnahme «Recycling von Silofolien».	51
Abbildung 27: Änderung des Treibhauspotenzials pro MJ VE der Modellbetriebe bei Umsetzung der Massnahme «Recycling von Silofolien».	51
Abbildung 28: Einfluss der Massnahme «Folienrecycling» auf weitere Umweltwirkungen. Abweichung der Ergebnisse mit umgesetzter Massnahme von den Ergebnissen der Betriebe ohne umgesetzte Massnahme.	52

9.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Liste möglicher Klimaschutzmassnahmen und Priorisierung für die weitere Analyse.	8
Tabelle 2: Kennzahlen zu den vier verwendeten Modellbetrieben	11
Tabelle 3: Betrachtete Wirkungskategorien	12
Tabelle 4: Kennzahlen der Massnahme «Frequenzumformer Melkanlage»	15
Tabelle 5: Treibhausgasreduktion der Massnahme «Frequenzumformer Melkanlage»	15
Tabelle 6: Für die Modellbetriebe berechnete Amortisationsdauer eines Frequenzumformers	17
Tabelle 7: Kennzahlen der Massnahme «Regelmässiger Ersatz von Mähklingen»	18
Tabelle 8: Treibhausgasreduktion der Massnahme «Regelmässiger Ersatz von Mähklingen»	19
Tabelle 9: Finanzielle Auswirkungen eines Klingenwechsels alle 72 ha gemähter Wiesenfläche (negative Werte stellen Einsparungen dar).	21
Tabelle 10: Wichtigste Kennzahlen der Massnahme «Heizen mit Holzpellets»	22
Tabelle 11: Treibhausgasreduktion der Massnahme «Heizen mit Holzpellets»	23
Tabelle 12: Kennzahlen der Massnahme «Wärmerückgewinnung Milchkühlung»	26
Tabelle 13: Treibhausgasreduktion der Massnahme «Wärmerückgewinnung Milchkühlung»	27
Tabelle 14: Treibhausgasreduktion der Leinsamenfütterung	31
Tabelle 15: Kennzahlen der Massnahme «Gründüngung»	34
Tabelle 16: Treibhausgasreduktion der Massnahme «Gründüngung»	35
Tabelle 17: Treibhausgasreduktion der Massnahme «Ausbringung Pflanzkohle auf das Feld»	39
Tabelle 18: Kennzahlen zur Massnahme „Agroforstsystem“ in der Variante Wertholz	44
Tabelle 19: Treibhausgasreduktion der Massnahme «Agroforstsystem»	45
Tabelle 20: Kennzahlen der Massnahme «Folienrecycling»	50
Tabelle 21: Treibhausgasreduktion der Massnahme «Folienrecycling».	50
Tabelle 22: Gegenüberstellung der zusätzlichen verursachten und eingesparten Emissionen sowie der erwarteten Trade-Offs bei einer Umsetzung der Massnahmen (Mittelwerte der vier Modellbetriebe). n.v. = nicht verfügbar.	54

9.3 Literaturverzeichnis

- AgroCleanTech 2018: Drehzahlgesteuerte Melkmaschinen (Frequenzumformer).
- Agroscope, 2016. Swiss Feed Database, access: www.feedbase.ch. [Juli 2020].
- Alig M., Prechsl U., Schwitler K., Waldvogel T., Wolff V., Wunderlich A., Zorn A. & Gaillard G., 2015. Ökologische und ökonomische Bewertung von Klimaschutzmassnahmen zur Umsetzung auf landwirtschaftlichen Betrieben in der Schweiz. **25**, Agroscope, Zürich, 1-160.
- Ammann H., Brecht I. & Albisser Vögeli G., 2009. Holzheizungen im Vergleich. *Agrarforschung Schweiz* **16** (3), 64-69.
- Baumgartner D. U. & Nyfeler-Brunner A. 2019: 1. Zwischenbericht im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung (interner Bericht). Ressourcenprojekt „Punktesystem Klimaschutz auf IP-SUISSE-Labelbetrieben – Massnahmen zur Senkung der Treibhausgasemissionen von Landwirtschaftsbetrieben“. Agroscope Reckenholz, Affoltern, 63.
- Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), 2011. Zwischenfruchtbau - Integrierter Pflanzenbau. 1-6.
- Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), 2014. Gruber Tabelle - Zur Fütterung in der Rindermast. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Freising-Weihenstephan, 1-92.
- Beauchemin K., A., Kreuzer M., O'Mara F. & McAllister T., 2008. Nutritional management for enteric methane abatement: a review. *Austr. J. Exp. Agr.* **48**, 21-27.
- Bergman R. D., Gu H., Page-Dumroese D. S. & Anderson N. M., 2016. Life Cycle Analysis of Biochar. In: Biochar: A Regional Supply Chain Approach in View of Climate Change Mitigation. 3, Cambridge University Press, Cambridge, Viktor J. Bruckman, Esin Apaydin Varol, Başak B. Uzun, Jay Liu, 46-69.
- Blaser S., 2018. Baling processing, CH, Allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.
- Bundesamt für Energie, 2013. E-Scooter – Sozial- und naturwissenschaftliche Beiträge zur Förderung leichter Elektrofahrzeuge. Bundesamt für Energie (BFE), 1-93.
- Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2012. Ökologischer Nutzen des PE-Folien-Recyclings Schweiz (Landwirtschaft, Industrie und Gewerbe). Bundesamt für Umwelt (BAFU), 1-102.
- Cayuela M. L., van Zwielen L., Singh B. P., Jeffery S., Roig A. & Sánchez-Monedero M. A., 2014. Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **191**, 5-16.
- Chilliard Y., Glasser F., Ferlay A., Bernard L., Rouel J. & Doreau M., 2007. Diet, rumen biohydrogenation, cow and goat milk fat nutritional quality: A review. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.* **109**, 828-855.
- Coleman K. & Jenkinson D. S., 1996. RothC-26.3 - A Model for the turnover of carbon in soil. In: Evaluation of Soil Organic Matter Models (Eds. Powlson D. S. Smith P. & Smith J. U.), 1996//, Berlin, Heidelberg Springer Berlin Heidelberg, 237-246.
- DeLaval 2016: Optimale Leistung für alle DeLaval Vakuumpumpen BVP, DVP, DVP-NFO und LVP. DeLaval [Hrsg.]. 1-6.
- Dudda E., 2017. Siloballenfolie: vom Abfall zum Rohstoff. *Der Bündner Bauer*, 12-14.
- Dux D., 2009. Horizontal silo, concrete, at farm, CH, Allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.
- Energiewerke Zürich (EWZ), 2020. Stromtarif 2019 - Stadt Zürich. Zugang: https://www.ewz.ch/content/dam/ewz/Geschaeftskunden/Strom/Produkte_Grundversorgung/ewz_Stromtarif_ZH_Geschaeftskunden_2019.pdf
- Engelke S., W., Daş G., Derno M., Tuchscherer A., Wimmers K., Rychlik M., Kienberger H., Berg W., Kuhla B. & Metges C., C., 2019. Methane prediction based on individual or groups of milk fatty acids for dairy cows fed rations with or without linseed. *Journal of dairy science* **102(2)**, 1788-1802.

- Eugène M., Martin C., Mialon M. M., Krauss D., Renand G. & Doreau M., 2011. Dietary linseed and starch supplementation decreases methane production of fattening bulls. *Anim. Feed Sci. Technol.*
- Felber R., Leifeld J., Horak J. & Nefte A. 2014: Nitrous oxide emission reduction with greenwaste biochar: comparison of laboratory and field experiments. *European Journal of Soil Science*. 128-138.
- Fischer B. M. C., Manzoni S., Morillas L., Garcia M., Johnson M. S. & Lyon S. W., 2019. Improving agricultural water use efficiency with biochar – A synthesis of biochar effects on water storage and fluxes across scales. *Science of The Total Environment* **657**, 853-862.
- FZ Agritechnik, 2020. Kreiselmäherklingen rechts VGTF70 zu PZ-Vicon Trommelmäher. Zugang: <https://fz-agritechnik.de/de/ernte-gruenland/trommelmaehwerk/vicon-pz/klingen/kreiselmaeherklingen-rechts-vgtf70-pz-vicon-trommelmaeher>
- Gaillard G. & Nemecek T., 2009. Swiss Agricultural Life Cycle Assessment (SALCA): An integrated environmental assessment concept for agriculture. In: Int. Conf. "Integrated Assessment of Agriculture and Sustainable Development, Setting the Agenda for Science and Policy", Egmond aan Zee, The Netherlands AgSAP Office, Wageningen University, 134-135.
- Gisler S., 2016. AgroCleanTech Energie- und Klimaschutzagentur der Landwirtschaft. *Weiterbildungskurs für Baufachleute*.
- Götz M., 2020. Walnussbaum-Boom in der Schweiz. Die Grüne, Zugang: <https://www.diegruene.ch/artikel/walnussbaum-boom-in-der-schweiz> [Juni 2020].
- Grainger C. & Beauchemin K., A, 2011. Can enteric methane emissions from ruminants be lowered without lowering their production? *Anim. Feed Sci. Technol.* **166-167**, 308-320.
- Hansen H. H., Storm I. M. L. D. & Sell A. M., 2012. Effect of biochar on in vitro rumen methane production. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section A — Animal Science* **62** (4), 305-309.
- Häseli A., Weibel F., Brunner H. & Müller W., 2000. Biologischer Obstbau auf Hochstämmen. Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL), Frick, 20.
- He Y., Zhou X., Jiang L., Li M., Du Z., Zhou G., Shao J., Wang X., Xu Z., Hosseini Bai S., Wallace H. & Xu C., 2017. Effects of biochar application on soil greenhouse gas fluxes: a meta-analysis. *GCB Bioenergy* **9** (4), 743-755.
- Henzen C., Angele H.-C., Maerki A., Meyer A., Meyer R., Steiner R. & Hersener J.-L., 2012. Ressourcen- und Klimaeffizienz in der Landwirtschaft: Potenzialanalyse. AgroCleanTech, Brugg, 1-118.
- Hersener J.-L., Baumgartner D., Dux D., Aeschbacher U., Alig M., Blaser S., Gaillard G., Glodé M., Jan P., Jenni M., Mieleitner J., Müller G., Nemecek T., Rötheli E. & Schmid D., 2011. Zentrale Auswertung von Ökobilanzen landwirtschaftlicher Betriebe (ZA-ÖB). Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Zürich/Ettenhausen.
- Honisch M., 2009. Reduktion von Ammoniakemissionen in der Landwirtschaft. IBK Arbeitsgruppe Landwirtschaft und Umweltschutz.
- Hubal M., 2012. Untersuchungen zum Einsatz von Frequenzumrichtern bei Vakuumpumpen in der Milchgewinnung. Landwirtschaftskammer Niedersachsen, 1-5.
- Jäger M., 2017. Agroforstsysteme – Hochstamm-, Wildobst- und Laubbäume mit Kulturpflanzen kombinieren. AGRIDEA, Broschüre.
- Jäger M., 2018. Agroforst Netzwerk Schweiz 2014 - 2018, Schlussbericht.
- Kaesler A., Sereke F., Dux D. & Herzog F., 2010. Moderne Agroforstwirtschaft in der Schweiz - Innovative Baumgärten: Produktivität und Wirtschaftlichkeit. *ART-Bericht* **725**, Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Ettenhausen, 12.
- Kaesler A., Sereke F., Dux D. & Herzog F., 2011. Agroforstwirtschaft in der Schweiz. *Agrarforschung Schweiz* **2** (3), 128-133.

- Kägi T., 2018. Polyethylene, high density, granulate, recycled, CH, Allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.
- Karimi A., Moezzi A., Chorom M. & Enayatizamir N., 2020. Application of Biochar Changed the Status of Nutrients and Biological Activity in a Calcareous Soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* **20** (2), 450-459.
- Kay S., Jäger M. & Herzog F., 2019. Ressourcenschutz durch Agroforstsysteme – standortangepasste Lösungen. *Agrarforschung Schweiz* **10**, 308-315.
- Keller A. 2000: Biologisch abbaubare Silagestretchfolien prinzipiell möglich. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT) [Hrsg.]: Agrarforschung. 164-170.
- Kim D. G., Kirschbaum M. U. & Beedy T. L., 2016. Carbon sequestration and net emissions of CH₄ and N₂O under agroforestry: Synthesizing available data and suggestions for future studies. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **226**, 65-78.
- Kirchgessner M., 1995. Nutritional factors for the quantification of methane production. *Ruminant Physiology: Digestion, Metabolism, Growth and Reproduction*.
- Koch P. & Salou T., 2014. AGRIBALYSE: Rapport méthodologique - Version 1.1. ADEME, 386.
- Kupper T., 2017. Beurteilung der Ansäuerung von Gülle als Massnahme zur Reduktion von Ammoniakemissionen in der Schweiz - Aktueller Stand.
- Latsch A., Sax M., Anken T. & Hatt M., 2016. Effizienz der Wärmerückgewinnung aus der Milchkühlung zur Brauchwassererwärmung. *Projektabschlussbericht*.
- Leng L., Xu X., Wei L., Fan L., Huang H., Li J., Lu Q., Li J. & Zhou W. 2019: Biochar stability assessment by incubation and modelling: Methods, drawbacks and recommendations. *Science of The Total Environment*. 11-23.
- Leng R. A., Inthapanyam S. & Preston T. R., 2012a. Biochar lowers net methane production from rumen fluid in vitro. *Livestock Research for Rural Development* **24** (103).
- Leng R. A., Preston T. R. & Inthapanya S., 2012b. Biochar reduces enteric methane and improves growth and feed conversion in local "Yellow" cattle fed cassava root chips and fresh cassava foliage. *Livestock Research for Rural Development* **24** (199).
- Liu Z., Dugan B., Masiello C. A. & Gonnermann H. M., 2017. Biochar particle size, shape, and porosity act together to influence soil water properties. *PLOS ONE* **12** (6), e0179079.
- Maitra S., Zaman A., Kumar Mandal T. & Bharati Palai J., 2018. Green manures in agriculture: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry* **7** (5), 1319-1327.
- Martin C., Rouel J., Jouany J., P., Doreau M. & Chilliard Y., 2008. Methane output from dairy cows in response to dietary supplementation of crude linseed, extruded linseed or linseed oil. *J. Anim. Sci.* **86**, 2642-2650.
- Martin C., Pomies D., Ferlay A., Rochette Y., Martin B., Chilliard Y., Morgavi D., P. & Doreau M., 2011. Methane output and rumen microbiota in dairy cows in response to long-term supplementation with linseed or rapeseed of grass silage-or pasture-based diets. *Proceedings of the New Zealand Society of Animal Production* **71**, New Zealand Society of Animal Production, 243-247.
- Mayer J., Buegger F., Steen Jensen E., Schloter M. & Hess J. 2003b: Residual nitrogen contribution from grain legumes to succeeding wheat and rape and related microbial process. *Plant and Soil*. 541-554.
- Messin M., 2009. Wärmerückgewinnung und Wärmetauscher. *Datenblätter Erneuerbare Energien*, Agridea.
- Model A., Berg W., Hellebrand H. J. & Kern J., 2006. Ammonia and trace gas emissions from organic fertilizers amended with gypsum. In: Workshop on agricultural air quality–state of the science'.(Eds VP Aneja, WH Schlesinger, R Knighton, G Jennings, D Niyogi, W Gilliam, CS Duke, MD Potomac) pp, 923-929.
- Münger A., Eggerschwiler L., Silacci P. & Dohme-Meier F., 2019. Methanemissionen von Milchkühen: Einfluss von Ölsaaten im Futter. *Agrarforschung Schweiz* **10**, 74-79.

- Musfeldt B. & Mahlkow-Nerge K. 2017: Verdichtungen von Gras- und Maissilagen in der Praxis – noch große Potentiale vorhanden. 1-5.
- Nemecek T., Huguenin-Elie O., Dubois D. & Gaillard G., 2005. Ökobilanzierung von Anbausystemen im schweizerischen Acker- und Futterbau. *FAL-Schriftenreihe* **58**, Agroscope FAL Reckenholz, Zürich, 1-246.
- Nemecek T. & Gaillard G., 2007. Reducing the complexity of environmental indicators for improved communication and management. In: Farming system design - an international symposium on Methodologies for Integrated Analysis of Farm Production Systems, 10. - 12. September 2007, Catania.
- Nemecek T., Freiermuth Knuchel R., Alig M. & Gaillard G., 2010. The advantages of generic LCA tools for agriculture: examples SALCAcrop and SALCAfarm. In: 7th Int. Conf. on LCA in the Agri-Food Sector (Ed. Notarnicola B.), Bari, Italy, 433-438.
- Palma J. H., Graves A. R., Bunce R. G. H., Burgess P. J., De Filippi R., Keesman K. J., van Keulen H., Liagre F., Mayus M., Moreno G., Reisner Y. & Herzog F., 2007. Modeling environmental benefits of silvoarable agroforestry in Europe. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **119** (3), 320-334.
- Pommer R., 2015. Energiebedarf von Melk- und Kühlanlagen. *Schriftenreihe des LfULG* **1/2015**.
- Resch R. & Wildling J., 2017. Auswirkung verschiedener Folien-Abdecksysteme auf Gärungseigenschaften, Futterhygiene und aerobe Stabilität von Gras- und Maissilage im Fahrsilo. Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft (HBLFA) Raumberg-Gumpenstein, Irdning-Donnersbachtal, 1-19.
- Richner W., Sinaj S., Carlen C., Flisch R., Gilli C., Huguenin-Elie O., Kuster T., Latsch A., Mayer J., Neuweiler R. & Spring J.-L. 2017: Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD). (Spezialpublikation) Agrarforschung Schweiz [Hrsg.]. 1-276.
- Richter W., Zimmermann N., Abriel M., Schuster M., Kölln-Höllrigl K., J. O., Meyer K., Bauer J. & Spiekers H., 2009. Hygiene bayerischer Silagen - Controlling am Silo. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Freising-Weihenstephan, 1-131.
- Rossier D. & Gaillard G., 2004. Ökobilanzierung des Landwirtschaftsbetriebs - Methode und Anwendung in 50 Landwirtschaftsbetrieben. *FAL Schriftenreihe* **53**, Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL), Zürich, 1-148.
- Sauter J. & Dürr L., 2005. Einfluss der Messerschärfe auf den Leistungsbedarf von Mähwerken und Ballenpressen. Ettenhausen, 1-4.
- Sax M., 2015. Wärmerückgewinnung (WRG) bei der Milchkühlung. *Weiterbildungskurs für Baufachleute*.
- Schick M. 2000: Arbeitszeitbedarf verschiedener Melkverfahren. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT) [Hrsg.]: FAT-Bericht. 1-16.
- Schrade S., Nydegger F. & Ammann H., 2005. Mechanisierte Vorlage von Rundballen. Agroscope Tänikon FAT, Tänikon.
- Schweizerische Agentur für Energieeffizienz (SAFE), 2014. Frequenzumrichter - Die wichtigsten Fakten zur Auswahl und zum Einsatz von Frequenzumrichtern.
- Seidel F. & Jäger M., 2015. Experteneinschätzung zur Ertragsreduktion der Unterkultur in Agroforstsystemen. Agroscope, Agridea.
- Singh B. P., Cowie A. L. & Smernik R. J. 2012: Biochar Carbon Stability in a Clayey Soil As a Function of Feedstock and Pyrolysis Temperature. *Environmental Science and Technology*. 11770-11778.
- Smith P., 2016. Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies. *Global Change Biology* **22** (3), 1315-1324.
- Statista, 2020. Durchschnittlicher Preis für einen Liter Diesel in der Schweiz von August 2017 bis August 2020. Zugang: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/295480/umfrage/preis-fuer-einen-liter-diesel-in-der-schweiz-monatsdurchschnittswerte/>

- Stierli P., 2016. Beurteilung der Gülleensäuerung als Klimaschutzmassnahme in der Schweizer Landwirtschaft. AgroCleanTech.
- Swiss-Impex, 2020. Datenbank der Aussenhandelsstatistik. Eidgenössische Zollverwaltung, Zugang: <https://www.gate.ezv.admin.ch/swissimpex/index.xhtml> [Mai 2020].
- Teoh R., Caro E., Holman D. B., Joseph S., Meale S. J. & Chaves A. V., 2019. Effects of Hardwood Biochar on Methane Production, Fermentation Characteristics, and the Rumen Microbiota Using Rumen Simulation. *Front Microbiol* **10**, 1534.
- top agrar, 2002. Scheibenmäher schneiden immer besser ab. top agrar, 70-80.
- Trompowsky P. M., de Melo Benites V., Madari B. E., Santos Pimenta A., Hockaday W. C. & Hatcher P. G. 2005: Characterization of humic like substances obtained by chemical oxidation of eucalyptus charcoal. *Organic Geochemistry*. 1480-1489.
- Verges M., Hunter C., Holland R. & Pahl O., 2013. Evaluation of gaseous pollutants arising from slurry containing recycled plasterboard.
- Wernet G., Bauer C., Steubing B., Reinhard J., Moreno-Ruiz E. & Weidema B., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment* **21** (9), 1218-1230.
- Winders T. M., Jolly-Breithaupt M. L., Wilson H. C., MacDonald J. C., Erickson G. E. & Watson A. K., 2019. Evaluation of the effects of biochar on diet digestibility and methane production from growing and finishing steers. *Translational Animal Science* **3** (2), 775-783.
- Woolf D., Amonette J. E., Street-Perrott F. A., Lehmann J. & Joseph S. 2010: Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communication*. 1-9.
- Zähner M., 2015. Experteneinschätzung zum Heisswasserbedarf. Agroscope, 08.04.2015.
- Zähner M., 2020. Experteneinschätzung über den Einsatz und Stand von Holz aus Baumaterial in landwirtschaftlichen Gebäuden in der Schweiz. Agroscope, 07.04.2020.
- Zhang J., Liu J. & Liu R., 2015. Effects of pyrolysis temperature and heating time on biochar obtained from the pyrolysis of straw and lignosulfonate. *Bioresource Technology* **176**, 288-291.
- Zuber R., 2019. Silofolien müssen etwas leisten. *UFA-Revue* **2**.

10 Anhang

10.1 Verfügbare Studien zur Verfütterung von Pflanzenkohle

Es existieren einige wenige Studien über das Methanreduktionspotenzial von Pflanzenkohle bei der Verfütterung an Nutztiere. Der grösste Teil der Studien sind in-vitro Studien, das heisst, diese Studien wurden nicht mit lebendigen Tieren durchgeführt, sondern im Labor, mit der «*Rumen Simulation Technique*» (RUSITEC). Mit RUSITEC wird der Pansen eines Wiederkäuers im Labor nachgeahmt. Dabei wird frischer Pansensaft als Substrat verwendet und in Röhren abgefüllt, welche anschliessend mit CO₂ gespült und während einer konstanten Zeit bewegt werden. Zusätzlich dazu wird kontinuierlich Speichelsaft zugeführt, der den pH-Wert im künstlichen Pansen puffert. RUSITEC misst während der Zeit des Versuches die entstehenden Gase und führt diese ab. Mit RUSITEC können verschiedene Substrate in einer pansenähnlichen Umgebung untersucht werden. Dabei kann herausgefunden werden, wie sich verschiedene Substrate im Pansen verhalten und wie diese durch die Mikroorganismen verarbeitet werden. So kann auch der Ausstoss von Treibhausgasen grob abgeschätzt werden. Der Vergleich von RUSITEC-Experimenten mit Experimenten aus der Praxis (In-Vivo-Experimente) ist nur beschränkt möglich, da RUSITEC-Experimente eine künstliche Umgebung nachahmen und weitere wichtige Funktionen im Pansen und vom Tier allgemein ausschliessen.

Folgende Ergebnisse sind Stand September 2020 vorhanden:

Art des Experiments	Allgemeine Info	Pflanzkohle (Substrat)	Verfütterte Menge (%TS)	Gemessene Methanreduktion (%) im Vgl. zur Kontrolle ohne Pflanzkohle	Quelle
In-vitro	48h bei 39°C, Rumen von Jersey Rindern, keine Veränderung im Abbau von Futter festgestellt	Pflanzkohle aus Stroh und/oder Holz als Substrat	9%	11-17% (nicht signifikant)	Hansen <i>et al.</i> (2012)
In-vitro	24h oder 48h, Cassavawurzel als Futter verwendet, 1-5% Kohle Addition, mit/ohne zusätzliche NPN Quellen (Urea, Natriumnitrate)	Pflanzkohle aus Reisspelzen, 1mm, produziert bei Temperaturen zwischen 900°-1000°C	1%	11-13%	Leng <i>et al.</i> (2012a)
In-vivo	12 «Yellow» Rinder, 80-100 kg, 21 Tage Angewöhnungszeit, 98 Tage Experiment, Cassavawurzel und Cassavablätter als Futter, mit/ohne zusätzliche NPN Quellen (Urea, Natriumnitrate)	Pflanzkohle aus Reisspelzen, 1mm, produziert bei Temperaturen zwischen 900°-1000°C	0.6%	22%	Leng <i>et al.</i> (2012b)
In-vitro	Futter: Hafer-Wick-Gemenge, Maissilage, Futterkonzentrat (35:35:30%), 15 Tage,	Pflanzkohle aus Pressresten von Laubholz	3.6% und 7.2%	0.84%	Teoh <i>et al.</i> (2019)
In-vivo	Futter: Heu, Weizenstroh, Maissilage, Kleie, Futterkonzentrat, Pflanzkohle ersetzt Konzentrat, 6 Stiere (529 kg), 8 Tage Angewöhnung, 2 Tage Messung, Futteraufnahme nicht verändert	Kieferholz, (85% Kohlenstoff)	0%, 0.8%, 3.0%	9.6-10.7%	Winders <i>et al.</i> (2019)

In keiner Studie wurde ein signifikanter Unterschied zwischen den Methanemissionen mit oder ohne Verfütterung von Pflanzkohle gefunden. Gemäss Literatur konnten die vielversprechenden Ergebnisse von in-vitro Studien noch nicht im Feld reproduziert werden. Im Durchschnitt wird eine Methanreduktion von rund 10% gemessen, wobei diese Reduktion aber in keiner Studie statistisch signifikant war und so momentan nur eine Tendenz in Richtung einer möglichen Methanreduktion existiert.